



Faculté de philosophie, arts et lettres

Commission doctorale du domaine philosophie

Centre de recherche CEFISES

Etude de la rationalité chez les acteurs institutionnels de la gestion des déchets radioactifs : analyse épistémologique et dimensions éthiques

Le cas de l'optimisation de la roche hôte pour un
stockage géologique de déchets radioactifs

Volume I

Membres du jury :

Pr. Alexandre Guay, promoteur,
UCLouvain,
Pr. ém. Bernard Feltz, promoteur,
UCLouvain, secrétaire
Pr. Tom Dedeurwaerdere,
UCLouvain, président
Dr. Julie Jebeile, CNRS
Dr. Erik Laes, Eindhoven University
of Technology
Ir. Jean-Paul Minon, ex-Directeur
général ONDRAF

Thèse réalisée par
Christophe DEPAUS

en vue de l'obtention du
grade de
Docteur en philosophie

Louvain-la-Neuve
Année académique 2022-2023

Place Blaise Pascal, 1 bte L3.03.11, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique www.uclouvain.be/fial

Remerciements

« *Quand on rédige une thèse de doctorat à 40 ans passés, on a tendance à vouloir écrire l'œuvre de sa vie* », me disait Bernard Feltz, il y a quelques mois encore, alors que je m'apprêtais à ajouter une troisième partie à ce manuscrit. J'ai d'abord pensé qu'il exagérait un peu puis, à l'heure d'écrire ces remerciements, je m'aperçois qu'il avait raison.

En effet, j'aimerais bien saluer toutes les personnes qui ont croisé ma vie depuis ma naissance parce que, peu ou prou, elles m'ont conduit là où je suis. Si je me laissais aller à un tel élan, j'ajouterais certainement une troisième partie. Rassure-toi, Bernard, je n'en ferai rien. Avec un tel sujet de recherche, il serait bon de préserver un peu de *rationalité*, même pour ces remerciements.

Ceux-ci s'adressent évidemment, en priorité, à mes promoteurs, le professeur émérite Bernard Feltz, promoteur « historique » de ce travail de recherche, et le professeur Alexandre Guay qui a gentiment accepté de prendre le train en marche lorsque que Bernard a accédé à l'éméritat. Sans eux, ce travail n'aurait jamais pu voir le jour.

En particulier, je remercie Bernard pour ne pas avoir hésité une seconde à prendre sous son aile un ingénieur engagé dans la vie professionnelle depuis vingt ans, afin de l'aider à réaliser son rêve. Merci pour ce soutien précieux, cet optimisme et plus généralement, cette foi en l'humain. Merci aussi pour tous tes commentaires pertinents, ta relecture attentive et tes conseils.

Je remercie également Alexandre Guay dont les commentaires, lors de l'épreuve de confirmation, étaient si riches, qu'ils m'ont accompagné jusqu'aux conclusions ! J'ai tenté d'y répondre du mieux que j'ai pu et ce sont

eux, notamment, qui m'ont convaincu d'approfondir le volet éthique de ma réflexion.

A propos d'éthique, merci à la spécialiste Céline Kermisch, membre du comité d'accompagnement, pour le précieux soutien qu'elle m'a prodigué tout au long de mon parcours de recherche. Merci Céline d'avoir relu cette thèse, des premiers fragments à l'unité qu'elle présente aujourd'hui. Toutes tes remarques m'ont fait progresser et ta bienveillante supervision m'a rassuré.

Merci à Peter Verdée d'avoir accepté de rejoindre le comité d'accompagnement. Je le remercie pour ses remarques constructives lors de l'épreuve de confirmation.

Bien que j'aie réalisé cette thèse exclusivement sur mon temps libre, je tiens à remercier Jean-Paul Minon, ancien directeur général de l'ONDRAF, de m'avoir autorisé à l'entreprendre. C'est aussi en travaillant à ses côtés que j'ai eu le privilège d'entrevoir les coulisses de la CIPR. J'ai pu ainsi compléter l'expérience que j'avais acquise auprès des autres instances internationales que sont l'AIEA et l'AEN.

De manière générale, je remercie tous mes collègues de l'ONDRAF qui, sans le savoir, m'ont énormément inspiré dans la réalisation de ce travail. Leur ouverture d'esprit, leur intelligence et leur humour m'invitent sans cesse à me dépasser : Katrien, Emma, Séverine, Philippe, Maarten, Manuel, Xavier, Hervé, Stéphane, William, Didier & Didier, Tomas, Arne, Roberto, Laurent, Robert, Annick, Danièle, Erik, Benny, Wim, Elise, Cassandra, Peter, Robin, Jean-Paul, Peter (l'autre) et bien d'autres. Merci également à mes *alter-ego* de l'AFCN d'avoir été, eux aussi sans le savoir, à l'origine de cette recherche : Frédéric, Frank, Jeroen, Valéry, Maryna, Walter et Geert. Ma profonde estime pour leur travail ainsi que nos relations de sympathie m'ont naturellement conduit à faire de nos désaccords une question digne de l'investigation la plus sérieuse...

... In het bijzonder, hartelijk bedankt aan Katrien, voor haar waardevolle steun en raadgevingen. Merci aussi pour ta bienveillance, ton incroyable capacité d'écoute et ton intelligence (la section « *Qu'est-ce qu'une décision rationnelle ?* » a grandement bénéficié de ta critique !).

... Merci à Emma pour ne pas avoir exprimé le moindre doute sur ma capacité d'aboutir alors que je ne faisais encore que caresser l'idée de m'inscrire au doctorat de philosophie. Ton assurance m'a donné confiance.

Merci à tous mes collègues de l'international pour nos captivantes discussions : Stratis, Paul, Steve, Slimane, Liz, Camille, Kristina, Bengt, Thörtsen, Alexis, Julien, Gilles, Michaël, Erik, Cécile, Jantine, Yuliya, Son, John, Céline et bien d'autres... cette liste ne sera jamais exhaustive.

Merci à Véronique de m'avoir permis de déjouer les facéties de Word et de surmonter les difficultés de mise en page.

Merci à mes amis et à mes élèves de l'aïkido, Aurélie, Karry, Laura, Vincent, Nouredine, Mathieu, Valérie, Marianne, Sébastien, Natalia, Xavier, Jean-Luc, Ambre, Douglas, Véronique, Marc, Michaël M., Raquel, Michaël A., Benoit, Laurence, David, Gérard, Cécile, Nora et Jan de vous être intéressés à ma recherche et surtout de vous être inquiétés de l'immense effort qu'elle a nécessité.

Merci à Ingrid de m'avoir encouragé à entreprendre ce parcours.

Merci à Olivier et Nicolas, mes amis de toujours, partis trop tôt. Nous avions coutume de refaire le monde ensemble, autour d'une bonne bouteille ou de quelques mousses. Vous vouliez savoir comment je conclurais cette thèse, j'ai cheminé trop lentement pour que nous puissions en deviser. Pardon... je vous la dédie tout là-haut.

Merci à mes parents, à ma mère et André ainsi qu'à mon père pour avoir toujours soutenu mes choix, en particulier, mes choix d'études. Merci pour votre bienveillance, elle m'a accompagné tout au long de ce processus, je l'ai sentie à chaque instant.

Merci à mon oncle Roger. Toi, tonton, qui, du fond de ta campagne danoise, t'intéresses à cette curieuse recherche et qui en attends le manuscrit. Promis, je te l'apporterai.

Enfin, merci à Valentina pour toutes ces journées passées à me laisser réfléchir et écrire. Merci pour ton soutien quotidien, merci d'avoir accepté de sacrifier tant de soirées, de dimanches, de balades et de visites d'expo

pour que je puisse conclure cet immense travail. Merci aussi pour tes conseils, ton aide graphique et ta cuisine !

Un remerciement spécial à Ikkyo, mon chat, qui ne lira jamais ses lignes mais qui me rappelle, en me mordillant le mollet, à quel point il a été présent à mes côtés en partageant mes longues heures de bureau. Tu es devenu mon compagnon d'écriture et de méditation.

Un dernier merci à toutes celles et tous ceux dont j'ai croisé le chemin ces cinq dernières années et qui m'ont souri, aidé, critiqué, encouragé, mis au défi, bousculé, aimé et finalement conduit, peu ou prou, là où j'en suis. Si vous n'êtes pas repris dans ces lignes, vous êtes assurément présents dans mon cœur. Merci !

Résumé

Une divergence d'opinions entre l'ONDRAF¹ et l'AFCN² a pu se constater lors des réunions d'interaction mettant en jeu le *principe d'optimisation radiologique*. A ce jour, après dix ans d'interactions fondées sur l'échange d'arguments scientifiques, cette divergence demeure. C'est l'*impetus* de cette thèse.

Nous montrons que cette différence d'opinions peut trouver son origine dans une doctrine internationale de sûreté ambiguë, tant dans la définition (non univoque) de la sûreté que dans celle de l'optimisation. En particulier, nous observons, pour l'optimisation, un glissement non nécessairement justifié du registre de la protection radiologique vers celui de la sûreté. Selon notre analyse, ce glissement conceptuel observé au cours de l'évolution historique du principe d'optimisation a créé une aporie pouvant engendrer une ambivalence d'interprétations.

Afin d'approfondir ce premier constat, lui fournir un cadre d'analyse théorique et répondre à la question du *comment* cette divergence se manifeste, nous interrogeons les travaux de la CIPR³ qui consacre le principe d'optimisation comme un « état d'esprit » dans la recherche de solutions les plus sûres, ce qui pourrait donner lieu à différentes manières de raisonner et donc à différentes rationalités. Le recours aux travaux de *Herbert Simon* sur la rationalité permet de montrer les insuffisances théoriques et pratiques du principe d'optimisation. L'optimisation résulte d'une *rationalité substantive* supposée parfaite alors que la recherche de solutions satisfaisantes

¹ Organisme National des Déchets Radioactifs et des matières Fissiles enrichies, c'est-à-dire l'organisme en charge de la gestion des déchets radioactifs.

² L'Agence Fédérale de Contrôle Nucléaire, à la fois autorité de sûreté et autorité de réglementation compétente.

³ Commission Internationale de la Protection Radiologique.

(*satisficing*) témoigne de la mise en œuvre d'une rationalité *procédurale* ou *limitée*⁴. A ce stade de la réflexion, il est déjà permis de supposer que l'ONDRAF et l'AFCN s'alignent sur des modèles de rationalité concurrents. Pour en obtenir la confirmation, nous proposons une étude de cas visant à appliquer le cadre théorique de Simon à la question qui divise le plus l'ONDRAF et l'AFCN, à savoir l'optimisation du choix de la roche hôte pour un stockage géologique. Cette étude de cas permet de mettre en évidence une différence de cadrage de la problématique à l'examen. Cette différence, bien que significative, peut passer inaperçue dans les échanges entre ingénieurs des deux institutions. La sûreté, un *maximum* pour l'AFCN et un *degré d'aspiration* pour l'ONDRAF, apparaît seulement, en première instance, comme une préoccupation commune sans laisser sa dimension métaheuristique⁵ se dévoiler. Les contraintes et variables du problème se déclinent également différemment pour ces deux acteurs.

Cependant, l'explication n'est pas complète tant qu'on n'a pas pu identifier les causes de cette différence. Avoir montré que la doctrine internationale recélait une ambiguïté intrinsèque qui permet l'exégèse du principe d'optimisation n'explique que la possibilité d'une différence, pas son actualisation. Le flou conceptuel autour de la sûreté ainsi que ce qui a été identifié comme une dérive du principe d'optimisation sont des conditions *nécessaires* à une divergence de points de vue mais elles ne *suffisent* pas encore à expliquer pourquoi les positions des deux institutions sont *effectivement* différentes. Cette cause inconnue se loge dans une subjectivité à l'origine des préférences et à chercher en dehors de l'espace du problème. L'explorer conduit à s'interroger sur les valeurs morales et éthiques de l'ONDRAF et l'AFCN. Comme ces valeurs ne peuvent s'accommoder du cadre instrumental de la rationalité de *Herbert Simon*, nous élargissons ce dernier en recourant à la théorie de la *rationalité ordinaire* de *Raymond Boudon* qui distingue la dimension instrumentale de la dimension axiologique. Cette

⁴ « Procédural » et « limité » ne sont en réalité pas complètement synonymes. Nous l'expliquons dans la thèse.

⁵ Nous employons ce terme en tant qu'adjectif en nous écartant sensiblement de son acception en tant que substantif, à savoir un algorithme d'optimisation destiné aux problèmes d'optimisation difficile. Nous désignons ici l'angle d'attaque du problème d'optimisation, soit par optimisation stricte soit par degré d'aspiration en recherche de *satisficing*.

exploration nous conduit à approfondir les théories de l'*utilitarisme* et du *suffisantisme*.

Nous concluons la réflexion en dressant, pour l'AFCN et l'ONDRAF, un profil qui révèle l'implicite des débats afin d'éclairer tant le *non-dit* - voire le *non-pensé* - que les raisons premières de leurs différences de vues. Il est possible de comprendre à présent *comment* l'AFCN et l'ONDRAF diffèrent mais aussi *pourquoi*.

Table des matières

Remerciements	iii
Résumé	vii
Table des matières	xi
Liste des abréviations	xxi
Liste des figures.....	xxv
Liste des tableaux.....	xxxi
Liste des encadrés	xxxv
Avertissement.....	1
Conventions d'écriture	3
Introduction générale.....	5
Prolégomènes	5
Chapitre 1 Question de recherche et considérations méthodologiques.	13
1.1 La question de recherche	13
1.2 Considérations méthodologiques	15
Chapitre 2 Radioactivité, protection radiologique et déchets radioactifs	19
2.1 Notions élémentaires de physique relatives au phénomène de la radioactivité.....	20
2.1.1 Structure du noyau atomique	20
2.1.2 La décroissance radioactive	21

2.1.3	Les différents types de rayonnements ionisants	25
2.1.3.1	Le rayonnement alpha	25
2.1.3.2	Le rayonnement beta (et la capture électronique)	25
2.1.3.3	Le rayonnement électromagnétique gamma	27
2.1.3.4	L'émission de neutrons	28
2.2	Notions fondamentales de protection radiologique.....	29
2.2.1	La dose	29
2.2.2	Les effets déterministes et les effets stochastiques des radiations	31
2.2.3	Le modèle LNT : une approche de sûreté	33
2.2.4	Contraintes de dose, limites de dose et niveaux de référence	35
2.3	Les déchets radioactifs	38
2.3.1	Définition(s).....	38
2.3.2	Classification des déchets radioactifs	46
Chapitre 3	Stockage géologique des déchets radioactifs	51
3.1	Stratégie générale de sûreté : isoler et confiner	52
3.2	Composants principaux de la stratégie de sûreté.....	57
3.2.1	Concept de sûreté et fonctions de sûreté.....	60
3.2.2	Les principes de sûreté.....	65
3.2.2.1	Le principe de sûreté passive.....	66
3.2.2.2	Les principes de robustesse et de défense en profondeur	68
3.2.2.3	Le principe de démontrabilité.....	73
3.2.2.4	Le principe d'optimisation	74
3.2.3	Choix stratégiques et exigences de haut niveau	75
3.2.4	La stratégie de gestion (<i>management strategy</i>)	77

3.2.5	Stratégie de conception et méthodologie d'évaluation de la sûreté : l'outil des « <i>statements</i> »	79
3.3	Stockage géologique en Belgique ?	83
3.3.1	L'étendue du programme nucléaire belge et de ses déchets	83
3.3.2	Les politiques nationales sur la gestion à long terme des déchets radioactifs	85
3.3.3	Une Belgique schizophrène ?	87
3.3.4	Hypothèse de travail : le choix des argiles comme roche hôte	92
Chapitre 4	Le dossier de sûreté	97
4.1	Définition et portée	97
4.2	<i>Safety case</i> , faisceau de preuves (<i>multiple lines of evidence</i>) et scénario de référence	100
4.3	Calcul de sûreté et cas de référence (<i>reference case</i>) : descriptions conceptuelle et mathématique	105
4.4	Résultats-types de l'évaluation de sûreté : modèle numérique	111
4.5	Scénarios d'évolution altérée, scénario d'intrusion humaine (HI) et « <i>what-if cases</i> »	115
4.6	Les scénarios pénalisants	121
Chapitre 5	Plan de la thèse	125
	Première partie : de la protection radiologique à la sûreté, analyse épistémologique et éthique	129
Chapitre 6	La « sûreté », concept inclusif et omniprésent	131
6.1	Vers une impossible définition	132
6.2	Sûreté ou fiabilité ? L'apport historique des systèmes industriels « classiques »	136
6.2.1	Lien entre le monde industriel classique et le monde nucléaire : cas particulier des stockages de déchets radioactifs	136

6.2.2	Sécurité et sûreté : pagaille terminologique.....	138
6.2.3	Sûreté, sécurité et fiabilité.....	139
6.3	Sûreté ou innocuité ?	147
6.4	Sûreté, générations futures et principe de précaution.....	157
6.5	Critique de l'exigence d'innocuité.....	162
6.6	Les scénarios pénalisants comme élément d'analyse de la sûreté à long terme	168
6.7	Conclusions du chapitre 6	175
Chapitre 7 Protection radiologique : des fondements éthiques à la sûreté		
		179
7.1	Principes généraux de la protection radiologique, protection des générations futures et durabilité	180
7.2	Ethique et générations du futur	188
7.2.1	Le double enracinement de l'éthique du futur de Jonas et l'approche déontologique.....	188
7.2.2	Protéger les générations futures : évidence morale ou construction opportuniste ? Discussion critique des principales objections à la préservation des générations futures	193
7.2.3	Générations futures proches et générations futures lointaines	202
7.3	Quelles notions de justice pour l'équité intergénérationnelle ?.	206
7.3.1	L'utilitarisme comme approche agrégative	207
7.3.2	L'approche libérale-égalitaire comme théorie de justice distributive	212
7.3.3	Quelques autres théories de justice distributive	220
7.3.4	L'approche coopérative (ou commutative).....	224
7.4	Fondements éthiques des trois principes de la protection radiologique	224

7.4.1	Optimisation, limites de doses et principe ALARA.....	225
7.4.2	Du groupe critique à la personne représentative	226
7.4.3	Origine et critique du principe des limites de doses	229
7.4.3.1	Effets stochastiques des rayonnements et origine du principe de limites de doses	229
7.4.3.2	Fondement éthique du principe de limites de doses et relation au principe ALARA. Egalitarisme et prioritarisme	231
7.4.3.3	Le concept de minimis : quand le principe de limites de doses – en mode inverse – prend sa revanche sur le principe ALARA. L'éthique déontologique de la CIPR battue en brèche.....	234
7.4.3.4	Une clarification utile : le concept de minimis et le stockage géologique	237
7.4.3.5	Un équilibre complexe	238
7.4.4	Présentation du principe d'optimisation en lien avec le principe BAT(NEEC)	239
7.4.5	Relation entre le principe d'optimisation et le principe de robustesse	242
7.4.6	Ethique du principe de justification	243
7.4.6.1	Justification, bienfaisance et utilitarisme	243
7.4.6.2	Rôle décisionnel du principe de justification	244
7.4.7	Principe de justification et optimisation	245
7.5	Liens entre l'optimisation radiologique et les principes de sûreté	245
7.6	Conclusions du chapitre 7	247

Chapitre 8 Le principe d'optimisation : du principe opérationnel au principe de gouvernance.....	251
8.1 Protection radiologique et sûreté : vrais faux amis	252
8.2 Interprétation évolutive du principe d'optimisation	254
8.2.1 Au fil de la CIPR	255
8.2.2 La publication 101 de la CIPR	258
8.2.3 La publication 103 de la CIPR	261
8.2.4 L'observation de l'AEN	264
8.2.5 Regards croisés AIEA/CIPR sur l'élargissement de l'optimisation	265
8.3 De la protection radiologique à la sûreté.....	271
8.4 Consanguinité des principes : BAT, précaution et optimisation .	274
8.5 Influence du BAT sur le principe d'optimisation : le souffle de l'action	278
8.6 Schizophrénie de l'optimisation : vers une rationalité multiple ? Conséquences pour le stockage	287
8.7 Techniques d'aide à la décision et optimisation : aux confins de l'utilité	295
8.7.1 L'analyse coût-bénéfice.....	296
8.7.2 La méthode coût-efficacité	301
8.7.3 L'analyse multicritères	303
8.7.4 Réflexions éthiques ciblées sur l'application du principe d'optimisation	306
8.7.5 Réflexion sur la transposition de ces méthodes à la sûreté.	308
8.7.6 La sûreté est-elle soluble dans l'utilité ?	311
8.8 Synthèse et conclusions du chapitre 8	312

Chapitre 9 Optimisation et rationalité : les travaux d’Herbert Simon ..317

9.1	Optimisation versus « <i>satisficing</i> ».....	318
9.2	La rationalité limitée dans l’exercice du choix	322
9.3	Qu’est-ce qu’une décision rationnelle ?.....	324
9.4	Les biais dans la prise de décision	332
9.4.1	Les effets de cadrage.....	332
9.4.2	Les effets de simplification.....	334
9.4.3	Le biais des raisons procédurales.....	338
9.5	Rationalités substantive, limitée et procédurale : de l’économie à la psychologie.....	341
9.6	Rationalité, raisonnement et comportement	347
9.7	Optimisation et sûreté : concepts polémiques pour une rationalité partagée	351
9.8	Introduction à l’étude de cas : l’ONDRAF et l’AFCN en tant qu’acteurs en mouvement dans un espace multidimensionnel de rationalités.....	353
9.9	Conclusions du chapitre 9	357

Deuxième partie : étude de cas.....359

Chapitre 10 Le principe d’optimisation appliqué au choix de la roche hôte
.....361

10.1	Contexte	361
10.2	Analyse des avis de l’AFCN, de la note de positionnement de l’AFCN et de la note de convergence sur l’optimisation	363
10.2.1	Avis de l’AFCN sur le Plan Déchets de 2011 et le SEA associé	363
10.2.2	La note de positionnement de l’AFCN	366
10.2.3	L’avis sur le programme national belge	376
10.2.4	Distorsion, ordonnancement et règle de préférences.....	380

10.2.5	La note de convergence sur l'optimisation	390
10.2.6	Réflexions transversales sur les avis de l'AFCN	397
10.3	Analytique de l'optimisation : application du cadre d'analyse de la rationalité de Simon à la question du choix de la roche hôte.....	402
10.4	Optimisation de la roche hôte	414
10.4.1	Vers une analyse systématique.....	414
10.4.2	L'attribut de sûreté comme élément de base de la méthodologie	416
10.4.3	Evaluation des roches hôtes	425
10.4.3.1	Critères, propriétés et valeurs-limites	426
10.4.3.2	Procédure de sélection	428
10.4.4	Analyse critique des critères de sélection et des attributs de sûreté	434
10.4.5	Les résultats après application des critères d'exclusion	440
10.4.6	Application des critères génériques : analyse multicritères et optimisation	443
10.4.7	Evaluation des résultats des premières simulations.....	453
10.4.7.1	Première question : une option foncièrement meilleure existe-t-elle ?.....	457
10.4.7.2	Quel est le coût sociétal d'un gain de sûreté ? Une dualité de subjectivités	462
10.5	Subjectivité psychologique et rationalité ordinaire	466
10.5.1	Ce que Simon ne dit pas.....	466
10.5.2	Rationalité instrumentale et utilitarisme : un filtre éthique sous-jacent ?	471
10.5.3	Théorie de la rationalité ordinaire : la réponse de Boudon à Simon.....	473
10.5.4	La typologie des croyances et des rationalités appliquée à l'optimisation de la sûreté	479

10.6	Ethique et optimisation	485
10.6.1	Systèmes de valeurs de l'AFCN et de l'ONDRAF	485
10.6.1.1	Le principe d'amélioration continue : de l'ALARA au SAHARA	485
10.6.1.2	L'AFCN et la Déclaration nationale de la sûreté	488
10.6.1.3	L'ONDRAF : sa Mission et sa Déclaration stratégique..	492
10.6.1.4	Comparaison des deux déclarations (AFCN et ONDRAF)	492
10.6.2	Perspective axiologique : quelles théories de la justice distributive pour l'ONDRAF et l'AFCN dans leur conception de la sûreté ?	493
10.6.2.1	Analyse de la Déclaration stratégique de l'ONDRAF et de sa position sur la réversibilité des stockages en termes de justice sociale	494
10.6.2.2	ONDRAF et le cadre moral de la durabilité	501
10.6.2.3	Quel modèle de justice distributive pour l'ONDRAF ?.	506
10.6.2.4	Analyse de la déclaration de sûreté de l'AFCN : conséquences en termes de justice sociale d'une conception centrifuge de la sûreté	511
10.6.3	Positionnement de l'AFCN et l'ONDRAF par rapport à l'équité intergénérationnelle	518
10.6.3.1	Enjeux éthiques associés à l'application du principe d'optimisation au choix de la roche hôte	520
10.6.3.2	Un point commun qui sépare : la préservation des intérêts vitaux	530
10.6.3.3	Equité et incertitude : le tribut justifié des générations présentes	532
10.7	Vers une hybridation des rationalités : application de la TCR et de la TRO à l'AFCN et l'ONDRAF	536
10.8	Synthèse et conclusions du chapitre 10	539

Conclusions générales	543
Chapitre 11 Bilan	545
11.1 Premier mouvement : l'analyse des questions sous-jacentes	546
11.1.1 La sûreté.....	546
11.1.2 L'éthique du système de la protection radiologique et la protection des générations futures	549
11.1.3 Le principe d'optimisation.....	553
11.1.4 Fin du premier mouvement	556
11.2 Deuxième mouvement : le cadrage théorique de la rationalité .	557
11.3 Troisième mouvement : l'étude de cas (application du principe d'optimisation au choix de la roche hôte).....	559
11.3.1 Première étape (Simon)	559
11.3.2 Deuxième étape (Simon).....	560
11.3.3 Troisième étape (Boudon).....	563
11.4 Epilogue	568
Annexes	571
Références	573

Liste des abréviations

AEN (NEA)	Agence pour l'énergie nucléaire (<i>Nuclear Energy Agency</i>)
AFCN	Agence fédérale de contrôle nucléaire belge. Encore appelé « Régulateur » ou, dans certains textes légaux, Agence de réglementation compétente. Dans le contexte belge, l'AFCN est également parfois simplement désignée comme « Agence ».
AIEA (IAEA)	Agence Internationale de l'Energie Atomique (<i>International Atomic Energy Agency</i>)
ALARA	<i>As Low As Reasonably Achievable</i>
ALARP	<i>As Low As Reasonably Practicable</i>
ANDRA	Gestionnaire français des déchets radioactifs
ARG	Argilite indurée dont l'étude est recommandée par l'AFCN
B&C	Déchets conditionnés de catégorie B (faiblement et moyennement radioactifs à vie longue) et de catégorie C (déchets hautement radioactifs et combustibles usés déclarés comme déchets)
BAT ou BATNEEC	<i>Best Available Technology</i> <i>Best Available Technology Not Entailing Excessive Costs</i>
BDBA	<i>Beyond Design Basis Accident</i>
BRGM	Bureau français de recherches géologiques et minières
CIPR (ICRP)	Commission Internationale pour la Protection Radiologique (<i>International Commission for Radiological Protection</i>)
CPNPC	Comité du Programme National / <i>Comité van het Nationale Programma</i> (<i>Nationale Programme Comité</i>)
CNSD	Composants naturels du système de dépôt
COSD	Composants ouvrages du système de dépôt

CNOS	Composants naturels à l'origine des sollicitations
DBA	<i>Design Basis Accident</i>
DiD	<i>Defence-in-depth</i>
EES	Scénario d'évolution attendue (<i>Expected Evolution Scenario</i>)
ENSI	Inspection fédérale de la sécurité nucléaire suisse (IFSN) (<i>Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ; Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate</i>)
FEPs	<i>Features, Events and Processes</i>
FNRS	Fonds de la Recherche Scientifique
GSB	<i>Geological Survey of Belgium</i>
HI	Intrusion humaine (<i>Human Intrusion</i>)
IGSC	<i>Integration Group for the Safety Case</i>
IPPC	<i>Integrated Pollution Prevention and Control</i> (directive européenne)
LNT	<i>Linear Non Threshold model</i>
MKS	<i>Medvedev Karnik Sponheuer</i>
MOX	<i>Mixed Oxide Fuel</i>
Nagra	Gestionnaire suisse des déchets radioactifs
NORM	<i>Naturally Occurring Radioactive Materials</i>
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
ONDRAF	Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies, parfois appelé l'« Organisme » (<i>NIRAS - Nationale instelling voor radioactief afval en verrijkte splijtstoffen</i>)
P&T	<i>Partitioning & Transmutation</i>
PGA	<i>Peak Ground Acceleration</i>
R&D	<i>Research and Development</i>
RGPRI	Règlement général de la protection de la population, des travailleurs et de l'environnement contre le danger des rayonnements ionisants

RS	Scénario de référence
SAHARA	<i>Safety as high as reasonably achievable</i>
SEA	<i>Strategic Environmental Assessment</i>
SITEX	<i>European network of experts on radioactive waste management Involving TSOs, Regulators and Civil Society Experts</i>
SSC	<i>Structures, Systems and Components</i>
TCR	Théorie du choix rationnel
tHM	<i>Ton Heavy Metal</i>
THMBC	Conditions thermiques, hydrauliques, mécaniques, biologiques et chimiques
TRO	Théorie de la rationalité ordinaire
TSO	<i>Technical Support Organisation</i>
UMAN	Projet européen dédié au traitement des incertitudes (<i>EURAD Work Package dedicated to networking on uncertainty management</i>)
WCED	Rapport Brundtland
WIPP	<i>Waste Isolation Pilot Plant (US)</i>

Liste des figures

<i>Figure 2-1 – Modèle LNT représenté de façon schématique, illustrant le caractère linéaire raisonnablement confirmé par les données épidémiologiques au-delà d’une certaine dose et l’extrapolation de cette tendance aux faibles doses. L’interpolation linéaire est questionnée par rapport à d’autres comportements supposés. La courbe rouge (a) représente un comportement supra-linéaire, la courbe bleue (b) un comportement sublinéaire, la courbe jaune (c) un comportement obéissant à un seuil. Enfin la courbe verte (d) traduit le phénomène d’hormèse ou effets bénéfiques des radiations à faibles doses (Mancuso et al., 2012).</i>	<i>34</i>
<i>Figure 2-2 – Classification des déchets radioactifs en fonction de leur niveau de radioactivité et de la demi-vie des radionucléides qui les composent (d’après IAEA, 2009a).....</i>	<i>46</i>
<i>Figure 3-1 – Représentation schématique de la stratégie d’isolation et de confinement d’un stockage géologique. L’isolation est désignée par la fonction I sur la figure. Le confinement est représenté par la fonction de sûreté R (retardation) assurée par la roche hôte mais aussi partiellement par certaines barrières ouvragées. La matrice de déchet ainsi que le remblayage de la galerie contribuant à cette fonction R. Quant à la fonction de sûreté C (engineered containment), elle concerne les déchets chauffants et est assurée par un dispositif d’overpack et de buffer détaillé à la section 3.2 (ONDRAF, 2020f).</i>	<i>56</i>
<i>Figure 3-2 – Approche générale itérative de la sûreté selon l’ONDRAF (inspirée de ONDRAF, 2020f).....</i>	<i>59</i>
<i>Figure 3-3 – Représentation des fonctions de sûreté au cours du temps dans le concept de l’ONDRAF. La phase de engineered containment (C) est spécifique aux déchets chauffants (les déchets hautement radioactifs vitrifiés issus du retraitement du combustible usé et/ou le combustible usé déclaré comme déchets et mis en stockage). La période correspondant à la phase thermique est représentée en rouge (ONDRAF, 2009b).....</i>	<i>62</i>

Figure 3-4 – Représentation du concept de superconteneur pour un déchet vitrifié de catégorie C. Sur cet écorché, on peut voir l’emballage primaire du déchet conditionné (canister), son suremballage d’acier (overpack), l’environnement cimentaire entourant l’ « overpack » et constitué du « filler » et du « buffer », eux-mêmes contenus dans une enveloppe d’acier inoxydable (ONDRAF, 2013)..... 63

Figure 3-5 – Extrait de l’arbre des « safety statements » (ONDRAF, 2009b). (I) désigne la fonction « Isolation » ; (C) désigne la fonction « containment » et (R) la fonction « retardation », elle-même divisée en R1 (dissolution de la matrice) ; R2 (transport diffusif) et R3 (phénomène de sorption)..... 81

Figure 4-1 – Schématisation d’un quart de galerie de stockage (ONDRAF, 2022a). 112

Figure 4-2 – Activité des principaux radionucléides d’un déchet vitrifié responsables de l’activité pendant la période d’évaluation d’un million d’années (ONDRAF, 2022a)..... 114

Figure 4-3 – Débit de dose résultant des produits de fission et d’activation d’un déchet vitrifié via le chemin du puits dans l’aquifère supérieur de surface pour un enfant (ONDRAF, 2022a). 114

Figure 4-4 – Tentative de taxonomie des scénarios sous-tendant l’évaluation de sûreté à long terme d’un stockage géologique. P désigne la probabilité attachée au scénario. RS est le symbole du scénario de référence (Reference scenario) alors que AS désigne un scénario altéré (Altered Scenario). « Disruptive event » désigne un élément perturbateur survenant à un moment donné de l’évolution du système et représenté par une ligne pointillée verticale (Présentation Depaus C. citée dans ONDRAF, 2010). 117

Figure 4-5 – Débit de dose (en mSv/an) typique d’un stockage géologique de combustible usé dans une argile peu indurée à 400 mètres de profondeur, pour deux cas de conservatisme variable. Dans le cas le plus conservatif, le confinement ouvragé (containment) est de 100 000 ans (cas de référence) et la durée de vie de la matrice de 300 000 ans. Dans le cas moins conservatif, le confinement ouvragé tient plus longtemps (+/- 500 000 ans) et la durée de vie du déchet est plus longue (i.e., pas de relâchement instantané). Dans les deux cas la courbe de dose reste en dessous de la contrainte de dose (0.1 mSv/a), elle-même située en dessous de la dose moyenne naturellement en Belgique (~ 2.4 mSv/a) (Capouet M., communication personnelle, 2021). 121

Figure 6-1 – Arbre de la sûreté de fonctionnement (Guillerm, 2011). 145

<i>Figure 6-2 – Relation faute-erreur-défaillance (Avizienis et al., 2001)</i>	<i>145</i>
<i>Figure 7-1 – Arbre de décisions dichotomique de Parfit, schématisant les trois résultats résultant des deux types de choix (d'après Parfit, 1984)</i>	<i>198</i>
<i>Figure 7-2 – Les liens entre l'optimisation radiologique et les principes de sûreté nucléaire sont représentés par les flèches pleines et, par les flèches en pointillés, sont représentés les liens existant entre les principes du point de vue de la sûreté de fonctionnement. Les cadres au fond bleuté désignent les principes de la protection radiologique. Les cadres au fond blanc représentent des principes de sûreté nucléaire ou des facteurs de la sûreté de fonctionnement. Les « – » séparent les appellations des principes de sûreté nucléaires de leurs équivalents en sûreté de fonctionnement des systèmes classiques. Les abréviations JP et DL désignent les principes radiologiques de justification des pratiques et de limites de doses respectivement. Leur rôle n'est ici représenté qu'en soutien au principe ALARA de la radioprotection.</i>	<i>246</i>
<i>Figure 8-1 – Représentation de la stratégie de sûreté soulignant l'importance du principe d'optimisation comme moteur de l'approche globale de la sûreté, selon l'AFCN (réunion du 22/03/2011), (AFCN, 2011e). Y et N désignent respectivement « yes » et « no » aux niveaux des boîtes interrogatives. SS désigne la Safety Strategy.</i>	<i>281</i>
<i>Figure 8-2 – Dans un repère cartésien portant les coûts en ordonnée et la dose collective en abscisse, le coût de la protection suit une courbe strictement décroissante. Le coût du préjudice (detriment) va croissant à mesure que la dose collective augmente. Le coût total de l'option est la somme de X et de Y représentant le coût associé aux mesures de protection auquel est ajouté le coût associé à l'exposition collective, en termes de man-sievert, c'est-à-dire le préjudice subi converti en valeur monétaire. La solution optimale est donnée par le minimum de la courbe enveloppe X + Y (ICRP, 2006).</i>	<i>299</i>
<i>Figure 8-3 – Illustration de la méthode coût-efficacité. Dans l'exemple ainsi donné, il apparaît clairement que l'option A permet d'atteindre un niveau d'exposition résiduel identique à l'option E mais pour un coût moindre. Similairement, l'option C permet d'atteindre un niveau de protection supérieure à l'option F pour le même coût (ICRP, 2006).</i>	<i>302</i>
<i>Figure 9-1 – Diagramme de Venn représentant l'ensemble A1 des argiles peu indurées comme sous-ensemble de A2, ensemble des pélites, lui-même inclus dans A, l'ensemble de toutes les roches hôtes potentielles. Illustration de $A1 \subseteq A2 \subseteq A$.</i>	<i>337</i>

Figure 10-1 – Aperçu des différentes étapes d'un processus de décision multicritères (Montignac et al., 2009). L'ensemble A décrit les alternatives en jeu et l'ensemble G, les critères d'évaluation. Pour chaque critère g_i , nous avons des éléments qui permettent de donner une valeur à chacune de ces alternatives. On note $g_i(a_j)$ l'évaluation de l'alternative a_j par rapport au critère g_i . Le tableau de performance regroupe les critères et les alternatives. Chaque cellule du tableau est occupée par les valeurs $g_i(a_j)$. Ces dernières ne doivent pas être considérées comme des valeurs précises, mais seulement comme des ordres de grandeur résultant du niveau de connaissance de l'étape du programme en question. Ces critères peuvent être quantitatifs ou qualitatifs. 446

Figure 10-2 – Proposition de classement des valeurs de conductivités hydrauliques par rapport à l'exigence de limitation de l'écoulement d'eau de la Nagra (Depaus, 2017a)..... 451

Figure 10-3 – Correspondance entre le jugement qualitatif et le score attribué au paramètre « conductivité hydraulique » (Depaus, 2017a) 451

Figure 10-4 – Diagramme représentant une façon d'établir une correspondance entre les valeurs réelles d'un paramètre (conductivité hydraulique) et le scoring quantitatif se référant à son caractère favorable par rapport à une propriété/un principe de sécurité (ici, le confinement). D'après le diagramme, une meilleure discrétisation est proposée du côté favorable, tandis que les faibles scores sont conservés pour les valeurs défavorables du paramètre (Depaus, 2017a) 452

Figure 10-5 – Illustration des scores obtenus pour chaque option A, B, C, D et E en fonction des piliers et principes de sûreté : isolation, confinement ; démontrabilité et robustesse. A désigne l'alternative « argile de Boom », B l'argile yprésienne, C les shales mésozoïques, D les shales paléozoïques et E les slates. Le graphique se rapporte aux données normalisées. Aucune pondération préférentielle n'a été attribuée aux principes/piliers de sûreté. 454

Figure 10-6 – Même illustration que la figure précédente avec barres d'erreur. Une légère différence peut être observée dans la hauteur des bâtonnets de l'histogramme. Celle-ci s'explique par le choix d'une valeur dite « best estimate », pour les différents paramètres, dans le premier graphique versus le choix d'une valeur moyenne $\pm$ incertitude, dans le présent graphique. La valeur moyenne ne correspond pas toujours exactement à la valeur best estimate. Par exemple, le score de la conductivité hydraulique a pu être estimée à 8 ± 1 ou à 9 (best estimate). .. 456

Figure 10-7 – Illustration des scores obtenus pour chaque option A, B, C, D et E en fonction des piliers et principes de sûreté : isolation, confinement ; démontrabilité et

robustesse. Les données sont normalisées. Une pondération préférentielle a été attribuée aux principes/piliers de sûreté de sorte que le confinement est deux fois plus important que la robustesse et quatre fois plus important que la démontrabilité et l'isolation, ces dernières étant d'égale importance..... 458

Figure 10-8 – Illustration des scores obtenus pour chaque option A, B, C, D et E en fonction des piliers et principes de sûreté : isolation, confinement ; démontrabilité et robustesse. Les données sont normalisées. Une pondération préférentielle a été affublée aux principes/piliers de sûreté de sorte que la démontrabilité est deux fois plus importante que le confinement et quatre fois plus importante que la robustesse et l'isolation, ces dernières étant d'égale importance..... 459

Figure 10-9 – Illustration des scores obtenus pour chaque option A, B, C, D et E en fonction des piliers et principes de sûreté : isolation, confinement ; démontrabilité et robustesse. Les données sont normalisées. Une pondération préférentielle a été affublée aux principes/piliers de sûreté de sorte que l'isolation est deux fois plus importante que la robustesse, quatre fois plus importante que le confinement et vingt fois plus importante que la démontrabilité. 460

Figure 10-10 – Représentation conceptuelle de l'espace des rationalités recouvrant les domaines de la sûreté et de la protection radiologique. TCR désigne la théorie du choix rationnel et TRO la théorie de la rationalité ordinaire. P représente un postulat de la théorie de la rationalité, numéroté de 1 à 6. L'addition des P augmente le degré de formalisation et le passage d'une théorie de la rationalité à l'autre (voir texte). L'abscisse est sans graduation. 484

Figure 10-11 – Ce schéma, issu de la Déclaration stratégique de l'ONDRAF (ONDRAF, 2020d), illustre la manière dont les domaines science & technique, économie & finances, environnement & sûreté et éthique & société contribueraient au développement d'une solution à la fois sûre, faisable, équitable et acceptable, en un mot durable. 501

Figure 10-12 – Schéma représentant les filiations des principes de sûreté au principe général d'optimisation de la protection radiologique, en vert olive (la dépendance étant exprimée par les flèches pleines), ainsi que les liens entre les principes de sûreté (exprimés par les flèches en pointillés). En haut, le pilier éthique utilitariste, correspondant à un axe passant par le principe ALARA et le principe d'optimisation de la sûreté, et reposant sur la valeur de prudence, en bas, prodiguée par les principes BAT(NEEC), robustesse et défense en profondeur. Les traits non fléchés représentent une « charpente éthique » s'arc-boutant sur la théorie utilitariste et la valeur de prudence (en bleu). 514

Liste des tableaux

<i>Tableau 2-1 – Les différentes catégories de déchets radioactifs et leur destination finale de référence selon le consensus international [IAEA, 2009a] cité dans (ONDRAF, 2015).</i>	47
<i>Tableau 10-1 – Comparaison schématique des différents acteurs dans le domaine des déchets nucléaires vis-à-vis de la problématique d’optimisation de la roche hôte.</i>	409
<i>Tableau 10-2 – Extrait du découpage de la guidance SR 3 de l’AFCN selon les grands principes de sûreté (robustesse, démontrabilité, défense en profondeur) et les piliers de l’approche générale de sûreté (isolation et confinement). Les relations entre recommandations et catégories n’étant pas univoques, les intitulés entre parenthèses, décrivent les catégories d’ordre secondaire par rapport aux recommandations. Certaines recommandations sont redondantes car elles ont une égale pertinence dans plusieurs catégories. Les dispositions de la guidance sont parfois reformulées par souci de concision. Tableau adapté de nos précédents travaux (ONDRAF, 2017b).</i>	422
<i>Tableau 10-3 – Exemples de paramètres physico-chimiques répondant à la définition de l’attribut de sûreté par rapport au pilier « confinement ». Les valeurs-limites sont issues de la littérature ou de programmes nationaux analogues et donnent des valeurs recommandées ou des limites d’exclusion. Tableau adapté de nos précédents travaux (ONDRAF, 2017b).</i>	423
<i>Tableau 10-4 – Propriétés et valeurs-limites des critères de sélection liés à la roche, à la formation et à l’environnement de la formation (EC, 1979a). On peut remarquer que beaucoup de valeurs-limites sont données de façon qualitative : élevée, faible, etc.</i>	428
<i>Tableau 10-5 – Critères d’exclusion disqualifiant un site pour l’implantation d’un stockage géologique (US, 2015). Les cellules en rouge indiquent qu’un site présentant cette condition doit être exclu de la liste des sites potentiels.</i>	430

Tableau 10-6 – Ce tableau porte en abscisse la classification des critères de sélection proposée par l'étude européenne, à savoir la roche, la formation et l'environnement (voir section 10.4.3.1) et en ordonnée la classification que nous avons retenue pour la guidance SR 3 afin de regrouper les dispositions réglementaires selon les principes de sûreté. Deux types de dépendance apparaissent : 1) Dépendance des critères au sein d'un système (les critères relatifs à la formation découlent au moins partiellement des propriétés intrinsèques de la roche et de son environnement (dépendance intra-système) 2) Dépendance des critères entre deux systèmes, EC, 1979 et SR 3, 2010 (dépendance inter-systèmes). Ce tableau est issu de l'un de nos précédents travaux (ONDRAF, 2017b). 437

Tableau 10-7 – Synthèse des roches/formations retenues comme potentielles roches hôtes (en vert) et formations exclues (en rouge) sur la base des attributs de sûreté confrontés aux guidances internationales (ONDRAF, 2017b). 442

Tableau 10-8 – Extrait de l'analyse multicritères portant sur la comparaison des roches hôtes. A désigne l'alternative (option) « argile de Boom », B l'argile yprésienne, C les shales mésozoïques, D les shales paléozoïques et E les slates. Le « Confinement » est le premier pilier de sûreté sous lequel on peut lire « 1.1 Ecoulement d'eau limité », (sous-)catégorie, correspondant à une instruction issue de la guidance SR 3 de l'AFCN. Le pilier « Confinement » possède cinq sous-catégories (non représentées ici) dont seule la première « 1.1 Ecoulement d'eau limitée » est visible ici. De 1.1.1 à 1.1.9 sont répertoriés les paramètres pertinents pouvant avoir une incidence sur cet écoulement. Un sous-total est calculé afin de donner un score à l'ensemble des paramètres actifs pour une recommandation donnée. Le paramètre 1.1.8 (gradient hydraulique) est neutralisé car il est dépendant du site choisi. Un grand total (non représenté sur la figure) rassemble tous les paramètres utiles au confinement et ainsi de suite, pour tous les piliers et paramètres de sûreté. Les scores vont de 1 à 10. 10 décrit la situation jugée la plus favorable, correspondant à la performance de l'option (A, B, ...) en regard de l'attribut considéré, 1 décrit la situation la plus défavorable. 450

Tableau 10-9 – Enjeux éthiques liés à l'application du principe d'optimisation au choix de la roche hôte pour le stockage géologique (adaptation d'après Kermisch et Depaus, 2020). 523

Tableau 10-10 – Synopsis reprenant les caractéristiques principales et discriminantes de l'AFCN et l'ONDRAF dans les différents cadres de rationalités explorés : rationalité instrumentale (substantive et procédurale) et rationalité ordinaire. *Les opportunités de bien-être sont ici envisagées par rapport aux

<i>communautés locales et la société en général qui subiraient le tribut d'une prolongation de l'entreposage temporaire.</i>	<i>538</i>

Liste des encadrés

Encadré 1 – Exemples de contribution de différents éléments de structure aux fonctions de sûreté à long terme. Les phases IV et V concernent la période de sûreté à long terme tandis que les phases I à III, non représentées ici, se rapportent à la phase opérationnelle. La phase IV correspond à la période de contrôle institutionnel après fermeture de l'installation et la période V à la période dite de « post-fermeture » ou de sûreté passive. Le découpage Va et Vb n'est pertinent que pour les déchets C, chauffants, le Va désignant la période post-fermeture correspondant à la phase thermique. La lettre M (main) désigne le rôle principal du composant à l'égard de la fonction de sûreté renseignée (I, C, R1, R2, R3) tandis que la lettre S (support) désigne un rôle de soutien. Les contributions M doivent être démontrées quantitativement alors que les contributions S peuvent reposer sur une description semi-quantitative. La redondance s'assortit de la diversité. Par exemple, durant la phase IV, la fonction de sûreté R2 (i.e. transport diffusif) est assurée par le scellement de la galerie d'accès (AG, Acces gallery), par le scellement du puits ainsi que par la roche hôte, tous trois contribuant à titre principal à R2. Au cours de cette même période, la fonction de sûreté C des déchets C est principalement assurée par le suremballage en acier au carbone (overpack) aidé des composants qui l'entourent comme le buffer cimentaire, l'enveloppe en acier inoxydable et le remblayage cimentaire de la galerie de stockage. En effet, c'est la durée de vie de l'overpack qui assure la fonction C mais cette vie est particulièrement longue parce que l'overpack fait l'objet d'une corrosion uniforme avec un acier en état passivé. Cet état est permis grâce au pH élevé que lui assure l'environnement cimentaire (buffer). Quant à la corrosion par piqûres, c'est l'enveloppe en acier inoxydable qui l'en préserve. On voit ainsi comment certains composants en aident d'autres à accomplir leur fonction. DG pour « disposal gallery » désigne la galerie de stockage où les déchets sont enfouis. Le « plug » (bouchon en anglais) désigne le dispositif d'obturation d'une galerie de stockage sans retrait préalable de son revêtement. A l'inverse, le « seal » (scellement en anglais) et plus particulièrement, l'action de le poser (sealing) désigne l'obturation de la galerie (d'accès) après retrait du revêtement de celle-ci. Le seal, réalisé en bentonite, établit des conditions hydrauliques similaires à celles de la roche hôte et veille donc à assurer une

homogénéité de propriétés, contrairement au simple « plug ». Le « backfill » (et l'action relative à son emplacement, le « backfilling ») désigne le remblayage de la galerie qui, dans le concept belge actuel, est réalisé en matériau cimentaire (tableau adapté de ONDRAF, 2020f). 64

Encadré 2 – « Les définitions formelles du risque, de la perplexité, de l'ambiguïté et de l'ignorance » Tableau extrait de (Stirling, 2000, p. 80)..... 328

Avertissement

La présente recherche a été menée sur l'initiative personnelle de son auteur, en dehors de ses heures de travail à l'ONDRAF et sur fonds propres. Si la direction générale de l'ONDRAF a été informée de la démarche de recherche et l'a autorisée, elle n'a pas financé celle-ci et ne peut, en aucun cas, être tenue pour responsable des propos tenus dans ce manuscrit et des opinions qui y sont développées.

En outre, l'auteur de cette thèse inscrit son travail dans une démarche universitaire non militante. La réflexion conduite et rapportée au fil de ces pages est une analyse critique de théories et d'arguments en présence dans le domaine de la gestion des déchets radioactifs. Il n'y a pas de prise de position personnelle, que ce soit vis-à-vis de l'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins civiles de production d'électricité ou des enjeux éthiques posés par la gestion à long terme des déchets radioactifs, en particulier l'enfouissement géologique.

Le processus de recherche et d'écriture de la présente thèse s'est déroulé de juin 2017 à août 2022. Les informations contextuelles, relatives à l'actualité belge, telles que l'adoption d'une politique nationale relative à la gestion à long terme des déchets radioactifs, qui ont été rapportées dans la présente recherche, décrivent la situation belge jusqu'au 1^{er} mars 2022.

A cette date, il n'y avait pas encore de politique nationale relative à la gestion à long terme pour les déchets faiblement et moyennement radioactifs à vie longue et les déchets hautement radioactifs. Au 1^{er} avril 2022, le gouvernement a cependant pris une décision autour de la possibilité de considérer le stockage géologique comme préconcept de gestion à condition de le faire entériner par un débat sociétal. De la même manière, l'arrêt complet de toutes les centrales nucléaires commerciales en Belgique était, encore au 1^{er} mars 2022, prévu pour l'année 2025. Entretemps, notamment

en raison de la guerre en Ukraine, le gouvernement a décidé de prolonger deux réacteurs.

Je n'ai cependant pas voulu mettre à jour le contenu de la thèse à la lumière de ces récentes informations. Il y a deux raisons à cela :

- La première réside dans le fait que ces informations n'ont aucun impact sur le contenu de cette thèse. Je pense que la réflexion conduite dans ces pages ne perd nullement de sa pertinence à la lumière de ces dernières évolutions.
- La seconde raison réside dans l'existence de grandes incertitudes entourant ces décisions gouvernementales récentes. En effet, le prolongement des deux réacteurs fait encore l'objet d'âpres négociations entre l'exploitant et l'Etat belge. Quant à la politique nationale sur le préconcept de stockage, elle doit encore être soumise au Conseil d'Etat pour examen légistique et il n'est pas certain que, même validée par cette instance suprême, elle suffise à mettre un terme à la procédure d'infraction européenne à l'encontre de la Belgique. Il est fort probable que la robustesse ou, à l'inverse, l'indigence de cette politique nationale ne sera révélée qu'après remise des conclusions de l'examen par les pairs, dans le cadre de la mission ARTEMIS⁶, prévu en Belgique, en décembre 2023.

Pour ces raisons, il m'a semblé plus commode mais aussi plus sûr de prendre la date du 1^{er} mars 2022 comme date de référence de ce manuscrit, en ce qui concerne les informations contextuelles et d'actualité.

Lorsque le texte fait référence plus précisément à un moment de l'actualité situé dans l'intervalle de temps qui a été nécessaire à l'écriture de cette thèse, une note de bas de page en fait explicitement mention (e.g. « en 2021 »).

⁶ Il s'agit du « Service d'examen intégré portant sur la gestion des déchets radioactifs et du combustible usé, le déclassé et la remédiation » (ARTEMIS) de l'AIEA (Agence Internationale de l'Energie Atomique) notamment utilisé par les pays européens pour répondre à l'article 14 §3 de la directive européenne 2011/70/Euratom (EC, 2011).

Conventions d'écriture

Ce travail adopte plusieurs conventions d'écriture qui sont détaillées ci-dessous :

- A l'exception de son « Avertissement », des « Remerciements » et des présentes « Conventions d'écriture », la thèse est rédigée en faisant usage d'un *nous* de modestie tout en renonçant à l'accord sylleptique au singulier des participes passés qui m'a paru artificiel et quelquefois malaisé lorsque *nous* est également employé en référence à un collectif d'auteurs. J'ai donc préféré accorder le pluriel grammaticalement et confier au lecteur le soin de procéder à l'éventuelle distinction d'après le sens.
- Il est souvent fait référence aux institutions internationales telles que : l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA), l'Agence pour l'Energie Nucléaire (AEN) ou encore la Commission Internationale pour la Protection Radiologique (CIPR). Si les abréviations en français sont utilisées dans le corps du texte lorsque le point de vue de ces institutions est mobilisé dans la réflexion et ce, en cohérence avec la langue de rédaction du présent travail, les citations de même que les références bibliographiques sont, quant à elles, systématiquement en anglais. Dès lors, ce sont les acronymes anglais IAEA (*International Atomic Energy Agency*), NEA (*Nuclear Energy Agency*) et ICRP (*International Commission for Radiological Protection*) qui sont utilisés pour les repères bibliographiques pour désigner AIEA, AEN et CIPR respectivement. La raison principale de ce choix réside dans le fait que l'écrasante majorité des textes rédigés par ces organisations le sont en anglais et il m'a donc semblé légitime, dès lors que je n'ai pas fait le choix de les traduire, de les référencer intégralement en anglais.

- J'ai cependant fait une petite exception concernant les instruments de droit international pris sous l'égide de l'AIEA. A la différence des standards de sûreté et autres guides disponibles uniquement en anglais, et dont les citations dans ce travail ont été faites selon la convention que je viens d'exposer, les Conventions et Traités internationaux sont généralement disponibles en plusieurs langues dont le français. Aussi, afin d'éviter toute erreur de traduction, je m'en suis remis aux traductions officielles (e.g. citations de la Convention commune (IAEA, 1997) au chapitre 2).
- Pour ce qui concerne les institutions de l'Union européenne, qu'il s'agisse de la Commission européenne ou anciennement de la Commission des Communautés européennes ou tout autre organe décisionnel comme le Conseil par exemple, j'ai pris le parti de les désigner, dans les appels à référence situés dans le corps du texte, par l'acronyme « EC » (*European Commission*) laissant le soin à la liste des références, en fin de thèse, de préciser *in extenso* de quelle institution il s'agit.

Introduction générale

Prolégomènes

L'idée originale de cette thèse portée par le titre initial « *Analyse critique des fondements épistémologiques d'un dossier de sûreté (safety case) pour la gestion à long terme des déchets hautement radioactifs et/ou à vie longue* », était de plonger au cœur du dossier de sûreté nécessaire à la construction d'un stockage géologique de déchets hautement radioactifs⁷ ou à vie longue⁸ afin d'en révéler toutes les composantes interprétatives et s'interroger, dans une démarche proprement épistémologique, sur la définition même de la sûreté nucléaire dans ce domaine.

Cependant, l'entreprise aurait été trop vaste pour servir le réel *impetus* de la présente recherche, né d'une dizaine d'années d'interactions fondées sur l'échange d'arguments scientifiques entre les acteurs institutionnels de première ligne – à savoir d'une part, l'ONDRAF⁹, le gestionnaire des déchets radioactifs et d'autre part, l'AFCN¹⁰, l'agence de contrôle de la sûreté nucléaire aussi appelée autorité de réglementation compétente ou encore « le régulateur » – à l'issue desquels une divergence d'opinions, aussi inattendue que tenace, demeure. Cette divergence porte sur le *principe d'optimisation radiologique* (voir chapitre 7) et la démarche *d'optimisation*

⁷ Dont le débit de dose de contact est supérieur à 2 Sv/heure.

⁸ Dont la demi-vie moyenne des radionucléides présents dans le déchet est supérieure à 30 ans.

⁹ Organisme National des Déchets Radioactifs et des matières Fissiles enrichies (ONDRAF) – *Nationale Instelling voor Radioactief Afval en verrijkte Splijstoffen (NIRAS)*.

¹⁰ Agence Fédérale de Contrôle Nucléaire (AFCN) – *Federaal Agentschap voor Nucleair Control (FANC)*.

de la sûreté (voir chapitre 8). De toute évidence, le bât blesse en dehors du champ de la science et nous nourrissons une intuition forte selon laquelle une explication de cette différence ne peut être avancée uniquement à l'issue d'une analyse socio-politique des rôles respectifs de ces institutions mais pourrait plutôt être trouvée grâce à l'étude de la *rationalité* des protagonistes (voir chapitre 9).

Cette thèse s'intéresse donc au dialogue entre deux communautés scientifiques qui ont des postures intellectuelles distinctes et que les travaux académiques menés jusqu'ici ont pourtant eu généralement tendance à fusionner. Il est en effet difficile, lorsque l'étude est menée par un institut de recherche ou une université, nécessairement extérieurs au milieu de la gestion des déchets nucléaires, de comprendre la nature des désaccords éventuels entre les experts de l'AFCN et de l'ONDRAF ni même d'en soupçonner l'existence. En effet, à notre connaissance, la plupart des travaux en sociologie et en éthique, relatifs aux questions de la gestion des déchets nucléaires, agrègent volontiers les experts en vue de les opposer à la société civile. Si une distinction est néanmoins opérée entre les experts, c'est sur la base d'un critère d'indépendance. Souvent, d'après celui-ci, les experts des institutions publiques sont rangés parmi les défenseurs plus ou moins zélés de la cause nucléaire, à la solde des producteurs d'énergie, et les autres experts, qu'ils soient académiques ou choisis sur une base *ad hoc* par des institutions non gouvernementales ou par le milieu associatif, seraient nécessairement – dit-on – plus favorables à l'intérêt citoyen¹¹ (Barbey *et al.*,

¹¹ Au cours des journées de la Société française de radioprotection en 2013, un intéressant débat est né entre les défenseurs de l'association ACRO (i.e., Association pour le contrôle de la radioactivité dans l'ouest) (Barbey *et al.*, 2013) et Luc Foulquier, ingénieur et chercheur en écologie. Le chercheur a interrogé la transparence de ce milieu associatif qui inspire pourtant davantage la confiance des citoyens que les pouvoirs publics, alors qu'il n'est pas soumis aux mêmes règles que les instituts de recherche, en matière d'études revues par des pairs (*peer review*) et de règles de déontologie. Sans renier l'utilité de cette vigilance citoyenne, Luc Foulquier dénonçait la dérive d'une recherche sous-traitée au milieu associatif qui ne bénéficie pourtant pas de la rigueur des instituts ayant pignon sur rue. Tout semble être une question de positionnement social plus que de compétences avérées. Ainsi le milieu académique bénéficie d'une neutralité qui lui confère d'office un parti pris à l'avantage des citoyens là où les pouvoirs publics, animés pourtant par des fonctionnaires assermentés ou des experts recrutés sur une base contractuelle qui se veut garante de leur indépendance intellectuelle, seraient à la solde d'un intérêt financier caché de l'Etat. Le financement des associations est pourtant lui aussi, poursuit Foulquier, une source de questionnement...

2013). A vrai dire, cette question de l'indépendance nous intéresse peu et nous souhaitons nous en distancier car ce que nous proposons d'analyser, c'est le travail des experts des institutions publiques, l'ONDRAF et l'AFCN, qui, en occupant les premières loges, sont plongées depuis des décennies au cœur de la recherche sur la gestion des déchets radioactifs. Nous avons tenté de comprendre pourquoi des désaccords peuvent survenir, de façon structurelle, entre ces acteurs alors qu'ils partagent la même base de science et de savoir et, plus encore, des missions publiques similaires... (voir chapitres 6 à 9).

Cette différence de postures est le reflet, tout autant que la mesure, des enjeux épistémologiques autour de la question des déchets radioactifs et de leur gestion. Tels des ronds dans l'eau qui se propagent et atteignent différentes échelles d'observation, ces enjeux se commuent en défis socio-éthiques touchant toutes les composantes de notre société. A leur tour, ces défis viennent influencer la posture des institutions publiques. Mais c'est bien au cœur de celles-ci que naît le débat, avant même que tout autre acteur de la société n'ait pu en esquisser l'analyse. La plus-value d'une investigation menée depuis l'intérieur du milieu de la gestion des déchets radioactifs réside dans la faculté de pouvoir s'abstraire de la simplification qui entrevoit les experts en tant qu'entité unique à distinguer d'une, voire à opposer à, une société civile plutôt sceptique. Au contraire, cette perspective permet une mise en lumière inédite puisqu'elle se place au cœur de la construction de *l'argumentaire de sûreté* qui visera ultimement à *convaincre* les autorités compétentes et l'opinion publique du bien-fondé des installations d'enfouissement de déchets radioactifs (voir chapitre 4).

Attardons-nous un instant sur la question plus générale de l'enfouissement afin de donner un peu de contexte à notre question de recherche. Nous pensons que l'enfouissement géologique peut être vu comme une expression d'humilité dans le choix d'une solution technique de gestion à long terme : puisque la temporalité des œuvres humaines est à cet égard dérisoire, quelle autre échelle de temps que celle de la géologie rivalise avec la durée de la décroissance radioactive des radionucléides à vie longue (voir chapitre 3) ? Au fond, c'est comme s'il s'agissait de ramener la nature à elle-même ou presque, puisque les radionucléides ont été concentrés aux niveaux rencontrés dans les déchets, par l'œuvre de l'homme. Dans cette

perspective, notre rôle serait celui d'accompagner, voire d'organiser la rencontre entre le déchet, issu de l'activité humaine, et la roche choisie comme hôte de celui-ci. Mais une telle rencontre se prépare longtemps et ne manque pas de poser des défis. Si d'aventure, l'ensemble des effets pouvant résulter de cette rencontre ne pouvait être totalement évalué dans tous les détails, il faudrait que les précautions prises dans l'évaluation de sûreté et de faisabilité soient telles qu'elles englobent les incertitudes résiduelles – méconnues en nature mais quantifiables – au point de s'en affranchir. Mais, s'agit-il encore de science ? Cette évaluation prépare, en réalité, un projet d'ingénierie et fournit la base à une expertise débordant nécessairement de l'abstraction pure pour répondre à une question concrète. Si, en dépit de cette prudence, certains phénomènes pressentis mais peu modélisables ne sont pas couverts lors la prise en compte des incertitudes résiduelles, il s'agit alors d'en garantir l'exclusion. L'exclusion du phénomène lui-même ou de ses effets n'est plus tant l'œuvre de la science aux prises avec l'étendue et les limites de son savoir que celle de l'ingénierie qui tente d'agir sur le réel. Exclure l'occurrence d'un phénomène ou de ses effets, car celui-ci ne peut être suffisamment connu pour être adéquatement pallié, revient à travailler sur les conditions de son apparition. Créer un environnement qui exclut la réunion des conditions nécessaires à l'occurrence d'un processus est, en ingénierie, ce qu'on appelle une « *design-out solution* », c'est-à-dire une solution obtenue par construction, une option pour laquelle la conception du système élimine toute éventualité de survenance dudit processus¹². C'est ainsi que la synergie entre l'homme et la nature pourrait s'opérer. Les barrières naturelles isolant le déchet de la biosphère sont complétées par les barrières ouvragées, plus éphémères car dimensionnées à l'échelle humaine, mais néanmoins suffisantes pour « soutenir » les composants naturels dans les phases d'évolution les plus critiques du stockage (voir chapitre 3).

¹² Dans le concept belge, la solution de « *design-out* » est le confinement absolu du déchet pendant la période de phase thermique des déchets chauffants afin de ne pas devoir modéliser la migration des radionucléides en milieu poreux sous gradient thermique (voir section 3.1).

Est-ce suffisant ? La science nous aide à décrire ce qui est découvert (*known knowns*¹³), elle grandit et progresse en s'attaquant à l'explication et la prédiction d'un réel identifié mais non encore élucidé (*known unknowns*). L'ingénierie peut la compléter, comme dans l'exemple des barrières ouvragées, en tentant d'éviter l'occurrence de ce qui ne pourrait être (encore) maîtrisé (*unknown knowns*). Il reste évidemment, quelle que soit la solution de gestion envisagée, le défi de la complétude qui agit comme un horizon, les *unknown unknowns* (IAEA, 2015), constituant l'espace d'un possible réel non encore pensé (voir section 6.3). L'évaluation de sûreté et de faisabilité devra donc montrer, ni plus ni moins, que la maîtrise relative des frontières connues de notre ignorance n'est pas un oxymore.

Outre la complexité inhérente à la question que pose la possibilité d'enfouir les déchets hautement radioactifs en couches géologiques plus ou moins profondes, c'est le côté urgent et concret de cette question qui en font un débat de société. Alors que la science développe sa rigueur dans l'abstraction, la solution de gestion à long terme des déchets radioactifs est concrète et requiert une prise de décision ici et maintenant. Nous pensons, avec Philippe Roqueplo, que les scientifiques sont ici sollicités au-delà de leur savoir et que c'est dans le champ de l'expertise publique qui se réfère davantage au modèle judiciaire de la plaidoirie que se développent leurs querelles, précisément dans l'intervalle qui sépare la conviction d'un savoir objectif méthodiquement fondé (Roqueplo, 1997, pp 48-52). Sur la scène de l'expertise publique, les reliefs des connaissances apparaissent mais aussi ceux des incertitudes associées et des ignorances dûment attestées par les experts eux-mêmes. Un espace dialectique articulant connaissances et ignorances s'instaure et, avec lui, les options politiques envisageables. Cet interface science-politique est l'espace public de l'expertise afin de fournir au décideur la connaissance de cause qu'il réclame (Roqueplo, 1997).

Si nous aurons l'occasion de revenir sur certaines de ces considérations dans la suite du texte (voir section 3.3), signalons déjà que, prolongeant la réflexion de Philippe Roqueplo, nous considérons le projet même du stockage géologique de déchets radioactifs comme un objet dialectique,

¹³ Nous reprenons (et adaptons) la taxonomie de Rumsfeld sur laquelle nous reviendrons au chapitre 6.

cette fois dans un sens quelque peu différent, en tant qu'il est un objet conditionné par des conditions théoriques et des conditions pratiques, ces dernières pouvant en modifier la nature et les limites ainsi qu'en restreindre l'ambition. Ce conflit de la raison – engendré par le rapprochement de fins également légitimes mais éventuellement antinomiques entre la science et la morale –, mis en évidence par Sylvain Lavelle (Lavelle, 2007), a pour scène le dossier de sûreté (*safety case*) dont la nature polymorphe prend fait et cause pour le projet qu'il soutient. Le *safety case* est tout autant que le projet d'enfouissement un objet dialectique (voir chapitre 4).

C'est dans ce contexte qu'une « frontière » pourrait s'envisager entre l'opérateur du stockage géologique, l'ONDRAF, et l'autorité de sûreté qui en délivrera l'autorisation de construction, d'exploitation et de fermeture, l'AFCN. Cette frontière n'est pas uniquement scientifique, ces deux institutions publiques disposant chacune de leurs corpus d'experts formés par les mêmes universités et collaborant ou ayant collaboré, en tant que « hommes et femmes de science » désengagés de tout système de gouvernance, dans des projets internationaux ou pour des institutions scientifiques¹⁴. Elle ne peut pas être non plus qu'institutionnelle malgré leur différence de rôles et de rapport à la prise de décision, nous y reviendrons (voir section 10.2.6). Nous pensons, au contraire, que la frontière prend racine dans les présupposés du *safety case* et qu'elle coupe l'interface de l'expertise en deux camps distincts, selon que la recherche de la sûreté soit le siège d'une rationalité supposée parfaite (voir chapitre 9), voire un lieu de vérité (AFCN), ou plutôt une contrainte de dimensionnement dans la recherche d'une solution satisfaisante (ONDRAF); que la sûreté soit un idéal à atteindre et dont l'horizon doit sans cesse être repoussé afin de répondre à un impératif de prudence (AFCN), ou plutôt une contrainte forte mais pragmatique d'un projet destiné à voir le jour dans un délai raisonnable, au

¹⁴ Le SCK CEN est l'exemple emblématique de ces institutions et véritable vivier de scientifiques et d'ingénieurs ayant alimenté de façon plus ou moins égale l'ONDRAF et l'AFCN de ses anciens experts...

vu de tous les enjeux éthiques qui lui sont associés (ONDRAF)¹⁵ (voir chapitre 10).

Dans cette partie introductive de la thèse, nous détaillons la question de recherche et la méthodologie que nous avons suivies (voir chapitre 1), nous rappelons quelques notions fondamentales liées à la radioactivité et la protection radiologique nécessaires à la bonne compréhension de notre réflexion (voir chapitre 2), nous expliquons les principes fondamentaux du fonctionnement et de la sûreté d'un stockage géologique de déchets radioactifs (voir chapitre 3) avant d'expliquer en quoi consiste une analyse de sûreté dans un dossier de sûreté (voir chapitre 4). Enfin, cette introduction générale se conclut avec le plan de la thèse, c'est-à-dire la structure en deux parties de notre question de recherche (voir chapitre 5).

¹⁵ Pour les besoins de cette introduction, nous accentuons des positions que nous nous emploierons à vérifier tout au long de cet essai en sachant d'ores et déjà qu'elles relèvent à ce stade, de la caricature puisque l'ONDRAF, en tant qu'institution publique, avant tout, gestionnaire des déchets (avant d'être opérateur d'installations), est également garante de la sûreté. L'ONDRAF constitue, pour les critères d'acceptation des déchets par exemple, une autorité de réglementation compétente au même titre que ne le serait l'AFCN pour d'autres domaines de la gestion nucléaire. Précisons d'emblée que dans la perspective qui nous intéresse ici, l'ONDRAF sera avant tout présentée comme futur opérateur d'une installation de stockage géologique de déchets et l'AFCN comme l'autorité de sûreté qui décidera (ou non) d'en délivrer l'autorisation de construction et d'exploitation. Cette perspective permet de se débarrasser d'une ambiguïté de statuts inutile au propos de cette recherche.

Chapitre 1 Question de recherche et considérations méthodologiques

1.1 La question de recherche

Lorsqu'il s'agit de la gestion à long terme des déchets moyennement et hautement radioactifs et/ou à vie longue, les deux institutions publiques AFCN et ONDRAF divergent quant à la mise en œuvre de la solution définitive même si elles s'entendent sur le principe de l'enfouissement géologique (AFCN, 2011a ; AFCN, 2020). Notre expérience professionnelle de plus de dix ans dans le suivi des interactions entre les deux institutions nous invite à penser cette différence de vue au-delà de la simple controverse scientifique. L'une des raisons identifiées en première analyse est qu'au cœur du débat dont le dossier de sûreté se fait le rapporteur se dévoilent des concepts fuyants dont la sûreté elle-même constitue le principal exemple. Elle n'est pas univoquement définie, en dépit de l'existence d'un lexique que l'on croit commun, et repose sur des présupposés que nous proposons d'analyser.

Parmi les sources de dissension observées lors des réunions d'interactions entre l'AFCN et l'ONDRAF, nous avons retenu celle qui nous a semblé la plus emblématique, mais aussi, peut-être, la plus coriace, en ce sens qu'elle a longtemps résisté à la possibilité d'une convergence de vues. Lorsque celle-ci fut enfin atteinte officiellement (AFCN, 2013b), elle ne l'a été qu'à un niveau assez général. Il s'agit du principe d'optimisation (radiologique). Aux prises avec la demande de l'AFCN d'*appliquer* le principe d'optimisation au choix même de la roche hôte pour un stockage géologique de déchets hautement radioactifs et/ou à vie longue, l'ONDRAF se débat tant avec l'idée

qu'il juge hors de propos qu'avec sa mise en œuvre pour laquelle il n'escompte pas de résultats probants. C'est ce terrain qui fournit le matériau de réflexion de cette thèse.

Le principe d'optimisation qui est, à l'origine, un principe de protection radiologique semble avoir été étendu à la sûreté sans que ce passage n'ait été clairement justifié par la doctrine de sûreté internationale constituée par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA), l'Agence pour l'Energie Nucléaire (AEN) ou encore la Commission Internationale pour la Protection Radiologique (CIPR). En outre, son application au choix de la roche hôte est originale puisqu'un tel emploi du principe d'optimisation n'est pas partagé par l'ensemble des programmes de recherche à l'échelle internationale. Si d'autres pays procèdent également à une analyse comparative de roches hôtes, pour peu que leur sous-sol leur permette le luxe d'une telle comparaison, celle-ci est rarement menée sous le couvert du principe d'optimisation.

Il nous a dès lors paru possible que les recommandations de l'AIEA, la CIPR et l'AEN permettaient une exégèse du principe d'optimisation en ne délimitant pas rigoureusement ni la nature ni la portée de celui-ci lorsqu'il s'applique au domaine des stockages de déchets. En raison des temporalités extrêmement longues attachées aux stockages (i.e. des centaines de milliers d'années à plusieurs millions d'années ; voir chapitre 3), le concept-clé sur lequel opère le principe d'optimisation radiologique, à savoir la dose, qu'il cherche à réduire autant qu'il est raisonnablement possible de le faire (i.e. principe ALARA ; voir chapitre 3), devient caduque (NEA, 2004a ; NEA, 2012e ; IAEA, 2012 ; ICRP, 2007 ; ICRP, 2013). Le principe d'optimisation a donc dû nécessairement être revisité au prix d'un possible flou conceptuel. C'est une première hypothèse que nous avons voulu vérifier, en nourrissant l'intuition que le principe d'optimisation radiologique, initialement restreint à un champ purement opérationnel et technique, s'était commué en principe de sûreté à la portée plus générale, jusqu'à devenir un méta-principe de construction de la stratégie de sûreté, voire un principe de gouvernance (voir chapitre 8).

Plus encore que la *possibilité* d'une divergence d'opinions puisant son origine dans un élargissement du principe d'optimisation non nécessairement justifié ou, à tout le moins, pas suffisamment, il nous a semblé qu'une

différence fondamentale de raisonnement dans le chef de l'ONDRAF et l'AFCN pouvait être à l'œuvre lorsqu'il s'agit d'appliquer le principe d'optimisation en tant que *mode de pensée*, comme le suggère la CIPR (ICRP, 2006). Notre question de recherche s'est donc précisée autour de **l'étude la rationalité de l'ONDRAF et de l'AFCN dans leurs missions institutionnelles respectives de gestion à long terme des déchets radioactifs**. Cette différence de rationalité rend *effective* la divergence d'opinions observée. Cette étude, portant principalement sur **l'application du principe d'optimisation**, nous mène nécessairement au cœur de la protection radiologique et de la sûreté (nucléaire) des stockages de déchets. Mais si cette question de recherche relève initialement de l'épistémologie, elle ne peut certainement pas, avec un sujet aussi socialement et politiquement controversé que le stockage définitif de déchets radioactifs, s'y limiter. L'éthique est omniprésente, à la fois dans la pensée fondatrice de la protection radiologique et ses principes, dont l'optimisation ne constitue que l'un d'entre eux, mais aussi dans la pensée de la sûreté des stockages, nécessairement tournée vers la protection des générations futures, en raison de la temporalité inédite qui y est mobilisée. C'est aussi cette éthique qui, selon nous, peut nourrir la rationalité, du moins lorsque nous dépassons son cadre d'application purement instrumental. Impossible dès lors de séparer l'éthique de l'épistémologie, l'une se nourrissant de l'autre et inversement. Le traitement de notre question de recherche suit donc la trame d'une **analyse épistémologique** mais puise dans **l'éthique** toute source possible de justification.

1.2 Considérations méthodologiques

Rappelons que la présente recherche a été menée sur l'initiative personnelle de son auteur, *senior expert* à l'ONDRAF, en dehors de ses heures de travail et sur fonds propres. Si la direction générale de l'ONDRAF a été informée de la démarche de recherche et l'a autorisée, elle ne l'a pas commanditée et ne peut nullement être tenue pour responsable des opinions et propos développés dans le présent manuscrit. Cette thèse résulte donc du souhait d'un ingénieur, travaillant dans la gestion à long terme des déchets radioactifs, d'interroger sa propre pratique et son domaine d'activités dans une démarche philosophique et critique.

Quelle que soit cette distance critique, le fait de travailler dans l'une des deux institutions qui ont retenu notre attention¹⁶ – ONDRAF ou AFCN – dont les interactions sont ici étudiées rend vaine toute revendication d'une totale *indépendance* de vues. Notre recherche est nécessairement entachée de subjectivité et, sans nous y complaire pour autant, nous en assumons le biais d'analyse qu'elle confère. Nous pensons d'ailleurs que ce n'est qu'à ce prix, qu'il est possible de pénétrer la dialectique des échanges de cette première ligne d'acteurs. Toutefois, même si notre regard critique est nécessairement porté depuis l'ONDRAF, nous l'avons voulu le plus réflexif possible et l'opposition des deux institutions à l'égard de la question de l'optimisation du choix de la roche hôte ne donne pas lieu, à l'issue de notre réflexion, à la supériorité d'un point de vue sur l'autre. Nous nous sommes attachés à la mise en évidence des *différences de rationalités* en tentant de leur donner toute la dignité qu'elles méritent par le choix de cadrages théoriques appropriés. Nous pensons qu'une possible conciliation de vues ne passera que par la prise de conscience de cette différence. Puisse cette modeste réflexion y contribuer.

La question de recherche naît d'un constat établi lors des réunions d'interaction¹⁷ préparatoires au dossier de sûreté entre l'ONDRAF et l'AFCN. Les résultats des échanges collectés lors de ces réunions constituent les données expérimentales de notre thèse. Ces données ont été utilisées afin de constituer une étude de cas. L'étude de cas a donc eu un double objectif : elle a inspiré la réflexion (*démarche prospective*) puis elle a servi à confirmer et affiner l'intuition qu'elle avait suscitée (*test d'hypothèse*). Même si l'étude de cas guide, en filigrane, le développement théorique de la question de recherche, elle n'est détaillée qu'une fois celui-ci quasiment achevé, ce qui

¹⁶ D'autres acteurs institutionnels tels le ministère de l'Energie ou la société Synatom (responsable de la gestion du combustible) ne sont pas considérés dans cette recherche.

¹⁷ Ces réunions portent sur la discussion des instruments stratégiques et méthodologiques relatifs au développement du projet d'enfouissement géologique des déchets hautement radioactifs et/à vie longue au cours d'une phase dite de « *prelicensing* », c'est-à-dire au cours du processus précédant la demande officielle d'autorisation de construction (i.e., *pre* : avant et *licensing* : délivrance d'un permis). Les réunions d'interaction sont donc des échanges scientifiques, des analyses contradictoires de principes de sûreté ou de méthodologies mais aussi des discussions dont l'objectif sert à prévenir la survenue de désaccords majeurs au moment de l'introduction de la demande de permis de construction et d'exploitation (i.e., la « licence »).

structure la présente thèse en deux parties (introduction générale et conclusions exceptées) : les chapitres portant sur la sûreté, la protection radiologique, l'optimisation et la rationalité constituant la première partie (voir chapitres 6 à 9) et l'étude de cas, la deuxième partie (voir chapitre 10).

Toutefois, nous attirons l'attention sur le fait que l'étude de cas ne se limite pas à l'illustration du contenu théorique et à la vérification de celui-ci. Elle rebat les cartes une fois le cadre d'analyse de Simon appliqué au choix de la roche hôte. En effet, c'est par le biais de l'étude de cas que la *théorie de la rationalité ordinaire* de Boudon est introduite comme cadre complétant celui prodigué par Simon. En invitant la dimension axiologique à la table des débats, la *théorie de la rationalité ordinaire* nous a incité à prendre un peu de recul, à « dézoomer », afin de revenir à la thématique de la sûreté mais cette fois en dépassant l'analyse théorique consignée au chapitre 6. L'examen de la *Déclaration nationale de sûreté* portée par l'AFCN et de la *Déclaration stratégique* de l'ONDRAF a ouvert la porte à une analyse éthique propre à ces institutions. Comme la perspective axiologique que nous avons cherché à investiguer est seulement esquissée par lesdits textes, nous avons parfois été contraints d'en déborder quelque peu, en recourant tantôt à certaines critiques en guise de contrepoint, tantôt en interrogeant la doctrine internationale qui leur a servi de source d'inspiration (voir section 10.6). Nous sommes conscients de cette faiblesse méthodologique mais elle nous a semblé inévitable dès lors que nous cherchions à interroger la part de *non-dit* laissée par les acteurs AFCN et ONDRAF dans les déclarations respectives de leurs rôles et missions. Nos déductions en cette matière doivent évidemment être prises sous toute réserve. L'étude de cas apporte donc du nouveau contenu, tant théorique que pratique, que nous avons laissé entremêlé¹⁸ afin de ne pas entraver la fluidité de la réflexion.

L'objet central de la question de recherche étant l'optimisation et en particulier le principe d'optimisation radiologique dont nous retraçons l'évolution, l'éthique utilitariste (ICRP, 2018, A10 ; Wikman-Svahn, 2008 ; Hansson, 2007) agit comme un filtre lorsqu'il s'agit d'appréhender les raisons

¹⁸ En d'autres termes, nous n'avons pas cherché à diviser le contenu du chapitre 10 en fonction de ses apports théoriques et pratiques. A la distinction *theoria/praxis*, nous avons préféré la fluidité d'un récit.

morales à l'œuvre dans le façonnement des préférences des acteurs institutionnels ONDRAF et AFCN. La *théorie de la rationalité ordinaire* de Boudon nous a permis de corriger ce biais en contournant l'habitus utilitariste attaché à l'objet d'étude (voir section 10.5.2).

Les documents ayant servi à l'élaboration de cette recherche et qui ne peuvent constituer une référence bibliographique facilement consultable **ont été annexés au présent manuscrit, dans un volume séparé**. Il s'agit notamment de versions de travail de documents internes à l'ONDRAF (i.e., versions *draft*). Ces documents ne sont pas classifiés au sens de la sécurité nucléaire et ne nécessitent donc pas d'habilitation de sécurité pour être consultés. Toutefois, afin d'éviter toute utilisation ultérieure en dehors du contexte de cette étude et par respect pour les contributeurs à ces versions de travail¹⁹, les annexes ne sont disponibles²⁰ qu'après demande expresse faite à l'auteur de cette thèse, par l'intermédiaire de la Faculté de philosophie de l'UCL. Les références versées dans les annexes et leurs appels correspondants dans le texte sont mentionnés avec un astérisque*.

¹⁹ En effet, les documents intermédiaires ne constituent qu'un instantané dans l'élaboration de leur objet et ils ne reflètent pas un avis officiel.

²⁰ Exception faite des membres du jury et des membres du comité d'accompagnement qui en reçoivent copie.

Chapitre 2 Radioactivité, protection radiologique et déchets radioactifs

Ce chapitre présente un bref rappel des notions fondamentales nécessaires à la compréhension du phénomène de la radioactivité et, en particulier, à celle liée aux déchets dits « radioactifs ». Le propos n'étant pas de se substituer à un manuel de physique, ce chapitre ne cherche qu'à introduire les concepts qui seront employés dans notre question de recherche et ne vise donc pas l'exhaustivité.

En outre, les concepts qui sont ici exposés ne seront pas ou peu discutés philosophiquement à ce stade puisque la réflexion propre de ce travail commence réellement après l'introduction générale.

Ce chapitre aborde les notions élémentaires de physique relatives à la radioactivité (section 2.1) avant de s'appesantir quelque peu sur le concept de « dose » qui constitue l'un des principaux indicateurs utilisés dans l'évaluation de la sûreté (opérationnelle et à long terme) (section 2.2). Il sera ensuite question des déchets radioactifs dont la définition est un sujet controversé (section 2.3).

Les aspects relatifs à la sûreté des stockages géologiques des déchets hautement radioactifs et/ou à vie longue feront, quant à eux, l'objet d'un autre chapitre (chapitre 3).

2.1 Notions élémentaires de physique relatives au phénomène de la radioactivité

2.1.1 Structure du noyau atomique

Les noyaux des atomes sont caractérisés par leur numéro atomique (Z) et leur nombre de masse (A). Le numéro atomique représente le nombre de protons présents dans le noyau tandis que le nombre de masse renseigne la quantité de nucléons c'est-à-dire le nombre de protons et de neutrons présents dans le noyau. Dans l'exemple type de l'uranium ${}^{238}_{92}\text{U}$, le numéro atomique est 92 en raison des 92 protons constituant le noyau et le nombre de masse est 238. Le nombre de neutrons (N) se déduit facilement en soustrayant le nombre de protons (Z) au nombre de nucléons (A) soit dans notre exemple, $238 - 92 = 146$ neutrons. Ainsi, $A = Z + N$. Rappelons que les protons sont chargés positivement et que les neutrons sont de charge électrique nulle. L'atome est électriquement neutre par nature, ce qui implique que son nombre d'électrons, chargés négativement, égale le nombre Z de protons (Klein, 2012, p. 7). Tous les atomes ayant le même numéro atomique, c'est-à-dire le même nombre de protons (et donc d'électrons), possèdent les mêmes propriétés chimiques et constituent donc les mêmes éléments chimiques. C'est par ce numéro atomique que les atomes sont ordonnés dans le tableau périodique des éléments (ou encore tableau de Mendeleïev).

Dans le langage technique de la physique, le numéro atomique n'est pas explicité puisqu'il est sous-entendu par le nom même de l'élément et l'on ne mentionne alors que l'élément assorti de son nombre de masse, soit dans notre exemple : U-238 (Kane et Sternheim, 1986, p. 685). En effet, le nombre de masse n'est quant à lui pas univoquement lié à l'élément et c'est la raison pour laquelle il peut être nécessaire de le mentionner explicitement. Si, en chimie, seul le nom de l'élément suffit généralement à donner la description nécessaire pour étudier une réaction donnée, c'est parce que les échanges chimiques s'opèrent au niveau des électrons des différents atomes et n'impliquent nullement leurs noyaux et leur composition. En physique nucléaire, c'est bien le noyau qui est le centre d'intérêt et l'on distingue les

espèces nucléaires de même numéro atomique mais possédant un nombre de masse différents. On appelle ces espèces les *isotopes*²¹. Ainsi par exemple : U-238 ; U-235 ; U-233 sont des isotopes de l'uranium ; C-12 ; C-14 sont des isotopes du carbone, etc. Certains isotopes sont *radioactifs*.

En effet, l'assemblage de nucléons constituant le noyau est le résultat d'un équilibre entre deux forces antagonistes qui s'exercent en son sein : l'interaction coulombienne, proportionnelle à Z , qui se traduit par la répulsion des protons entre eux et l'interaction nucléaire forte, proportionnelle à A , qui lie les nucléons entre eux. Lorsque cet équilibre est parfait, le noyau est stable, c'est-à-dire qu'il demeure dans son état initial de structure et d'énergie sans être l'objet de modifications spontanées. Lorsque l'équilibre est imparfait, le noyau est instable car il recèle en son sein une « surdose d'énergie » (Craeye, 2010) et il aura tendance à se transformer, en libérant ce surplus d'énergie, afin de retrouver une structure interne stable. Au cours de cette transformation, il émet un rayonnement (ionisant) et on dit alors de ce noyau qu'il est *radioactif* (Foos, 1994, p. 4). Par extension, on parlera d'*élément ou d'isotope radioactif, de radio-isotope ou encore de radionucléide* (Kane et Sternheim, 1986, p. 686 ; Bonin, 2012, p. 265). Parmi nos exemples ci-dessus, le C-12 est une espèce stable comportant 6 protons et 6 neutrons alors que le C-14, constitué de 6 protons et 8 neutrons, est un *isotope radioactif*.

2.1.2 La décroissance radioactive

La libération d'énergie permettant à un noyau de retrouver une forme stable se produit sous la forme d'émissions de particules ou d'ondes électromagnétiques. C'est ce qu'on appelle la *décroissance radioactive*. L'assemblage de nucléons de noyaux instables ne peut se maintenir au-delà d'une durée raisonnable et la structure de chaque nucléide instable va donc se modifier à un moment donné. L'instant précis de désintégration d'un noyau radioactif considéré isolément est impossible à prédire. Il est

²¹ Du grec *isos* qui veut dire « même » et *topos* qui veut dire « lieu » (Bonin, 2012). Les isotopes occupent en effet la même place dans le tableau périodique des éléments mais se distinguent par leur nombre de masse c'est-à-dire par les propriétés de leurs noyaux.

seulement possible de définir une grandeur correspondant à une certaine probabilité de transformation dans une unité de temps donnée. Cette probabilité est la même pour tous les noyaux de ce nucléide et elle est constante dans le temps, mais les noyaux ne se désintègreront pas tous au même moment. Cette probabilité de désintégration est la *constante radioactive* (Foos, 1994, p. 6) ou *constante de désintégration* (Kane et Sternheim, 1986, p. 687) et s'écrit λ . Elle s'exprime en $[s^{-1}]$. L'étude de la transformation radioactive d'un nucléide donné doit porter sur un grand nombre de noyaux en raison de son caractère aléatoire obéissant à des lois statistiques. Pour une population de N noyaux instables²², le nombre de noyaux se désintégrant par unité de temps est donné par λN . Ainsi, un noyau de C-14 a une probabilité de 1 sur 261 milliards de se désintégrer par seconde. Si l'on considère un gramme de C-14, nous avons $4.3E22$ noyaux qui ont chacun cette probabilité de se désintégrer, ce qui signifie que 165 milliards de noyaux vont se désintégrer à chaque seconde. Dans le cas de l'U-238, cette probabilité de désintégration est beaucoup plus faible et, dans un gramme d'uranium, il n'y a que 12 325 noyaux qui se désintègreront par seconde (Foos, 1994).

Si l'on considère ΔN la variation du nombre N des noyaux instables présents qui se produit pendant un intervalle de temps Δt , on peut écrire :

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t \quad \text{Equation 2-1}$$

La variation du nombre de noyaux est proportionnelle à N et à Δt , à la constante de désintégration λ près. Le signe moins traduit le fait que N décroît.

Sous forme différentielle, il vient :

$$-dN = \lambda N dt \quad \text{Equation 2-2}$$

²² Le N dont il est question ici désigne bien un nombre de noyaux instables et ne doit pas être confondu avec le N de la sous-section précédente relative à la structure du noyau, qui désignait le nombre de neutrons du noyau.

En séparant les variables :

$$\frac{dN}{N} = \lambda dt \quad \text{Equation 2-3}$$

L'intégration conduit à :

$$\ln N = -\lambda t + Cte \quad \text{Equation 2-4}$$

où Cte = constante.

En injectant comme conditions initiales à t_0 qu'il y a N_0 noyaux présents, $Cte = \ln N_0$

$$\text{On peut écrire : } \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \text{ ou encore } N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{Equation 2-5}$$

Cette équation est appelée formule de désintégration exponentielle, traduisant la décroissance de N au cours du temps.

Afin de caractériser de façon plus aisée la vitesse de transformation d'un radionucléide qu'avec la grandeur λ qui s'exprime seconde⁻¹, on utilise en général une autre grandeur, la *période radioactive* plus connue encore sous le nom de *demi-vie* T (Foos, 1994, p. 10 ; Kane et Sternheim, 1986, p. 687 ; Bonin, 2012, p. 265). T (parfois aussi $T_{1/2}$ ou encore $t_{1/2}$) représente donc la « durée nécessaire pour que la moitié du nombre initial des noyaux instables se soient désintégrés » (Foos, 1994, p. 10) ou encore « la durée pendant laquelle les atomes d'un radionucléide quelconque se désintègrent pour atteindre la moitié de l'intensité du rayonnement émis à l'origine » (Bonin, 2012, p. 265). Cette demi-vie est une propriété caractéristique de chaque isotope radioactif.

Nous pouvons démontrer que la constante de désintégration λ est liée à la demi-vie T . En effet :

Pour $t = T$, $N = N_0/2$ par définition.

$$\text{D'où } \ln \frac{N_0}{N_0/2} = -\lambda T = \ln 2 = 0.693,$$

$$\text{Ce qui donne } \lambda = \frac{0.693}{T} \quad \text{ou} \quad T = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad \text{Equation 2-6}$$

Plus la constante de désintégration est élevée plus la demi-vie est courte.

En pratique, sachant que pour tout radionucléide, il reste $\frac{N_0}{2^n}$ noyaux après n périodes, on retient qu'au terme de 10 périodes ($2^{10} = 1024$), la quantité d'un élément radioactif est réduite d'un facteur 1 000 environ (Foos, 1994, p. 10).

Notons que la quantité $-\frac{dN}{dt}$ issue de l'équation 2-2 est appelée *l'activité*. L'activité d'une substance correspond au nombre de désintégrations subi par unité de temps, pour un échantillon considéré. Il s'agit d'une grandeur proportionnelle au nombre de noyaux instables présents à tout instant. Cette grandeur décroît de façon continue. L'équation 2-5 nous montre que cette décroissance radioactive suit une loi exponentielle.

L'activité se mesure en becquerels (Bq) et correspond à une désintégration par seconde. Vu que cette unité est très faible, elle est en général multipliée. On parlera donc le plus souvent de MBq ou GBq voire encore de TBq pour mégabecquerel, gigabecquerel ou encore térabecquerel respectivement. Dans la littérature historique, l'unité renseignée peut être le Curie (Ci). Un Ci correspond à 37 GBq et puise son origine dans l'activité d'un gramme de Ra-226 qui correspond, en effet, approximativement à 37 milliards de désintégrations par seconde.

Notons que certains radionucléides peuvent se désintégrer en différents modes (voir section suivante) et qu'à chacun de ses modes correspond une constante de désintégration (partielle) (Foos, 1994, p. 14). On appelle le rapport d'embranchement le ratio suivant :

$$\frac{\lambda_{partielle}}{\lambda_{totale}} \quad \text{Equation 2-7}$$

2.1.3 Les différents types de rayonnements ionisants

Les différents types de rayonnements ionisants correspondent aux différents modes de désintégration ou moyens utilisés par le noyau instable en vue de retrouver une forme stable.

2.1.3.1 Le rayonnement alpha

Le rayonnement α (Craeye, 2010) ou désintégration α (Foos, 1994) correspond à l'émission d'une particule α par le noyau instable. Cette particule α est un noyau d'hélium composé de deux protons et deux neutrons. Ce mode d'émission est principalement (mais non exclusivement) rencontré parmi les noyaux instables lourds ($Z > 82$) (Craeye, 2010). Ainsi par exemple, l'U-238 émet un rayonnement α :



Les particules α sont peu pénétrantes et peuvent donc être aisément bloquées en raison de leur masse relativement élevée. Une simple feuille de papier ou une mince couche d'air représente déjà une barrière de protection suffisante.

2.1.3.2 Le rayonnement beta (et la capture électronique)

Le rayonnement (ou désintégration) β consiste en l'émission d'un électron (β^-) ou d'un positron (β^+). Il y a modification d'un nucléon, soit la transformation d'un neutron en proton (β^-) soit la transformation d'un proton en neutron (β^+). Cette modification n'entraîne pas de variation de masse du noyau fils par rapport au noyau parent (Foos, 1994).

Dans le cas de l'émission β^- , il s'agit d'un processus d'interaction faible²³ qui concerne un nucléon du noyau et qui engendre la conversion d'un neutron

²³ Les forces intervenant dans la désintégration β ainsi que dans la capture électronique sont faibles en comparaison des forces nucléaires et électromagnétiques. Cette interaction faible est la plus faible des interactions fondamentales intervenant dans la nature, à l'exception des forces de gravitation (Kane et Sternheim, 1986, p. 699).

en proton. Celle-ci s'accompagne de l'émission d'un électron (e^-) et d'un antineutrino ($\bar{\nu}$), une particule élémentaire sans charge et de masse négligeable. Cette réaction ne se produit que s'il y a un excès de neutrons par rapport aux protons (Craeye, 2010, p. 9). Ainsi par exemple :



Comme cet exemple le montre, la conversion du césium en baryum n'entraîne aucune modification de masse, il s'agit d'une transformation *isobare* ou *isobarique*. Le numéro atomique 55 du césium renseigne le nombre de protons dans le noyau instable initial (noyau père). Le numéro 56 du baryum renseigne le nombre de protons présents dans le noyau fils. Celui-ci comporte un proton supplémentaire en raison de la conversion du neutron du noyau père en proton, lors de la désintégration β^- .

Dans le cas de l'émission β^+ , l'énergie est utilisée afin de convertir un proton en neutron. Cette conversion s'accompagne de l'émission d'un positron (e^+) et d'un neutrino (ν), une particule élémentaire sans charge et de masse négligeable. Cette réaction ne se produit que s'il y a un excès relatif de protons par rapport aux neutrons (Foos, 1994, p. 44). Ainsi par exemple :



Comme le montre l'exemple ci-dessus, la transformation du sodium en néon est isobarique. Cette fois, le numéro atomique entre le noyau père et le noyau fils a diminué d'une unité puisque c'est le proton du sodium qui s'est transformé en neutron.

Les particules β se déplacent à une vitesse de 270 000 km/s et peuvent être arrêtées par l'acier ou de l'aluminium en épaisseur de quelques millimètres ou encore par une couche d'air de minimum 3 mètres (Craeye, 2010, p. 10).

Notons, sans en détailler le mécanisme, que l'émission d'un positron requiert l'existence d'une différence de masse entre les deux noyaux en filiation équivalente au double de la masse de l'électron au minimum. Si cet écart est plus faible, l'émission du positron est impossible. En revanche, il arrive qu'un

proton du noyau capture un électron d'une couche électronique proche du noyau) et se transforme ainsi en neutron. Ce processus est appelé *capture électronique* et s'écrit de façon identique à la transformation β^+ (Foos, 1994, p. 44).

2.1.3.3 Le rayonnement électromagnétique gamma

Les noyaux des atomes peuvent se trouver dans un état excité à la suite d'une réaction nucléaire c'est-à-dire après une désintégration α ou une désintégration β (Foos, 1994, p. 64 ; Craeye, 2010, p. 10). Les rayons gamma qui sont des quanta électromagnétiques appelés photons sont émis quand un noyau effectue une transition d'un niveau énergétique plus élevé vers un niveau énergétique plus bas. Ils sont similaires aux rayons X émis par des atomes excités mais leur énergie est beaucoup plus grande que ceux-ci (Kane et Sternheim, 1986, p. 698). Ainsi par exemple :



Dans cette transformation, on peut voir le Pu excité (Pu^*) retrouver un niveau énergétique plus bas qui restaure son équilibre grâce à l'émission d'un rayonnement γ .

Parfois il s'opère une conversion interne c'est-à-dire que le noyau excité cède son énergie excédentaire à un électron d'une couche interne, ce qui provoque son éjection (Kane et Sternheim, 1986, p. 698) et l'émission de rayons X. Ce phénomène de conversion interne est étroitement lié à la désintégration γ dans la mesure où l'émission γ et la conversion interne sont des mécanismes concurrents.

Le rayonnement électromagnétique γ est de nature ondulatoire et il se caractérise donc par une longueur d'onde et une fréquence. Son énergie E (en J) est donnée par la formule suivante :

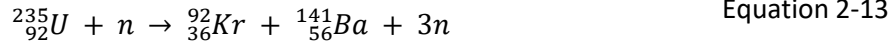
$$E = h \times \nu$$
Equation 2-12

Où h est la constante de Planck (6.626×10^{-34} J.s) et ν est la fréquence de l'onde électromagnétique (Hz).

Les rayons gamma ont une fréquence très élevée ($>10^{19}$ Hz) et répondent à la nature duale onde-corpuscule. Les rayonnements gamma se propagent à la vitesse des photons c'est-à-dire à la vitesse de la lumière de 300 000 km/s. Les rayonnements gamma sont très pénétrants et ne peuvent être stoppés que par d'épaisses couches d'acier, de plomb ou de béton. Dans l'air, ils peuvent parcourir plusieurs centaines de mètres.

2.1.3.4 L'émission de neutrons

Une émission de neutrons peut avoir lieu spontanément ou plus particulièrement après une fission nucléaire au cœur d'un réacteur (Craeye, 2010, p. 11). La fission peut donc être spontanée – comme c'est le cas avec l'U-235 et l'U-238 – ou être induite lors du bombardement par des *neutrons thermiques* ou *neutrons lents*²⁴ (Kane et Sternheim, 1986, p. 707 ; Craeye, 2010, p. 11). Ainsi par exemple :



Dans cette réaction, un neutron (n) a été utilisé et 3 neutrons ont été produits. A leur tour, ces neutrons peuvent entraîner d'autres fissions de noyaux. C'est ce qu'on appelle une réaction en chaîne.

²⁴ Il s'agit de neutrons dont l'énergie cinétique est inférieure à 1 eV (Kane et Sternheim, 1986, p. 707).

2.2 Notions fondamentales de protection radiologique

2.2.1 La dose

En raison de leur pouvoir ionisant, les différents rayonnements que nous avons abordés dans la section précédente peuvent engendrer des effets délétères sur les tissus biologiques. Lorsqu'il s'agit de rayonnements, il y a donc lieu de bien distinguer l'intensité de la source, qui est reflétée par l'activité (en becquerels) et que nous avons précédemment explicité, et les *doses de radiation* qui font l'objet de la présente section. Il y a trois types de doses de radiation : l'exposition, la dose absorbée et la dose équivalente. Le terme « dose » employé seul est le terme générique qui indique la quantité de rayonnement ou d'énergie absorbée dans une masse spécifique de matière (Bonin, 2012, p. 261)

L'exposition n'est définie que pour les rayons X et les rayons gamma ayant des énergies inférieures à 3 MeV. L'exposition est l'ionisation produite dans une unité de masse d'air sec dans les conditions normales²⁵ de température et de pression (Kane et Sternheim, 1986, p. 719). L'unité conventionnelle de l'exposition est le roentgen (R) correspondant à 2.58×10^{-4} C/kg (Coulomb par kilogramme)²⁶.

Les concepts de dose absorbée et de dose équivalente sont, en revanche, valables pour tous les types de rayonnements.

La *dose absorbée* (D) est « la quantité d'énergie absorbée en un point par unité de masse de matière » (Bonin, 2012, p. 261). La dose absorbée s'exprime en grays (Gy), un gray correspondant à une énergie absorbée de 1 Joule dans un kilogramme de matière. Anciennement, l'unité utilisée était le rad correspondant à 0.01 joule par kilogramme. $1\text{Gy} = 100\text{ rad}$. Le Gy est

²⁵ Il s'agit des conditions à 0°C et à 1 atmosphère. Les conditions normales diffèrent ainsi des conditions standard définies à 1 atmosphère mais à 25°C.

²⁶ Ceci signifie que dans un kilo d'air aux conditions normales de température et de pression, 1 roentgen de rayons X produira 2.58×10^{-4} coulomb d'ions positifs et une quantité égale d'ions négatifs (Kane et Sternheim, 1986, p. 719).

l'unité du système international. Notons que la dose absorbée ne fait pas la distinction entre la matière vivante ou la matière inerte qui absorbe le rayonnement.

La *dose équivalente* s'applique quant à elle, à la matière vivante qui absorbe le rayonnement. L'effet des rayonnements sur les tissus vivants est différent selon qu'il s'agisse de rayonnements α , β ou γ . Pour tenir compte de cet effet biologique sur le tissu irradié en fonction du rayonnement, on définit la *dose équivalente* $H_{T,R}$ d'un tissu T. Elle est obtenue en multipliant la dose absorbée $D_{T,R}$ par un facteur de pondération w_R dépendant du rayonnement R.

$$H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R} \quad \text{Equation 2-14}$$

La dose équivalente totale H_T est obtenue par la somme des doses équivalentes pour chaque rayonnement :

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} = \sum_R H_{T,R} \quad \text{Equation 2-15}$$

La dose équivalente s'exprime en sievert (Sv).

Sur la base de la dose équivalente, on peut également définir une *dose efficace* afin de tenir compte non seulement de la variabilité des rayonnements mais aussi de la sensibilité des tissus exposés, ceux-ci ayant une résistance plus ou moins prononcée aux rayonnements. Ainsi, la dose efficace est une mesure de l'effet biologique causé par un ou plusieurs types de rayonnements, sur tout le corps. Par conséquent, la dose efficace s'obtient par la sommation des doses équivalentes totales reçues H_T multipliées par les facteurs de vulnérabilité des tissus exposés w_T

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad \text{Equation 2-16}$$

La dose efficace, tout comme la dose équivalente, s'exprime en Sv.

Notons que le facteur de pondération en fonction du rayonnement w_R est égal à 1 pour l'émission d'électrons/positrons ou de photons (i.e. rayonnements β et γ) et $w_R = 10$ pour l'émission de particules α (IRPS, 2018e). En ce qui concerne le facteur de pondération tissulaire w_T , la CIPR détermine $w_T = 0.12$ pour la moëlle osseuse (rouge), le colon, le poumon,

l'estomac, le sein, etc. ; $w_T = 0.08$ pour les gonades, $w_T = 0.01$ pour la peau, etc. Quand plusieurs tissus sont touchés, les facteurs de pondération s'additionnent comme le suggère l'équation 2-16. Ainsi par exemple, l'irradiation de la vessie, de l'œsophage, du foie et de la thyroïde s'obtient par l'addition de chaque coefficient de pondération tissulaire individuel $w_T = 0.04$. Ainsi $\sum w_T = 0.16$ (ICRP, 2007, p. 182).

Afin de se donner une idée de ce que représente concrètement l'unité Sv, il est utile de savoir que l'exposition moyenne au rayonnement naturel en Belgique est de 2.4 mSv/an, le rayonnement cosmique contribuant à 0.3 mSv/an et le rayonnement terrestre à 0.4 mSv/an, une bonne partie du solde de ce rayonnement étant apporté par l'ingestion des substances naturellement radioactives. Une heure d'avion représente une dose de 0.004 mSv, le passage d'un *petscan*, une dose de 7 mSv, une radiographie simple, une dose de 0.25 mSv, etc. (sources : www.afcn.be ; ONDRAF, 2022b). Ces valeurs sont des doses efficaces.

2.2.2 Les effets déterministes et les effets stochastiques des radiations

Même si nous reviendrons largement sur les effets stochastiques des rayonnements sur le corps humain lorsque nous discuterons les principes fondamentaux de la protection radiologique (i.e. principe de justification, principe d'optimisation et principe de limite de doses), il convient de brièvement aborder ici ce qui les distingue des effets déterministes.

Nous avons déjà mentionné que tous les rayonnements n'ont pas les mêmes effets sur les cellules vivantes. Ce qui va déterminer les dégâts cellulaires sont la dose (absorbée), l'énergie totale de la particule ionisante et sa perte d'énergie par unité de longueur (Cavedon, 2012, p. 30). L'irradiation affecte le noyau des cellules en endommageant l'ADN. Soit l'attaque de l'ADN est provoquée par un choc direct, soit elle est induite par la radiolyse de l'eau environnant l'ADN qui engendre la production de radicaux libres. Ces radicaux libres – ion hydrogène H^+ et ion hydroxyle OH^- – attaquent chimiquement à l'ADN. Les lésions de l'ADN peuvent être le bris d'un ou de deux brins de sa structure hélicoïdale, la disparition ou la dégradation des

bases disposées le long des brins, l'addition de molécules à ces mêmes bases ou encore le pontage entre l'ADN et d'autres protéines (Cavedon, 2012, p. 31). Les brisures simple brin de même que les lacunes sont fréquentes, elles sont également provoquées par des agressions chimiques, thermiques ou par la lumière ultraviolette et sont donc aisément réparées par l'organisme. En revanche, les cassures double brin sont caractéristiques des rayonnements ionisants et sont plus complexes à gérer pour l'organisme. Ce dernier pourra néanmoins les réparer le plus souvent, mais lorsque ce ne sera pas possible, la cellule mourra par nécrose. Certaines réparations peuvent également être erronées et la cellule choisira de se « suicider » plutôt que de se répliquer, c'est le phénomène d'apoptose (Cavedon, 2012, p. 31 ; IRPS, 2018e). Toutefois, en raison de certaines réparations fautes, des mutations peuvent être engendrées. En général, ces cellules mutantes sont éliminées par le système immunitaire. Ce n'est qu'en cas de défaillance de toute la chaîne de ces mécanismes que les mutations pourront engendrer des effets délétères à plus long terme. En simplifiant fortement, nous dirons que les cellules qui ne déclenchent pas leur apoptose peuvent proliférer et être éventuellement le siège d'une cancérisation, en conjugaison avec d'autres facteurs exogènes à la cellule. Comme nous l'évoquions précédemment en définissant la dose efficace, tous les tissus ne sont pas logés à la même enseigne. On estime que sur 100 cancers induits par les radiations, 12 seront pulmonaires, 5 seront un cancer du sein et 1 cancer sera un cancer de la peau (Cavedon, 2012, p. 32). Mais il s'agit encore ici d'effets stochastiques.

Les effets déterministes sont des effets qui se manifestent de façon certaine chez tout le monde au-delà d'une dose élevée que l'on appelle « seuil ». A ces doses, les cellules se nécrosent automatiquement et pour peu qu'un nombre important de cellules d'un même tissu se nécrosent, c'est la survie même du tissu qui est compromise. Il n'y a donc pas, à l'inverse des effets stochastiques, de transformations cellulaires mais bien des destructions pures et simples. Si l'on considère une exposition à des rayons gamma pour lesquels la dose absorbée en Gy peut être directement traduite en Sv sans facteur de conversion, on estime qu'il n'y a pas d'effet déterministe en deçà de 200 mSv. A partir de 200 mSv et jusqu'à 1 500 mSv, des lésions cutanées avec potentielle nécrose sont observées. A partir de 1 500 mSv, c'est le syndrome d'irradiation aiguë ; avec une exposition à 5 000 mSv, les chances

de survie sans traitement médical approprié sont de 50%. A partir de 10 Sv, la mort est quasi certaine. Certaines maladies sont connues comme résultant d'une exposition à des radiations ionisantes à des doses déterministes : la cataracte (à partir de 2 Gy) ou encore la dermite du radiologue, à partir de 3 Gy (3 Sv) (Cavedon, 2012, p. 39). Ces considérations très générales ne tiennent évidemment pas compte de la sensibilité individuelle aux radiations. Ainsi, par exemple, les enfants sont deux à trois fois plus sensibles aux radiations que les adultes lorsqu'il s'agit d'effets stochastiques. Les contraintes de dose sont d'ailleurs adaptées en conséquence. A l'inverse, les enfants se remettent beaucoup mieux que les adultes des effets déterministes des radiations, leur capacité de guérison par régénération cellulaire étant considérablement plus élevée... (IRPS, 2018e).

2.2.3 Le modèle LNT : une approche de sûreté

Le domaine des effets déterministes relève de la certitude. Au-delà d'un seuil, les effets sont certains et plus l'exposition (incluant la dose et la durée) est élevée, plus les effets seront importants. En deçà de 200 mSv, les effets sont probabilistes mais les radioprotectionnistes considèrent que le risque de développer un cancer (ainsi que d'autres pathologies telles les maladies cardiovasculaires) croît linéairement en fonction de la dose d'exposition. Il s'agit du modèle LNT (*Linear Non Threshold*). Ce modèle linéaire est simple d'utilisation et est raisonnablement conservatif. Il ne reflète toutefois pas la réalité, celle-ci répondant à des lois de comportement bien plus complexes : sublinéaire, supra-linéaire, évolution linéaire à partir d'un certain seuil ou encore « hormétique » (i.e. un effet protecteur serait conféré par les radiations à faibles doses). Ce modèle LNT ne connaît pas de seuil, ce qui signifie qu'il n'y aurait pas de dose en dessous de laquelle le risque de cancer radio-induit serait nul. C'est sur la base de ce modèle que d'aucuns réfutent l'idée selon laquelle l'effort d'optimisation pourrait s'arrêter (arbitrairement) en dessous d'une dose seuil minimale (concept *de minimis*) (voir section 7.4.3.3). Notons que ce modèle LNT est également l'expression avant

l'heure d'une approche de précaution²⁷ En effet, c'est en raison du peu de données épidémiologiques disponibles en deçà de cette dose qu'il est difficile de proposer une loi qui relierait fidèlement l'apparition du cancer à la dose d'exposition. A ces (faibles) doses, la possibilité d'attribuer sans équivoque l'occurrence un cancer à l'exposition à une radiation plutôt qu'à toute autre cause est quasiment impossible (CSS, 2021, p55). Ce modèle est illustré ci-dessous par la figure 2-1.

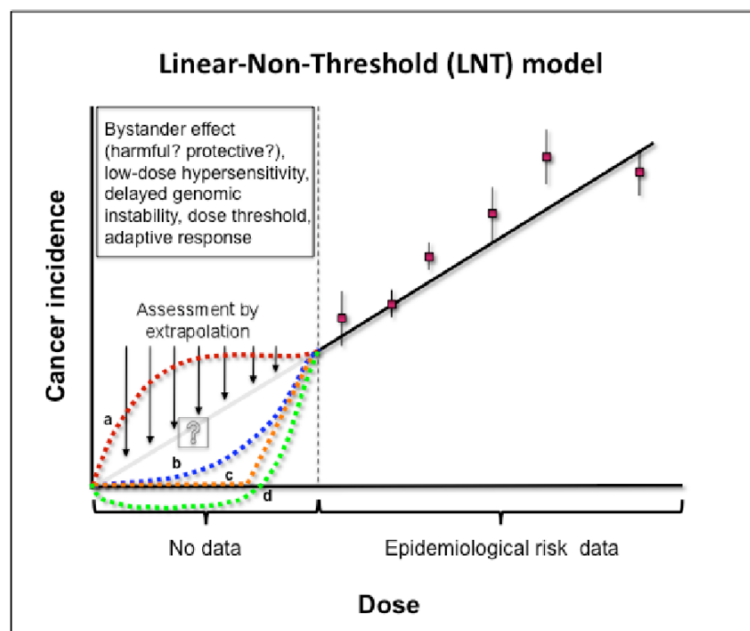


Figure 2-1 – Modèle LNT représenté de façon schématique, illustrant le caractère linéaire raisonnablement confirmé par les données épidémiologiques au-delà d'une certaine dose et l'extrapolation de cette tendance aux faibles doses. L'interpolation linéaire est questionnée par rapport à d'autres comportements supposés. La courbe rouge (a) représente un comportement supra-linéaire, la courbe bleue (b) un comportement sublinéaire, la courbe jaune (c) un comportement obéissant à un seuil. Enfin la courbe verte (d) traduit le phénomène d'hormèse ou effets bénéfiques des radiations à faibles doses (Mancuso et al., 2012).

²⁷ Nous discuterons largement le principe d'optimisation dans la suite de cette thèse et c'est la raison pour laquelle nous ne souhaitons pas trop nous y appesantir à ce stade. Remarquons simplement que le principe ALARA a été formalisé en 1977 et puise son origine dans les années 1950 alors que c'est la Déclaration de Rio en 1992 qui consacrera le principe de précaution comme 15^e principe (voir aussi première partie, section 8.4).

Nous pouvons conclure que le modèle LNT, loin de décrire une réalité scientifique, ne modélise pas un processus mais constitue plutôt un modèle de sûreté en ce sens qu'il permet au décideur de veiller à ce que l'exposition du public ou du travailleur tienne compte de cette régression linéaire dans le domaine des faibles doses quand bien même celle-ci serait trop protectrice dans la plupart des cas²⁸.

2.2.4 Contraintes de dose, limites de dose et niveaux de référence

Les concepts de *contraintes de dose* et de *niveaux de référence* sont utilisés en association avec le principe d'optimisation (sur lequel nous reviendrons largement) afin de diminuer l'exposition individuelle. L'intention initiale est de ne jamais dépasser ces contraintes ou niveaux de référence et ensuite, de tout mettre en œuvre pour se situer le plus en deçà de ceux-ci (ICRP, 2007, p. 93). Les *contraintes de dose* sont donc des bornes supérieures à la dose dans l'optimisation de la protection relative à la source radioactive. La distinction entre contrainte de dose et niveau de référence réside dans le type d'exposition. Dans les *situations d'exposition planifiées*²⁹, on utilise l'expression « *contrainte de dose* » car le niveau renseigné peut effectivement être utilisé dans la planification de l'activité, comme une contrainte de dimensionnement de la pratique entraînant l'exposition. Dans le cas des situations d'urgence ou de situations existantes c'est-à-dire de situations héritées, ces valeurs ne perdent pas leur pertinence mais elles ne peuvent plus être invoquées comme une contrainte puisque tantôt la

²⁸ C'est bien en raison du fait que ce point est disputé que le modèle LNT continue d'être utilisé. Même si souvent cette approximation linéaire peut cacher d'éventuels effets comme l'hormèse ou l'existence supposée d'un seuil, il y a toujours suffisamment d'arguments pour supposer par ailleurs des réponses supra-linéaires (CERRIE, 2004 ; ICRP, 2007) dans certains cas et/ou pour tenir compte de la sensibilité particulière de certains individus. L'interpolation linéaire semble donc être l'approche globale la plus conservatrice, c'est-à-dire la plus sûre.

²⁹ L'accord de l'adjectif mérite une remarque. C'est bien la situation qui est planifiée, non l'exposition. Il serait plus juste d'écrire les situations planifiées d'exposition. L'anglais ne donne pas nécessairement cette nuance pas plus que sa traduction lorsqu'elle est au singulier « *planned exposure situation* » = « situation d'exposition planifiée ». Toutefois, cette distinction est importante comme le rappelle Jack Valentin, « Monsieur ICRP », le secrétaire scientifique et l'éditeur officiel des publications de la CIPR pendant plus de douze ans (IRPS, 2018f).

situation est hors de contrôle tantôt elle est le fruit d'une exposition passée non planifiée (i.e. éventuellement une ancienne situation d'urgence). On parle alors de *valeurs de référence*. Dans ce dernier cas, il existe un large spectre possible de situations et c'est le principe d'optimisation qui doit être mobilisé, cette fois sans bénéficier de borne supérieure clairement établie, afin de diminuer autant qu'il est raisonnablement possible de le faire, la dose d'exposition. Signalons également qu'au sein des expositions planifiées, une distinction s'opère entre expositions normales et expositions potentielles. La première a lieu avec certitude et est intrinsèque à l'activité planifiée, la deuxième peut avoir lieu dans certaines circonstances entourant la pratique de l'activité. A l'exposition potentielle, on associe toujours une *contrainte*, puisqu'il s'agit d'une exposition planifiée, mais cette fois, il s'agit d'une *contrainte de risque* (ICRP, 2007, §229).

On distingue également, au sein des expositions planifiées, les *limites de dose* des *contraintes de dose*. Les *limites de dose* sont établies rétrospectivement et sont légalement contraignantes. Les *contraintes de dose* sont établies prospectivement et constituent un outil de planification. Comme le rappelle Jack Valentin, secrétaire scientifique de la CIPR, dépasser une *contrainte de dose* ne constitue pas en soi un délit (« offence ») mais ne rien faire pour améliorer la situation en est un (IRPS, 2018f). Les *limites de dose* sont toujours égales ou supérieures aux contraintes de dose (en général, supérieures). Ainsi par exemple, la CIPR recommande des limites de doses efficaces dans des situations planifiées d'exposition de 1 mSv/an pour le public et, pour les travailleurs, de 20 mSv/an moyennée sur 5 ans de façon que la limite de 100 mSv/5 ans ne soit pas dépassée avec, de surcroît, la disposition supplémentaire de ne jamais dépasser 50 mSv au cours d'une même année³⁰ (ICRP, 2007, p. 99). Nous discutons les fondements éthiques de la protection radiologique plus tard (voir chapitre 7). Notons simplement que les différences entre limites de dose entre public et travailleurs s'expliquent notamment par le consentement informé des seconds par rapport au premier (qui subit l'exposition sans l'avoir choisie). Un raisonnement similaire est tenu pour les interventions en situation d'urgence. Enfin, notons que ces règles sont adaptées dans le cas de la

³⁰ Remarquons que certaines parties du corps peuvent être éventuellement davantage irradiées (la dose efficace est calculée comme une somme de doses équivalentes)

pratique médicale, que celle-ci concerne l'imagerie ou le traitement radiothérapeutique³¹.

Un stockage géologique de déchets radioactifs est une situation d'exposition planifiée (AFCN, 2011b ; AFCN, 2012a ; AFCN, 2017b). L'AFCN tient compte de la limite de dose pour le public recommandée par la CIPR, à savoir 1 mSv/an, pour définir des contraintes de dose propres à l'installation de stockage. En effet, expositions naturelles et médicales mises à part³², la limite de dose de la CIPR admissible pour le public considère l'ensemble des situations d'exposition dues à des sources artificielles existantes ou raisonnablement envisageables et par conséquent, l'installation de stockage ne peut pas « consommer » à elle seule toute cette dose. La contrainte de dose applicable dans le cas d'un stockage est de 0.3 mSv/an pour l'exposition normale de personnes du public (AFCN, 2012a). Pour les expositions normales couvertes par le *scénario d'évolution attendue* (EES), l'AFCN fixe une contrainte de 0.1 mSv/an (AFCN, 2012a). Il y a en effet des expositions normales qui relèvent du *scénario de référence* (RS) distinct du EES qui pourraient justifier une exposition comprise entre 0.1 mSv et 0.3 mSv. Cette différence, bien que légèrement plus permissive en apparence, s'explique par le caractère plus conservatif des hypothèses du scénario de référence (RS) en comparaison de celles de l'EES³³ (voir chapitre 4). Le RS se veut donc être plus enveloppe que l'EES qui reflète la meilleure estimation du comportement de l'installation de stockage par les experts.

³¹ Une *tomographie calculée* de tout le corps ou *CT scan* peut engendrer une exposition de 100 mSv en dose efficace si tout le corps est irradié (IRPS, 2018g). Cette dose doit être évaluée en regard des bénéfices escomptés par l'examen. C'est un tout autre débat.

³² L'exposition naturelle est fonction de l'endroit où l'individu habite et l'exposition médicale est fonction de l'histoire médicale de l'individu. Ces données sont considérées comme trop particulières et trop variables que pour pouvoir être prises en compte.

³³ Un scénario de référence est toujours construit du côté de la sûreté. Si une incertitude subsiste, elle doit profiter à la sûreté. Cela conduit grosso modo à sous-évaluer ce qui pourrait avantager l'installation de manière à surévaluer tous les mécanismes de protection. Les évaluations de sûreté du RS se basent sur des hypothèses simplificatrices plus sévères (et moins réalistes) que pour le scénario EES. Il faut donc comprendre que, même en relâchant certaines hypothèses, de manière à prendre des marges de sûreté sur l'évolution escomptée traduite par l'EES, la contrainte de dose de 0.1 mSv sera peut-être dépassée mais pas celle de 0.3 mSv.

Vu les très grandes échelles de temps en jeu dans le cas des stockages, les contraintes de dose deviennent des valeurs de référence dans le très long terme et doivent alors être complétées par des indicateurs complémentaires afin d'apprécier l'impact radiologique du stockage (AFCN, 2017b). Les valeurs de référence sont utilisées en guise de *valeurs de comparaison* mais ne peuvent plus être considérées comme *contraintes* en raison des grandes incertitudes qui entourent la situation à l'examen (AFCN 2017b ; AFCN, 2012a). Notons que lorsqu'il s'agit d'évaluer des scénarios d'évolutions non attendus mais possibles, les contraintes de risques remplacent les contraintes de dose (AFCN, 2017b) puisqu'il s'agit alors d'expositions potentielles (ICRP, 2007).

2.3 Les déchets radioactifs

2.3.1 Définition(s)

Le mot « déchet » est apparu au XIV^e siècle et provient du verbe « déchoir » qui traduit la diminution de valeur d'un objet. L'article 1 de la directive européenne 2008/98/EC³⁴ (EC, 2008a) définit un déchet comme « *toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire* ». Comme le fait remarquer Philippe Pichat, cette définition soulève deux points d'attention : une certaine relativité de ce qui est un déchet et l'obligation d'élimination (Pichat, 1995). Nous entendons ici « relativité » comme synonyme d'arbitraire et nous souscrivons à ce constat. Mais Pichat, dans son ouvrage sur la gestion des déchets, cite la directive 91/156/EEC (EC, 1991), une version antérieure de la directive de 2008, en remplaçant, dans l'article 1, « détenteur » par « propriétaire ». Cette simplification est, selon nous, illicite et, aux deux préoccupations soulevées par Pichat, nous ajoutons le problème juridique de la « propriété d'un déchet ». En effet, ce dernier est pertinent dans le monde nucléaire en

³⁴ Directive 91/56 : [1991] (O.J. L78/32) qui amende la directive cadre des déchets 75/442/EEC : [1975] (O.J. L 194/39) et définit « waste » comme « *...as any substance or object which the holder disposes of or is required to dispose of* ». Cette directive a été abrogée et remplacée en 2006 par la directive 2006/12/EC (EC, 2006), elle-même abrogée et remplacée par la directive 2008/98/EC toujours en vigueur (EC, 2008a).

matière de responsabilité, de sûreté et de financement et il est, comme on l'imagine sans peine à la lecture de cette définition, la bouteille à encre des juristes (nucléaires). Comment établir la propriété d'un objet dont tout détenteur cherche à se débarrasser ?

Bon nombre d'activités industrielles, de recherche ou médicales utilisent des matières radioactives ou mettent en œuvre des rayonnements ionisants. Elles engendrent des déchets dits radioactifs, sous forme solide, liquide ou gazeuse. L'Agence de l'énergie nucléaire (AEN) de l'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE) et l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) en formulent la définition suivante :

« Matière, sous quelque forme physique que ce soit, qui résulte de l'exercice de pratiques ou d'interventions, qu'il n'est pas prévu d'utiliser par la suite, et i) qui contient, ou est contaminée par, des substances radioactives et a une activité ou une concentration d'activité supérieure au niveau de libération des prescriptions réglementaires et ii) pour laquelle l'exposition à cette matière n'est pas exclue du champ d'application des Normes [fondamentales internationales] » (IAEA, 1997b).

Le point ii) de cette définition rappelant que certaines expositions échappent au champ d'application de ces normes, ainsi par exemple les activités militaires :

« Les normes de sûreté de l'AIEA sont applicables, selon que de besoin, pendant la durée de vie de toutes les installations et activités, existantes et nouvelles, utilisées à des fins pacifiques ainsi qu'aux mesures de protection visant à réduire les risques radiologiques existants. Les États peuvent les utiliser comme référence pour la réglementation nationale concernant les installations et les activités » (IAEA, 2016b).

Notons que les publications les plus récentes ne retiennent que la formulation juridique et réglementaire du « déchet radioactif » :

« À des fins juridiques et réglementaires, matière pour laquelle aucune utilisation ultérieure n'est prévue et qui contient, ou est contaminée par, des radionucléides dont les concentrations d'activité

ou les activités sont supérieures aux niveaux de libération fixés par l'organisme de réglementation. Il faut noter que cette définition sert uniquement à des fins réglementaires ; les matières dont les concentrations d'activité sont inférieures ou égales aux niveaux de libération³⁵ sont radioactives du point de vue physique, mais les risques radiologiques qui y sont associés sont considérés comme négligeables » (IAEA, 2016b, nous soulignons)

Les publications de l'AIEA, plus anciennes retiennent, selon les contextes, différentes définitions. En effet, le point de vue scientifique, celui qui reflète la réalité physique, n'est parfois que de peu d'utilité sur le plan juridique. En toute rigueur, comme le stipule l'AIEA:

*« **Sur le plan scientifique**, est qualifié de radioactif tout ce qui est doué de radioactivité ou – dans une acception moins précise, mais plus généralement acceptée – ce qui contient une quelconque substance douée de radioactivité. D'un point de vue scientifique, il s'ensuit que pratiquement toutes les matières (y compris celles considérées comme des déchets) sont radioactives. **Toutefois, d'un point de vue réglementaire**, il est d'usage de définir les expressions matière radioactive et déchet radioactif de sorte à n'y inclure que celles ou ceux qui sont soumis à réglementation en raison du danger radiologique qu'ils présentent. Bien que les spécifications exactes varient d'un pays à l'autre, ces définitions excluent habituellement les matières et déchets contenant des concentrations très faibles de radionucléides et ceux qui ne contiennent que des concentrations « naturelles » de radionucléides naturels. » (IAEA, 2007a, nous soulignons)*

Autrement dit, la radioactivité nous entoure et il n'est, par exemple, que de peu d'intérêt pour l'homme de loi de statuer sur les rayonnements

³⁵ Le seuil de libération (*clearance*) étant lui-même défini par la : « Soustraction de matières radioactives ou d'objets radioactifs associés à des pratiques déclarées ou autorisées au contrôle réglementaire [effectué aux fins de radioprotection] de l'organisme de réglementation. » (IAEA, 2016b). Il s'agit bien, comme le précise le Plan Déchets de l'ONDRAF, d'une soustraction à tout contrôle ultérieur. En effet, « la libération désigne la soustraction de matières radioactives ou d'objets radioactifs associés à des pratiques autorisées à tout contrôle réglementaire ultérieur de l'autorité de sûreté » (ONDRAF, 2011a).

cosmiques ou la présence de potassium 40 dans le corps humain. C'est ici que les notions de « libération » (clearance), d'exclusion ou d'exemption³⁶ prennent tout leur sens et en particulier, la notion d'exclusion. L'exclusion renvoie à un cas particulier d'exposition qui sort délibérément de la portée d'un contrôle réglementaire (ICRP, 2007).

Le déchet nucléaire qualifie quant à lui, le déchet radioactif engendré par la mise en œuvre de l'énergie de fission (ou de fusion) nucléaire pour la production d'énergie ou d'armes nucléaires (Schapira J-P, 1997). Très simplement, dans le contexte de cette thèse, est « nucléaire » ce qui se rapporte directement aux réacteurs de puissance ou de recherche alors que le déchet *radioactif* est d'acception plus large et recouvre par exemple, les produits utilisés dans le monde médical quand bien même ceux-ci auraient été eux-mêmes produits par un réacteur d'isotopes médicaux...

Schapira propose, pour le déchet radioactif, l'utilisation de la définition pratique suivante, avancée par l'AEN :

« Toute matière contenant des radionucléides en concentration supérieure aux valeurs que les autorités compétentes considèrent comme admissibles dans les matériaux propres à une utilisation sans contrôle et pour laquelle aucun usage n'est prévu » (Schapira J-P, 1997).

Cette définition, plus simple, rencontre le sens commun et met en exergue deux idées d'importance : celle de nocivité et celle d'absence d'usage. Aucune de ces notions, comme nous le verrons dans la suite de ce texte, n'est triviale.

L'absence d'usage est une notion contingente dépendant d'un contexte socio-économique. En Belgique, le statut des combustibles usés par exemple, est le sujet tabou de nos politiciens. En effet, en application de la résolution 541/9-91/92 du 22 décembre 1993 de la Chambre (Chambre des représentants, 1993), confirmée par le Conseil des ministres la même année

³⁶ Exemption : désigne la détermination par l'autorité de sûreté qu'une source ou une pratique n'a pas à être soumise à certains ou à l'ensemble des éléments du contrôle réglementaire du fait que l'exposition (y compris l'exposition potentielle) due à la source ou à la pratique est trop faible pour justifier l'application de ces éléments (ONDRAF, 2011).

et reconfirmée par lui le 4 décembre 1998 (Conseil des ministres, 1998), la Belgique a suspendu en 1993 le retraitement des combustibles irradiés des centrales nucléaires. Depuis l'entrée en vigueur de la suspension du retraitement, Electrabel-Engie entrepose les combustibles irradiés sur les sites de ses centrales. Le propriétaire des combustibles tant frais qu'irradiés, Synatom, est responsable de leur gestion. Jusqu'à présent, Synatom ne demande pas de considérer ses combustibles irradiés comme matières excédentaires et donc comme déchets. Toutefois, en l'absence de retraitement desdits combustibles, ceux-ci finiront *de facto* par devoir être considérés comme déchets et seront confiés à l'ONDRAF. L'ONDRAF est tenu, par la résolution de la Chambre du 22 décembre 1993, de placer sur un pied d'égalité l'étude de la gestion à long terme des déchets de retraitement des combustibles³⁷ et celle des combustibles irradiés non retraités. L'ONDRAF doit donc inclure tant dans son inventaire technique de déchets que dans ses scénarios de gestion à long terme, y compris le stockage géologique, l'éventualité que les combustibles usés (c'est-à-dire irradiés non retraités) soient considérés un jour comme déchet (ONDRAF, 2011a).

Les combustibles ne sont pas les seuls à goûter à la question shakespearienne d'être ou ne pas être [un déchet]. Certains déchets solides de longue durée de vie, et majoritairement de très faible et faible activités, entreposés en vrac dans des installations provisoires UMTRAP et « Bankloop » d'Umicore³⁸ à Olen ont un statut encore en discussion. Il s'agit de déchets radifères c'est-à-dire de déchets contenant du radium et qui trouvent essentiellement leur origine dans des activités historiques de production de radium sur le site

³⁷ Il serait cependant naïf de croire que la Belgique récupère des déchets conditionnés issus de ses propres combustibles envoyés pour retraitement. Le retraitement des combustibles a lieu à l'étranger et les contraintes sont telles que les déchets de retraitement conditionnés récupérés par la Belgique sont en fait des déchets « équivalents » c'est-à-dire des déchets dont les caractéristiques radiologiques et physico-chimiques sont équivalentes à celles des combustibles envoyés pour retraitement. L'équivalence est établie selon un système d'Unités des Résidus, établi par la société AREVA NC (devenue Orano). Ces règles d'attribution des résidus ont été soumises par Synatom à l'ONDRAF qui les a approuvées (ONDRAF, 2011).

³⁸ Anciennement Union Minière.

d'Olen et dans les applications spécifiques du radium³⁹. Ces déchets ne sont pas encore visés par le système de gestion de l'ONDRAF⁴⁰ et se caractérisent par de très grands volumes. Si ces déchets radifères prennent le statut de déchet radioactif au sens légal ou réglementaire, tel qu'évoqué dans l'introduction de ce chapitre, ils devraient alors être traités de façon tout à fait spécifique, vraisemblablement comme des déchets dits « B » dans la classification belge et seraient dès lors destinés à l'enfouissement géologique⁴¹. La catégorisation est donc un premier pas vers la gestion et la question du statut de déchets radioactif est loin d'être innocente.

³⁹ Les activités de l'usine d'extraction de radium et d'uranium exploitée par l'ancienne Union Minière (devenue Umicore en 2001) entre 1922 et 1977 et démantelée ensuite sont à l'origine de situations très hétérogènes au niveau radiologique dans la commune d'Olen. « Umicore possède à Olen deux installations d'entreposage autorisées en tant qu'installations de classe II : l'installation UMTRAP et l'installation Bankloop, qui contiennent toutes deux des déchets radioactifs provenant pour la plupart directement ou indirectement des activités de l'ancienne usine d'extraction de radium et d'uranium.

L'installation d'entreposage UMTRAP, construite dans les années quatre-vingt par l'ancienne Union Minière, et qui a été autorisée pour une durée indéterminée en 1991 par le Service de Protection contre les radiations ionisantes (SPRI), l'autorité de sûreté de l'époque, contient des déchets non conditionnés de longue durée de vie et de faible ou moyenne activité. Selon les conditions d'octroi de l'autorisation définies dans l'arrêté royal n°0315 du 20 juin 1995, Umicore doit étudier les mesures de gestion relatives à ces déchets qui seront nécessaires à l'avenir et informer régulièrement l'ONDRAF de l'évolution et des résultats de cette étude. Le rapport final, accompagné de l'avis de l'ONDRAF, doit être soumis à l'AFCN pour approbation. L'AFCN n'a toutefois pas indiqué de délai pour l'achèvement de cette étude. L'installation UMTRAP contient environ 55 000 m³ de déchets radioactifs (masse volumique moyenne de 1 400 kg·m⁻³), qui représentent une activité totale estimée à 38 000 GBq :

- des sources de radium, des résidus d'extraction d'uranium et des résidus riches en radium, qui sont entreposés dans des casemates en béton recouvertes d'un confinement en cuivre ;
- des résidus pauvres en radium, qui sont entreposés dans des silos entre les casemates ;
- des résidus divers et des terres contaminées, qui occupent les espaces entre les silos et les casemates.

L'ensemble est recouvert d'argile, de sable et de gravier.

L'installation d'entreposage Bankloop, autorisée par l'AFCN en 2006 pour une durée de 10 ans, renferme environ 30 000 m³ de déchets non conditionnés de longue durée de vie et de très faible et faible activité (activité totale : 140 GBq) issus de l'assainissement en 2007–2008 d'un petit ruisseau, le Bankloop, et d'une bande de terrain contaminée d'environ 10 mètres de part et d'autre de celui-ci » (ONDRAF, 2015).

⁴⁰ Situation en 2020.

⁴¹ Les discussions en cours avec l'AFCN semblent dégager des pistes de gestion *in situ*, non nécessairement géologiques. Si ces pistes se concrétisent, il s'agira alors d'une dérogation.

Cette notion d'absence d'usage, plus encore peut-être que celle de nocivité qui, elle, peut être discutée scientifiquement⁴², augmentée de la perspective d'une gestion éventuellement difficile (cas des déchets radifères en grandes quantités) renforce le caractère particulièrement politique sinon arbitraire de l'objet « déchet radioactif ». Le droit international européen souligne l'autorité de l'Etat membre à ce sujet :

« déchet radioactif : une substance radioactive sous forme gazeuse, liquide ou solide pour laquelle aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée par l'État membre ou par une personne morale ou physique dont la décision est acceptée par l'État membre, et qui est considérée comme un déchet radioactif par une autorité de réglementation compétente dans le cadre législatif et réglementaire de l'État membre » - extrait de la Directive 2011/70/Euratom, article 3, § 6 (EC, 2011).

Au-delà de la réalité physique du contenu en substances radioactives, un déchet radioactif n'est donc déclaré comme tel que s'il y a une volonté politique de le faire, fût-ce cette volonté encadrée réglementairement. Comme le souligne Parotte C., c'est le régulateur, à savoir en Belgique, l'AFCN qui décide officiellement du statut de certaines substances, notamment « les « hors catégories » comme les déchets NORM (Naturally Occurring Radioactive Materials) ou les déchets radifères, mais c'est bien au gouvernement qu'il appartiendra de statuer sur le statut du combustible usé (Parotte, 2016).

Il appert dès lors que la définition du déchet radioactif ou du déchet nucléaire n'est pas neutre ou univoquement déterminée scientifiquement. Elle reflète déjà l'idée d'une certaine gouvernance. La seule composante scientifiquement établie tient dans le « radioactif » mais la notion même de déchet est un objet socio-économique, tout comme le serait la notion de minerai, uniquement déterminée par la possible utilisation industrielle des minéraux qui le constituent. Malgré des standards communs, les

⁴² Bien que frappée par les plus grandes incertitudes dans certains cas, comme celui de l'impact des faibles doses sur le corps humain. Les incertitudes liées à la science observationnelle de l'épidémiologie dans ce cas particulier sont grandes et semblent à ce jour quasi irréductibles (IRPS, 2018e).

classifications proposées des déchets radioactifs varient d'un pays à l'autre et les échanges d'information entre pays ne sont possibles que par référence à la classification internationale de l'AIEA, fixée en fonction des catégories d'activité et de durée de vie des déchets mais en ne préjugant que très grossièrement de leurs options de gestion. Ainsi l'AIEA reconnaît cette difficulté :

« Various schemes have evolved for classifying radioactive waste according to the physical, chemical and radiological properties that are of relevance to particular facilities or circumstances in which radioactive waste is managed. These schemes have led to a variety of terminologies, which may differ from State to State and even between facilities in the same State. (...) It also makes communication on waste management practices difficult nationally and internationally, particularly in the context of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management [2]. (...) » (IAEA, 2009a, §1.3)

Le contenu en radionucléides prédispose les déchets à certaines options de gestion en vue de répondre aux principes fondamentaux de sûreté. Toutefois, il s'agira d'en débattre dans le dossier de sûreté qui démontrera l'option de gestion la plus appropriée comme le précise l'AIEA :

« The generic linkage between the different classes of waste and disposal options is addressed in this Safety Guide but, notwithstanding such generic linkage, the suitability of waste for disposal in a particular disposal facility is required to be demonstrated by the safety case and supporting safety assessment for the facility » (IAEA, 2009a, §1.7)

Pour les déchets « extrêmes », le débat n'est pas vraiment permis et les déchets hautement radioactifs et/ou moyennement radioactifs à vie longue devraient être destinés au stockage géologique, pour des raisons évidentes de protection radiologique à long terme.

« Disposal in geological formations has, in particular, been advocated as a long term management solution for high level and intermediate level waste. » (IAEA, 2011, §1.5)

Toutefois, certains pays décideront d'enfouir les déchets même faiblement radioactifs en les associant éventuellement aux déchets moyennement radioactifs alors que d'autres pays préféreront stocker en surface les déchets faiblement radioactifs et enfouir les moyennement radioactifs avec les hautement radioactifs. Dans le cas où les combustibles usés sont considérés comme déchets, ils sont *ipso facto* considérés comme déchets hautement radioactifs et nécessitent d'être enfouis.

2.3.2 Classification des déchets radioactifs

Comme énoncé à la section précédente, il existe une classification internationale des déchets radioactifs établie par l'AIEA. Cette classification revue en 2009 peut être illustrée de la façon suivante (figure 2-2 et tableau 2-1) :

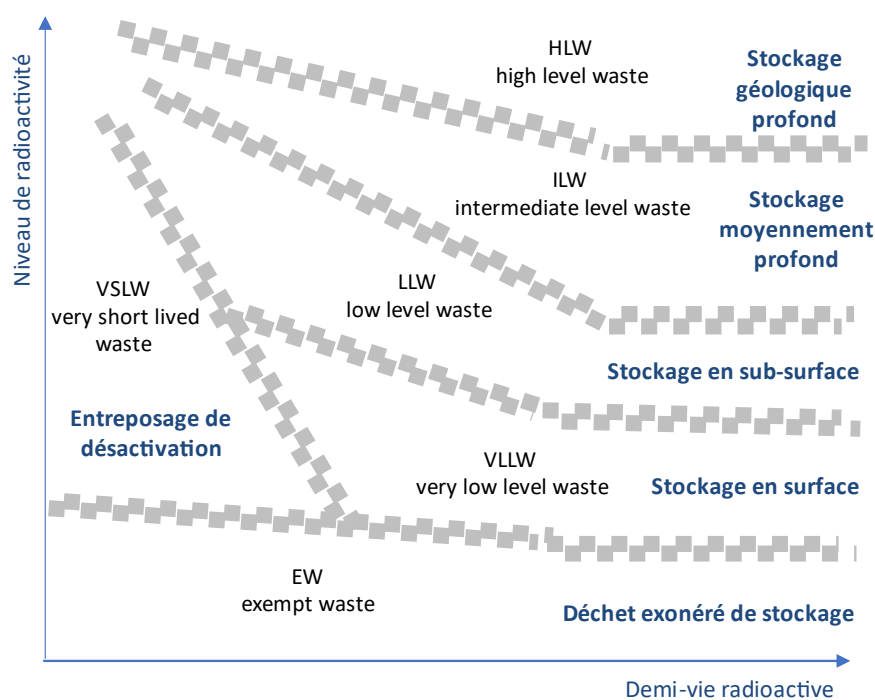


Figure 2-2 – Classification des déchets radioactifs en fonction de leur niveau de radioactivité et de la demi-vie des radionucléides qui les composent (d'après IAEA, 2009a).

Tableau 2-1 – Les différentes catégories de déchets radioactifs et leur destination finale de référence selon le consensus international [IAEA, 2009a] cité dans (ONDRAF, 2015)

Catégorie	Solution de référence	Profondeur type associée
Très faible activité	Stockage en décharge nucléaire en surface ou à faible profondeur	Profondeur allant typiquement de la surface à 30 mètres
Faible activité	Stockage en surface ou à faible profondeur	Profondeur allant typiquement de la surface à 30 mètres
Moyenne activité	Stockage à profondeur intermédiaire	Profondeur allant de quelques dizaines à quelques centaines de mètres
Haute activité	Stockage géologique profond	Profondeur généralement de quelques centaines de mètres, voire plus

Bien que cette classification ne suffise pas à déterminer une politique nationale d'un pays de façon précise, elle pose d'emblée le type de stockage auquel les déchets ainsi classifiés seront destinés e.g. entreposage de décroissance, « *landfill* », stockage de surface ou de (sub)surface, stockage de profondeur intermédiaire ou stockage géologique. Il est à noter que le stockage en profondeur intermédiaire est un concept qui a été quelque peu abandonné formellement, faute de pouvoir le distinguer du stockage géologique. L'élément discriminant étant la seule profondeur, il n'était pas aisé de distinguer un stockage à « quelques dizaines de mètres ou centaines de mètres » d'un stockage (géologique) à quelques centaines de mètres » (Torres Vidal, 2005). Les débats (sérieux) soulevant la question de savoir à partir de quel pluriel commençait « quelques » (en anglais 'a few') ou à partir de quand on pouvait parler de sous-sol (et donc de stockage « géologique ») ont eu raison de cette question. Derrière la sémantique se cachait une question de gestion extrêmement sensible. Ainsi, la Belgique envisageait, à l'époque du dossier SAFIR 2⁴³ (ONDRAF, 2001b), un stockage dans l'argile de Boom à plus ou moins 250 mètres et considérait cette option comme étant « géologique » et non comme « à profondeur intermédiaire ». Si la communauté internationale avait déclaré le stockage géologique comme

⁴³ Acronyme de : « *Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2* », une étude portant sur l'évaluation de la sûreté d'un système de stockage dans l'argile de Boom.

ayant une profondeur de 300 mètres minimum par exemple, elle aurait d'office rendu inacceptable la solution proposée par la Belgique à l'époque.

Sans vouloir polémiquer sur cette notion de profondeur intermédiaire, notons que celle-ci est encore moins bien fondée scientifiquement que la notion de déchet radioactif et il est presque surprenant que ce concept ait été un jour tenté d'être formalisé. Il n'en reste pas moins une trace dans les esprits. Les déchets moyennement radioactifs (ILW) sont destinés à un enfouissement⁴⁴. Qu'ils soient associés à des déchets faiblement radioactifs ou à des déchets hautement radioactifs, ils seront enfouis plus ou moins profondément et en fonction de concepts de sûreté dictés par le composant le plus dangereux. Ainsi la France, par exemple, choisit de stocker les déchets faiblement radioactifs et moyennement radioactifs à vie courte (déchets FMA-VC) en surface (Centre de l'Aube), les faiblement radioactifs à vie longue (déchets FA-VL) seront stockés à faible profondeur (15 à 200 mètres) et les moyennement radioactifs à vie longue (MA-VL) et les hautement radioactifs (HA) en stockage géologique à 500 mètres (projet Cigéo). C'est la durée de vie des principaux radionucléides qui composent les ILW (MA) qui va, au sein de cette classe de déchets, conditionner l'un ou l'autre type de stockage : FMA-VC et MA-VL ont donc des destinées différentes. En Belgique, les déchets conditionnés faiblement radioactifs ou moyennement radioactifs à vie courte sont des déchets dits de catégorie A et correspondent aux déchets de faible activité de la classification de l'AIEA (IAEA, 2009a). Ils sont destinés au stockage de surface. Pour ce type de déchets, une politique nationale a été adoptée en 2006⁴⁵ et le lieu de stockage – la commune de Dessel – a déjà été choisi (CPNPC, 2015 ; Conseil des ministres, 2006 ; Verwilghen, 2006). Les déchets conditionnés de faible et moyenne activité à vie longue sont des déchets dits de catégorie B et correspondent aux déchets de moyenne activité de la classification de l'AIEA (IAEA, 2009a). Ces déchets ne peuvent être admis dans un stockage de surface et devraient rejoindre

⁴⁴ S'ils sont à vie longue.

⁴⁵ En réalité, la politique nationale est constituée de deux décisions du Conseil des ministres, une décision sur le principe du stockage en 1998 (Conseil des ministres, 1998b ; Di Rupo, 1998) suivie d'une décision en 2006 statuant sur le site de cette installation. Ces décisions ayant eu lieu avant que la directive 2011/70/Euratom n'ait été écrite, la politique nationale ne répond pas au formalisme de la loi du 3 juin 2014 transposant ladite directive. Il n'en demeure pas moins que ces décisions constituent bel et bien une politique nationale.

une installation de stockage géologique⁴⁶. Les déchets conditionnés hautement radioactifs sont des déchets dits de catégorie C et correspondent aux déchets hautement radioactifs de la classification de l'AIEA (IAEA, 2009a). Ces déchets comprennent les déchets vitrifiés issus du retraitement de combustible usé des centrales nucléaires commerciales ainsi que les combustibles usés non retraités des centrales nucléaires commerciales et de certains réacteurs de recherche qui seraient déclarés comme déchets⁴⁷. Les déchets de catégorie C sont destinés à une installation de stockage géologique⁴⁸.

Cette classification ainsi que les options de gestion qu'elle suggère n'ont donc pas pour ambition de régler le problème des catégories de déchets une fois pour toutes. Ainsi, l'AIEA précise que les frontières entre les catégories de déchets ne doivent pas être perçues comme hermétiques et qu'il faut tenir compte de la situation particulière de chaque état (IAEA, 2009a, A5). L'AIEA précise encore que des paramètres quantitatifs peuvent raffiner ces classes de déchets en fonctions des exigences et des programmes nationaux (IAEA, 2009a, §21). Ainsi, la classification des déchets peut varier d'un pays à l'autre de même que les options de gestion y afférentes pour autant que celles-ci soient compatibles avec les exigences de sûreté, compatibilité qui sera démontrée dans le dossier de sûreté via les évaluations de sûreté.

Le statut du combustible usé de même que le statut des déchets NORM (dont les critères de dose peuvent être différents de ceux utilisés pour les déchets produits dans des installations nucléaires mais devront respecter l'application du principe d'optimisation radiologique) rendent compte tout particulièrement de l'influence que la perspective de gestion exerce sur cette

⁴⁶ Bien qu'il n'existe en principe aucune autre solution pour ce type de déchets, le conditionnel s'impose tant qu'une politique nationale belge n'a pas été officiellement adoptée par le gouvernement. A l'heure d'écrire ces lignes (novembre 2021), aucune décision gouvernementale n'a été prise.

⁴⁷ A l'heure actuelle (novembre 2021), il n'existe toujours pas de politique nationale statuant sur le sort de ces combustibles. En effet, le gouvernement belge ne s'est pas prononcé sur la question depuis 1993, année au cours de laquelle il a été décidé de suspendre les contrats de retraitement (Chambre des Représentants, 1993), soit près de 30 ans !

⁴⁸ Il convient de formuler la même réserve que pour les déchets de catégorie B vu l'absence actuelle (novembre 2021) de politique nationale belge à ce sujet. Rappelons que cette absence de politique constitue une infraction patente aux droits européen et international (EC, 2018).

classification⁴⁹. Comme énoncé dans l'introduction de cette thèse, le dossier de sûreté et le stockage géologique des déchets peuvent être vus comme objets dialectiques au sens proposé par Lavelle (Lavelle, 2007). Il en va de même du déchet radioactif, lui aussi soumis à des conditions théoriques et pratiques. L'idéologie théorique qui désigne l'ensemble des représentations de la connaissance scientifique faisant d'elle une pensée contemplative hors du domaine de l'action, comme l'explique Lavelle, est ici battue en brèche. Tout radioactif qu'il soit – cette propriété le rattachant rigoureusement à la physique nucléaire – le *déchet radioactif* est avant tout le fruit d'une pratique industrielle qui s'ancre dans un contexte historique et socio-économique et auquel la science se rattache mais sans pour autant en épuiser le concept. C'est en ce sens un objet de technique qui embrasse tant la connaissance que la pratique.

L'objet d'étude fondamental du dossier de sûreté à savoir le déchet radioactif est donc empreint d'une histoire et d'une gouvernance, il n'entre pas dans une taxinomie univoque et universelle. Le déchet radioactif est donc un objet complexe, « engagé », et il porte un pedigree. Il est, à lui seul, source de divergences entre experts qui entrevoient déjà, dans sa caractérisation et sa classification, un mode de gestion et donc une politique.

⁴⁹ Comme mentionné, dans le cas des déchets NORM, les énormes volumes tendent à faire raisonner les autorités en termes pragmatiques davantage qu'en termes de doctrine.

Chapitre 3 Stockage géologique des déchets radioactifs

Tout comme pour le chapitre précédent consacré aux connaissances fondamentales sur la radioactivité et la protection radiologique, ce chapitre, dédié à la gestion à long terme des déchets radioactifs par le biais d'installations de stockage, ne saurait être exhaustif. Nous avons souhaité nous limiter à un bref exposé des notions techniques qui nous semblaient pertinentes pour la discussion de notre question de recherche.

Nous nous intéressons en particulier aux stockages géologiques. Ceux-ci sont considérés actuellement comme la seule solution possible pour la gestion à long terme des déchets hautement radioactifs et/ou de longue durée de vie (IAEA, 1997 ; IAEA, 2003b ; IAEA, 2011a ; IAEA, 2011b ; NEA, 1995 ; EC, 2011 ; ICRP, 2013 ; CoRWM, 2018 ; Blue Ribbon Commission, 2012 ; AFCN, 2015a ; Chapman et Hooper, 2012). Ils reposent sur la combinaison d'une barrière naturelle géologique (*roche hôte*) et de barrières ouvragées. Les stockages (géologiques) reposent essentiellement sur le principe de *sûreté passive* à long terme, c'est-à-dire qu'ils garantissent une sûreté à long terme sans qu'une intervention humaine ne soit nécessaire⁵⁰ (IAEA, 2011b, p. 28). Nous ne nous intéressons pas, dans le cadre de notre question de recherche, aux stockages de surface destinés, en principe, à n'accueillir que des déchets dont le contenu se limite à des radionucléides à vie courte (i.e. période inférieure ou égale à 30 ans), même s'il arrive que de telles installations contiennent également des *traces* de radionucléides à vie longue. Les

⁵⁰ Ce point fait souvent l'objet de polémique. Le fait que le système ne requière pas d'intervention humaine n'implique pas qu'une surveillance humaine ne soit pas possible pendant une période à définir. Le système est conçu pour s'accommoder de l'oubli mais ne l'impose pas.

stockages de surface et de subsurface sont destinés à la gestion à long terme de déchets faiblement radioactifs, voire de certains déchets moyennement radioactifs à vie courte (IAEA, 2009a ; IAEA, 2011b).

Dans ce chapitre, nous abordons les objectifs et la stratégie générale d'un stockage géologique (voir section 3.1) et les composants principaux de la stratégie de sûreté (voir section 3.2) avant de conclure sur la situation belge actuelle (voir section 3.3).

3.1 Stratégie générale de sûreté : isoler et confiner

L'objectif d'un stockage de déchets, qu'il soit en surface, à faible profondeur ou géologique est de placer les déchets dans une situation qui les met à l'abri des intrusions humaines et de l'eau qui, lorsqu'elle s'écoule⁵¹, constitue le principal vecteur de transport des radionucléides vers la biosphère (IAEA, 2011b, p. 49 ; Alexandre, 1997, p. 184 ; Allègre, 1997, p. 175).

Lorsque l'on parle de « mettre les déchets à l'abri », ce qu'il faut surtout comprendre c'est que l'on cherche à *isoler* les déchets de l'homme et l'environnement (IAEA, 2011b ; ONDRAF, 2020f) et à les *confiner*. Si les évaluateurs de sûreté envisagent bel et bien des scénarios de réelle intrusion dont il faut pouvoir se prémunir, il s'agit surtout, en règle générale, de garantir un milieu stable et favorable à la préservation de l'intégrité des déchets sur de très longues échelles de temps. Cet *isolement* des déchets vise à les soustraire à la société humaine et à ses aléas. Il y a en effet un choc de temporalités entre la vie humaine, l'histoire d'une société humaine et la période radioactive. Cette dernière, en ce qui concerne les radionucléides présents dans les déchets radioactifs destinés à l'enfouissement géologique, varie entre plusieurs milliers d'années et plusieurs millions d'années. La continuité de l'ordre social ne peut être postulée sur de telles échelles de temps (Allègre, 1997, p. 174). Par conséquent, construire une installation qui

⁵¹ La présence d'eau est souvent inévitable mais c'est surtout son écoulement qui est craint. Un transport par advection des radionucléides doit être évité alors qu'un transport diffusif (très lent) dans l'eau des pores de la roche est gage de sûreté.

requerrait une surveillance et un soin constants à l’abri des accidents, des sabotages, des guerres... ne pourrait garantir la sûreté à long terme. Nous pouvons dire que les seuls processus sur terre qui semblent pouvoir rivaliser avec de telles temporalités sont les processus géologiques d’évolution lente par nature⁵².

Le premier rôle d’une barrière géologique – l’*isolation*⁵³ – est donc d’assurer la stabilité d’un milieu propice à l’accueil des déchets. Un milieu dont l’évolution intrinsèque ne dépendra pas de celle de la société humaine. Pour peu que l’on prenne soin d’éviter des zones géologiques en pleine activité tectonique, toute une série de configurations géologiques peuvent convenir. Un corollaire de cette stabilité est la distance physique créée *de facto* entre le déchet et la biosphère. Cette distance est réalisée par la profondeur d’enfouissement (IAEA, 2011b, p. 51) bien que ce paramètre ne suffise pas à lui seul à garantir la sûreté comme nous l’expliquons ci-après.

Le deuxième rôle d’une barrière géologique découle de l’objectif de prévenir les écoulements d’eau. Il s’agit du *confinement* des radionucléides (IAEA, 2011b, p. 10). Ce rôle ne sera pas assuré par la seule géologie mais cette dernière y contribuera grandement. Il s’agit de retarder l’inexorable migration des radionucléides hors de la matrice du déchet de façon que l’activité de ceux-ci ait suffisamment décru pour ne plus représenter un danger lorsqu’ils atteindront la biosphère. Il ne s’agit donc pas de garantir un confinement absolu pendant des millions d’années mais bien d’agir sur le retard de leur migration. Le confinement est donc un processus dynamique.

⁵² Nous considérons ici l’intégralité d’un processus et non pas l’une de ses possibles manifestations au moment même de leur jaillissement (e.g. éruption volcanique, séisme).

⁵³ Il y a lieu de prévenir ici un possible commentaire des linguistes sur le choix (judicieux ou non) du mot « isolation » plutôt que « isolement ». Rappelons que « isolement » désigne un *état* d’un système ou d’une personne qui, respectivement, soit s’oppose au passage d’un courant électrique soit fait l’objet d’une distanciation (sociale) (Le Petit Robert, 1987) alors que « isolation » désigne l’*action* d’isoler. Il y aurait donc probablement lieu de faire la distinction, en français, entre l’état du système résultant des actions prises pour l’isoler (isolement) et lesdites actions ayant permis d’obtenir cet état (isolation). On devrait donc parler de l’isolement des déchets et des barrières contribuant à l’isolation. Toutefois, le mot technique étant issu de l’anglais (isolation) qui ne comporte pas cette nuance, le jargon maladroît des ingénieurs francophones utilise « isolation ».

Notons qu'une barrière géologique est à la fois constituée de la *roche hôte* qui assure essentiellement le rôle de *confinement* et de *l'environnement géologique* de cette roche qui participe activement à la distance d'*isolation*, comme l'illustre la figure 3-1. L'isolation est donc prodiguée par la *roche hôte* et son *environnement*.

La géologie est secondée dans ses fonctions par des barrières ouvragées dont l'un des principaux défis est d'être complémentaire et compatible avec la géologie à l'examen. Ces barrières ouvragées renforcent le rôle d'*isolation* des déchets en ajoutant entre les déchets et la biosphère déjà séparés par la géologie, des interfaces de béton, d'acier ou de bentonite. Ces barrières renforcent également le rôle de *confinement* assuré par la géologie. Par exemple, la migration des radionucléides sous gradient thermique élevée étant méconnue, il a été jugé préférable de trouver une solution d'ingénierie pour les déchets chauffants⁵⁴ de façon à assurer un confinement total (encapsulation) pendant une période au moins égale à celle de leur phase thermique⁵⁵ (Chapman et Hooper, 2012 ; IAEA 2011b). Ce confinement particulier et absolu se traduit en anglais par *containment* et n'a pas d'équivalent direct en français. Nous avons pris le parti, en anglais, de parler de *engineered containment* de façon à insister sur la part de confinement réalisée par les ouvrages d'art et non par la géologie (ONDRAF, 2020f). D'autres programmes parlent de *absolute containment* ou de *complete containment* (Nagra, 2002, p. VII ; Nagra, 2002, p. IX, p. 23). Pendant toute la durée de cette période thermique, les radionucléides sont piégés dans les barrières ouvragées et ne peuvent sortir du système. Pour que cette fonction puisse être garantie, il importe de vérifier que les barrières ouvragées ne seront pas elles-mêmes attaquées par l'environnement géologique qui les entoure. En effet, la présence d'eau peut induire des phénomènes de corrosion. Nous n'entrons pas ici dans les détails et signalons simplement

⁵⁴ Les déchets hautement radioactifs émettent de la chaleur. Il s'agit des déchets de catégorie C. Dans un premier temps, il s'agit essentiellement de la décroissance des couples de radionucléides suivants : Sr-90/Y-90 et Cs-137/Ba-137m qui dominent la production de chaleur. Après 300 ans (i.e. à peu près 10 demi-vies de Sr-90 et Cs-137), la production de chaleur est principalement due à des produits de fission à longue vie ainsi que par les actinides (plus spécifiquement Pu-239, Pu-240 et Am-241) (Sillen et Marivoet, 2007, §2.1.1).

⁵⁵ La phase thermique est définie comme la période au cours de laquelle la température de la roche hôte se situe au-dessus de l'intervalle de températures au sein duquel on observe les propriétés nominales de migration des radionucléides (Van Geet, 2008).

que ces questions sont étudiées depuis de nombreuses années, notamment dans le programme belge, en coopération internationale (Kursten, 2019a ; Kursten, 2019b).

Comme nous le mentionnions précédemment, une fois que les radionucléides s'échapperont de ces barrières ouvragées, il importe que leur transport soit le plus lent possible, de manière à permettre à la décroissance naturelle de leur activité d'opérer avant qu'ils n'atteignent la surface. Ce déplacement est assuré, dans la plupart des concepts, par la diffusion au sein de la roche hôte qui constitue un milieu poreux. La diffusion est un phénomène extrêmement lent par opposition à un transport qui se ferait par advection (i.e. écoulement d'eau). Cette seule diffusion constitue déjà une des *fonctions de sûreté* de la barrière géologique, concept sur lequel nous reviendrons dans la sous-section suivante.

Aux côtés du confinement ouvragé, il y a donc un confinement naturel prodigué par le système dans son ensemble et auquel contribue largement la barrière géologique. Cette partie du confinement total repose sur les processus de retard (*retardation*) dont la diffusion (ou transport diffusif) fait partie. Cette contribution est parfois appelée *system containment* ou plus fréquemment *retardation (R)*.

Pour éviter toute ambiguïté terminologique, nous dirons que la *stratégie de sûreté* (IAEA, 2011b) repose sur deux *piliers* de sûreté : l'*isolation* et le *confinement* afin de distinguer ces deux rôles distincts et complémentaires du stockage géologique des *principes de sûreté* (sur lesquels repose la *démonstration de sûreté*) tels que la défense en profondeur ou la robustesse par exemple et des *fonctions de sûreté* (sur lequel repose le *concept de sûreté*). Même si « isoler et confiner » est souvent décrit en soi comme une stratégie (IAEA, 2011b), la *stratégie de sûreté* a une portée plus large et peut se définir comme l'approche intégrée de haut niveau qui permet de réaliser un stockage sûr (NEA, 2004a). Elle définit comment le stockage sera réalisé (i.e. *concept de sûreté*) en tenant compte des *circonstances existantes*. Cette stratégie est nécessaire afin d'articuler les *principes de sûreté* aux *choix stratégiques*, aux exigences de haut niveau et au *concept de sûreté*. Elle établit également la stratégie de gestion qui permettra de s'assurer, tout au

long de la réalisation de l'ouvrage de stockage, que lesdits principes de sûreté sont effectivement respectés.

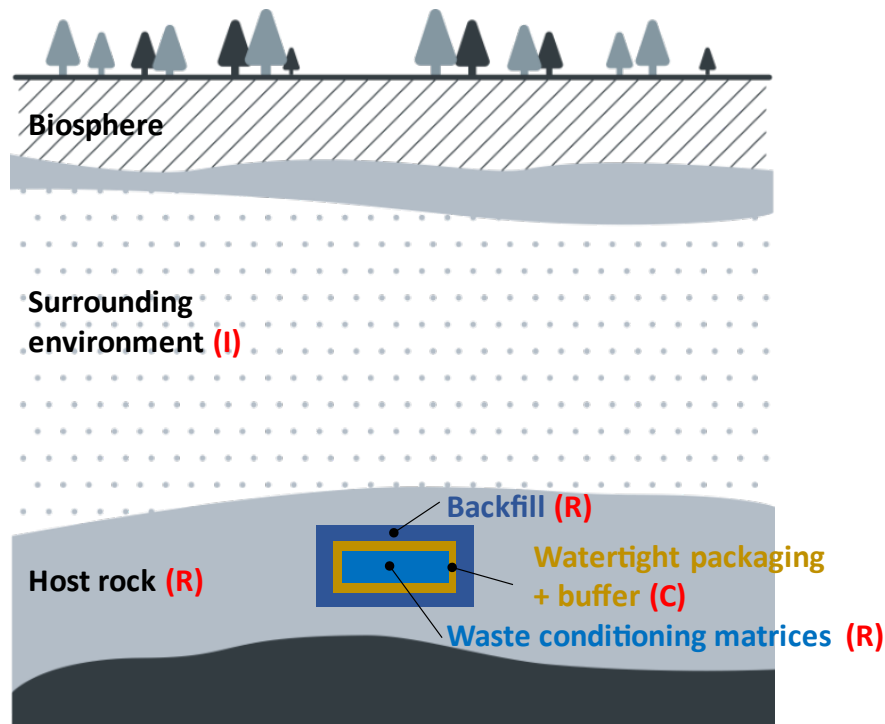


Figure 3-1 – Représentation schématique de la stratégie d'isolation et de confinement d'un stockage géologique. L'isolation est désignée par la fonction I sur la figure. Le confinement est représenté par la fonction de sûreté R (retardation) assurée par la roche hôte mais aussi partiellement par certaines barrières ouvragées. La matrice de déchet ainsi que le remblayage de la galerie contribuant à cette fonction R. Quant à la fonction de sûreté C (engineered containment), elle concerne les déchets chauffants et est assurée par un dispositif d'overpack et de buffer détaillé à la section 3.2 (ONDRAF, 2020f).

Notons que la stratégie d'*isolation* et de *confinement* s'oppose à la stratégie de *dilution* et *dispersion* (e.g. rejet en mer), qui prévalait historiquement et qui est aujourd'hui interdite par le droit international (IAEA, 1995 ; IAEA, 2011b ; UN, 1958 ; UN, 1972 ; IMO, 1972)⁵⁶.

3.2 Composants principaux de la stratégie de sûreté

L'ONDRAF s'est distingué en approfondissant tout particulièrement l'articulation théorique entre les différents composants de la stratégie de sûreté ainsi qu'en liant la stratégie de sûreté aux éléments situés en amont (e.g. le cadre réglementaire) et en aval (e.g. le système de gestion). Ce travail a été le fruit d'interactions tant au niveau international qu'avec l'AFCN pendant plus de dix ans. Nous nous inspirons de ces développements (ONDRAF, 2020f) pour décrire les principaux éléments constitutifs d'une stratégie de sûreté.

La figure 3-2 ci-dessous donne un aperçu de ceux-ci. La boîte supérieure nommée « *Contextual framework* » désigne tous les éléments contextuels externes au développement du système de stockage mais contraignant celui-ci. Il s'agit notamment des exigences légales et réglementaires mais également de principes fondamentaux comme le développement durable, la justice, la prudence, ... ainsi que les conditions supplémentaires qui pourraient être imposées par la société civile au cours du processus allant du

⁵⁶ L'arrêt des rejets en mer s'est fait progressivement puisque la Convention des hautes mers ne les interdisait pas formellement mais exigeait de réduire la pollution en conformité avec les standards internationaux de l'époque (UN, 1958, art. 25 §1). Cette convention n'est entrée en vigueur qu'en 1962. L'AEN a coordonné les rejets en mer pour l'ensemble des pays de l'OCDE à partir de 1967 dans le respect des recommandations de l'AIEA émises en 1961. La déclaration de Stockholm de 1972 a dépassé le simple stade des seuils de rejets à respecter en introduisant le concept de capacité de l'environnement à digérer les substances toxiques, faisant un pas, nous le pensons, vers ce qui deviendra plus tard le concept de « développement durable » (UN, 1972, principe 6). La Convention de Londres de 1972 (entrée en vigueur en 1975) interdira le rejet de déchets hautement radioactifs en mer et conditionnera le rejet des autres types de déchets à des autorisations spéciales (IMO, 1972). Au cours de la 16^e réunion de la Convention de Londres, les parties décident d'arrêter tout rejet en mer pour des raisons éthiques. Nous sommes alors en 1993, un an après la déclaration de Rio...

choix du site jusqu'à la fermeture de l'installation de stockage et même au-delà (ONDRAF, 2017a). La boîte située immédiatement en dessous désigne la stratégie de sûreté et s'étend sur deux niveaux conceptuels : le niveau stratégique et le niveau méthodologique. Pour ce qui est du niveau stratégique, nous distinguons deux sous-boîtes : la première est le cœur de la stratégie de sûreté et se compose des principes de sûreté, des choix stratégiques c'est-à-dire des choix de haut niveau endossés par le concepteur de stockage sur des questions pour lesquelles aucune contrainte réglementaire n'existe (e.g. installation combinée de déchets B&C), du concept de sûreté et des exigences de haut niveau, réceptacle de toutes les contraintes externes et internes au système et qui vont guider la construction de celui-ci. La deuxième sous-boîte est la stratégie de gestion comprenant tous les principes organisationnels qui permettent de vérifier que le développement du stockage respecte effectivement tous les principes de sûreté. Pour ce qui est du niveau méthodologique, deux sous-boîtes doivent être distinguées : la première, à gauche, désigne la stratégie de conception et de fonctionnement qui porte essentiellement sur les éléments d'ingénierie du stockage et la seconde, à droite, désigne la méthodologie d'évaluation de la sûreté. Ces sous-boîtes héritent en anglais du vocable « *strategy* » car il est rare que les recommandations internationales aient eu à cœur de rigoureusement distinguer ce qui relève de la stratégie de ce qui relève de la méthodologie. Il est permis de le regretter. Enfin, le dernier niveau – *implementation level* – n'est pas un élément de la stratégie mais concerne sa mise en œuvre pratique. Celle-ci est contrôlée par un système de gestion comprenant le cahier des charges d'ingénierie (*specifications*), le plan de réalisation ainsi que les résultats des évaluations de sûreté. Ces résultats constituent une donnée d'entrée pour une itération suivante de l'approche de sûreté désignée par la flèche partant sur la gauche, en bas du schéma. Deux flèches arrivent sur la gauche et par-dessus, au niveau de la stratégie de sûreté : l'une d'entre elles – *outcomes of the previous program stages* – reflète le côté itératif de l'approche et montre l'incrémentation progressive de la solution. Chaque passage complet dans l'approche de sûreté nourrit le développement suivant de ses résultats. La seconde flèche désigne les circonstances existantes, distinctes des contraintes externes. Il peut s'agir d'éléments non légiférables et qui s'imposent à toutes les parties : par exemple, la géologie de la Belgique, l'inventaire existant des déchets, etc.

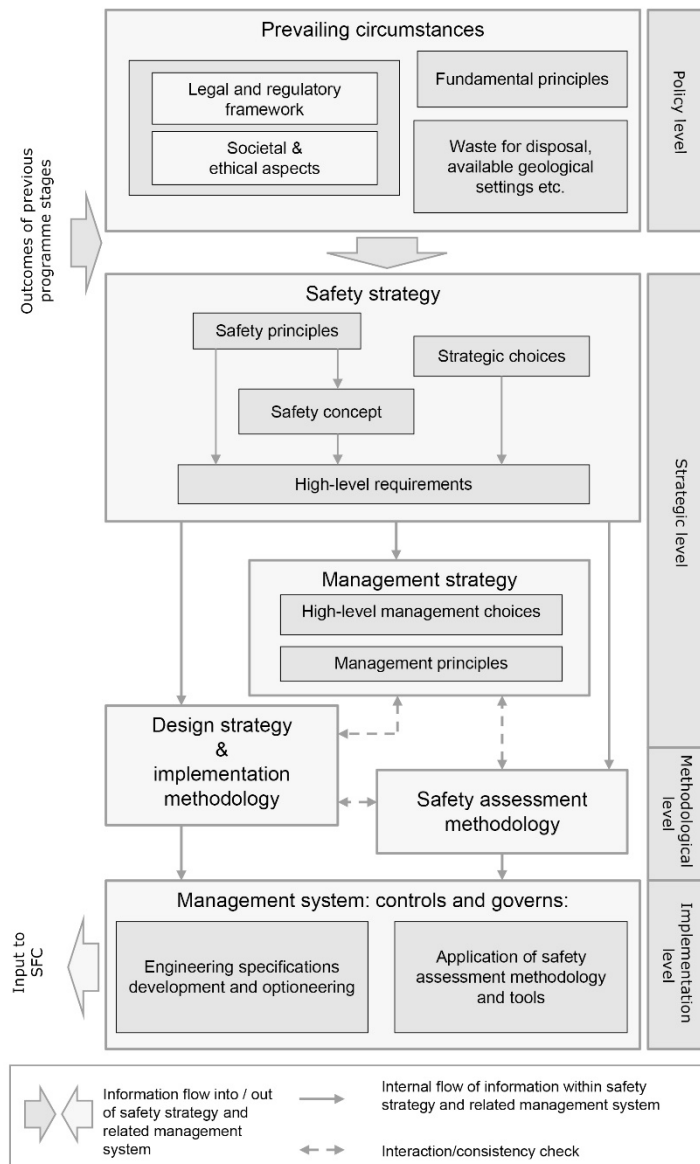


Figure 3-2 – Approche générale itérative de la sûreté selon l’ONDRAF (inspirée⁵⁷ de ONDRAF, 2020f).

⁵⁷ Il s’agit d’une évolution de l’approche générale de sûreté entreprise pour les besoins de cette thèse et que nous soumettrons comme proposition d’amélioration lors des mises à jour des documents stratégiques de l’ONDRAF.

Dans les sections suivantes, nous détaillerons les principes de sûreté ainsi que le concept de sûreté qui traduisent, selon nous, l'essentiel indispensable afin de saisir les enjeux de notre question de recherche. Nous nous appesantirons également sur l'évaluation de la sûreté qui est au cœur du dossier de sûreté. Nous nous permettrons, en revanche, d'être beaucoup plus succincts sur tous les autres éléments que nous n'évoquerons que par l'exemple.

3.2.1 Concept de sûreté et fonctions de sûreté

Les *concepts de sûreté* ainsi que les *fonctions de sûreté* peuvent être définies à différents niveaux. Concernant les *fonctions de sûreté* par exemple, celles-ci peuvent être définies au niveau du système de stockage ou au niveau de chaque composant du stockage. En Belgique, il a été décidé de définir le *concept de sûreté* au niveau du système et de décrire ensuite, en termes de rôles, la contribution de chaque composant aux *fonctions de sûreté*. Le concept de sûreté belge est un concept basé sur une roche hôte argileuse, de type argile faiblement indurée⁵⁸, comme l'argile de Boom ou l'argile yprésienne. Les concepts de sûreté dans les roches évaporitiques ou cristallines peuvent grandement en différer. Nous nous limiterons au cas belge qui partage de grandes similitudes avec tous les autres concepts argileux tels que ceux développés par la France ou la Suisse, par exemple.

Le *concept de sûreté* représente donc la conceptualisation de haut niveau du fonctionnement sûr du stockage. Il se définit par le déploiement régulier des *fonctions de sûreté* au cours du temps. Celles-ci mettent en œuvre la stratégie de confinement et d'isolation (ONDRAF, 2020f).

En regard des deux piliers de sûreté que sont l'isolation et le confinement, on définit classiquement trois fonctions de sûreté principales. Au pilier d'isolation, correspond une fonction de sûreté *isolation* (I). Au pilier confinement, correspondent les fonctions de sûreté *engineered containment* (C) et *retardation* (R). La fonction « retardation » est à son tour subdivisée en

⁵⁸ Il s'agit d'un terme de géologie. « Induré » est l'adjectif dérivé de « induration », c'est-à-dire le durcissement d'un matériau meuble (Foucault et Raoult, 1995).

trois sous-fonctions : la sous-fonction *R1* qui désigne le retard engendré par la dissolution plus ou moins lente de la matrice de déchets, la sous-fonction *R2* qui traduit le transport diffusif des radionucléides dans la roche hôte (et éventuellement dans la barrière ouvragée) et la sous-fonction *R3* qui traduit les phénomènes divers de rétention (e.g. sorption par échange de cations, diffusion de surface) des radionucléides par les différents minéraux présents dans la roche. Tous les radionucléides ne font pas l'objet de rétention et certains d'entre eux sont donc faiblement retardés (e.g. Cl-36 , I-129 , Se-79). En revanche, les actinides⁵⁹ sont quasiment immobiles dans une roche argileuse. A ces fonctions de sûreté correspondent des barrières physiques mais sans correspondance de un à un. Ainsi, par exemple, la seule barrière géologique ou *roche hôte* endosse trois fonctions de sûreté : *I*, *R2* et *R3*. Les fonctions de sûreté, définies au niveau du système, sont en redondance relative. Ainsi, si la sous-fonction *R1* était peu performante – ce qui peut être le cas, par exemple, d'une matrice de verre dans un environnement cimentaire – la sûreté globale ne sera néanmoins pas affectée dès lors que les sous-fonctions *R2* et *R3* restent très efficaces. A l'inverse, dans le cas du combustible usé, la sous-fonction *R1* est très efficace et est en redondance avec la fonction *C*. Toutes deux durent plusieurs dizaines de milliers d'années. Le déploiement des fonctions de sûreté au cours du temps est représenté par la figure 3-3 ci-dessous.

⁵⁹ Les actinides sont les éléments dont le numéro atomique est compris entre 89 et 103. Les actinides majeurs sont les noyaux d'uranium et de plutonium présents dans le combustible nucléaire tandis que les actinides mineurs sont les noyaux lourds formés dans un réacteur par capture de neutrons. Il s'agit du neptunium, de l'américium et du curium (Bonin, 2012, p. 257).

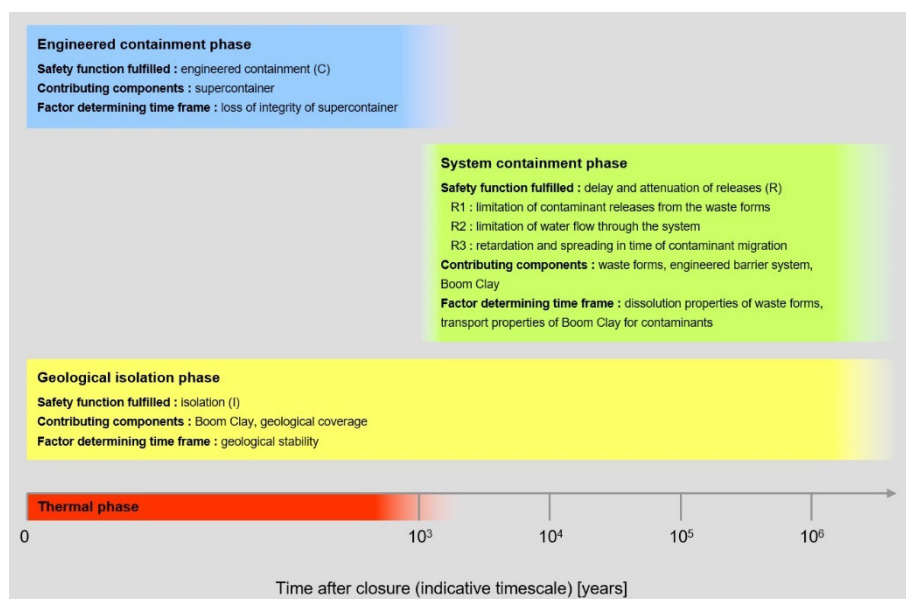


Figure 3-3 – Représentation des fonctions de sûreté au cours du temps dans le concept de l'ONDRAF. La phase de engineered containment (C) est spécifique aux déchets chauffants (les déchets hautement radioactifs vitrifiés issus du retraitement du combustible usé et/ou le combustible usé déclaré comme déchets et mis en stockage). La période correspondant à la phase thermique est représentée en rouge (ONDRAF, 2009b).

La redondance est également visible dans les contributions de multiples composants à une même fonction de sûreté de sorte que même si le concept dit « multibarrière » a fait historiquement place à un système « multifonctions », ces deux perspectives se complètent l'une l'autre, dans la pratique. Si l'on examine le concept belge de superconteneur pour les déchets de catégorie C, on peut voir la superposition de barrières ouvragées autour du déchet comme l'illustre la figure 3-4 ci-dessous.

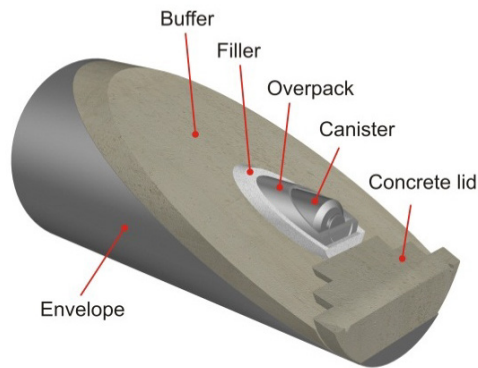


Figure 3-4 – Représentation du concept de superconteneur pour un déchet vitrifié de catégorie C. Sur cet écorché, on peut voir l’emballage primaire du déchet conditionné (canister), son suremballage d’acier (overpack), l’environnement cimentaire entourant l’« overpack » et constitué du « filler » et du « buffer », eux-mêmes contenus dans une enveloppe d’acier inoxydable (ONDRAF, 2013).

Le rôle joué par chaque composant du stockage par rapport à une fonction de sûreté donnée est analysé en détail lors de l’élaboration du concept de sûreté. La complémentarité des structures, systèmes et composants (SSC) est résumée dans le tableau ci-après (encadré 1).

Encadré 1 – Exemples de contribution de différents éléments de structure aux fonctions de sûreté à long terme. Les phases IV et V concernent la période de sûreté à long terme tandis que les phases I à III, non représentées ici, se rapportent à la phase opérationnelle. La phase IV correspond à la période de contrôle institutionnel après fermeture de l'installation et la période V à la période dite de « post-fermeture » ou de sûreté passive. Le découpage Va et Vb n'est pertinent que pour les déchets C, chauffants, le Va désignant la période post-fermeture correspondant à la phase thermique. La lettre M (main) désigne le rôle principal du composant à l'égard de la fonction de sûreté renseignée (I, C, R1, R2, R3) tandis que la lettre S (support) désigne un rôle de soutien. Les contributions M doivent être démontrées quantitativement alors que les contributions S peuvent reposer sur une description semi-quantitative. La redondance s'assortit de la diversité. Par exemple, durant la phase IV, la fonction de sûreté R2 (i.e. transport diffusif) est assurée par le scellement de la galerie d'accès (AG, Acces gallery), par le scellement du puits ainsi que par la roche hôte, tous trois contribuant à titre principal à R2. Au cours de cette même période, la fonction de sûreté C des déchets C est principalement assurée par le suremballage en acier au carbone (overpack) aidé des composants qui l'entourent comme le buffer cimentaire, l'enveloppe en acier inoxydable et le remblayage cimentaire de la galerie de stockage. En effet, c'est la durée de vie de l'overpack qui assure la fonction C mais cette vie est particulièrement longue parce que l'overpack fait l'objet d'une corrosion uniforme avec un acier en état passivé. Cet état est permis grâce au pH élevé que lui assure l'environnement cimentaire (buffer). Quant à la corrosion par piqûres, c'est l'enveloppe en acier inoxydable qui l'en préserve. On voit ainsi comment certains composants en aident d'autres à accomplir leur fonction. DG pour « disposal gallery » désigne la galerie de stockage où les déchets sont enfouis. Le « plug » (bouchon en anglais) désigne le dispositif d'obturation d'une galerie de stockage sans retrait préalable de son revêtement. A l'inverse, le « seal » (scellement en anglais) et plus particulièrement, l'action de le poser (sealing) désigne l'obturation de la galerie (d'accès) après retrait du revêtement de celle-ci. Le seal, réalisé en bentonite, établit des conditions hydrauliques similaires à celles de la roche hôte et veille donc à assurer une homogénéité de propriétés, contrairement au simple « plug ». Le « backfill » (et l'action relative à son emplacement, le « backfilling ») désigne le remblayage de la galerie qui, dans le concept belge actuel, est réalisé en matériau cimentaire (tableau adapté de ONDRAF, 2020f).

Systems, Structures and Components (SSC)		Long-term safety functions														
		C			R1			R2			R3			I		
		Time frames														
		IV	Va	Vb	IV	Va	Vb	IV	Va	Vb	IV	Va	Vb	IV	Va	Vb
C waste and spent fuel	SC – overpack	M	M													
	SC – concrete buffer & filler	S	S													
	SC – envelope	S	S													
	Backfilling C (Plug DG C)	S	S													
B and C waste and spent fuel	(Concrete lining)															
	AG – sealing (AG – backfilling)						M	M	M							
	Shaft - sealing						M	M	M				M	M	M	
	Shaft – backfilling (and surface restoration)												M	M	M	
	Active surveillance												M			
	Host rock						M	M	M	M	M	M	M	M	M	

3.2.2 Les principes de sûreté

S'il existe un consensus international sur l'existence de principes de sûreté, force est de reconnaître que la classification de ceux-ci varie d'un pays à l'autre. Ainsi l'AIEA, dans ses fondamentaux de sûreté, énonce comme principes de sûreté, la responsabilité, le rôle du gouvernement ; la capacité de direction et de gestion ; des principes issus directement de la protection radiologique tels que la justification, l'optimisation et la limitation des risques ; la protection des générations actuelle et futures ; la prévention des accidents, etc. (IAEA, 2006c). L'AFCN souligne quant à elle, le fait qu'aux côtes des trois principes de protection radiologique (i.e. justification des pratiques, optimisation et limites des doses), ce sont les principes de défense en profondeur et de démonstrabilité qui constituent les principes sous-

tendant le cadre réglementaire belge pour le stockage géologique (Bernier *et al.*, 2017). Le choix de ces deux principes comme orientations fondamentales rejoint d'ailleurs la position du régulateur français (ASN, 2008). Ces deux principes ne figurent cependant pas comme principes de sûreté dans les fondamentaux de sûreté de l'AIEA. En revanche, nous les retrouvons comme éléments de l'approche de sûreté dans des publications de l'AIEA dédiées aux stockages, aux côtés de la caractéristique de sûreté passive (IAEA, 2011a ; IAEA, 2011b). Tenant compte des interprétations larges du principe d'optimisation qui incluent le principe des *Best Available Techniques (Not Entailing Excessive Costs)* ou BAT(NEEC) (AFCN, 2011e ; ICRP, 2013) ainsi les guidances techniques de l'AFCN (AFCN, 2014b) introduisant notamment la *robustesse* comme un élément essentiel du stockage, l'ONDRAF a consolidé toutes ces exigences en principes de sûreté afin de guider sa stratégie. L'ONDRAF retient ainsi les principes de sûreté suivants : *sûreté passive, robustesse, défense en profondeur, démontrabilité, optimisation* et *BAT(NEEC)* (ONDRAF, 2020f). Ces principes de sûreté sont distingués des trois principes de radioprotection (justification, optimisation et limites de doses) ainsi que des principes éthiques (e.g. justice intra- et intergénérationnelle) et de gouvernance comme le principe du pollueur-payeur, la protection des générations futures, etc. (ONDRAF, 2017a). Concernant le principe d'optimisation en tant que principe de sûreté, sa filiation avec le principe d'optimisation radiologique est évidente mais comme cette filiation constitue l'une des principales réflexions de notre question de recherche, nous n'en dirons pas davantage dans cette introduction afin de laisser le déploiement de cette réflexion pour la suite (voir chapitres 6 à 9).

3.2.2.1 Le principe de sûreté passive

La sûreté passive est le principe fondamental qui permet de distinguer une installation d'entreposage, temporaire par définition, d'un stockage à vocation définitive. Toutes les instances internationales requièrent que les stockages soient conçus, construits et exploités de manière que la sûreté après fermeture repose sur des moyens passifs, c'est-à-dire des moyens qui ne requièrent aucune action humaine (IAEA, 2011b ; EC 2011 ; NEA, 1995 ; NEA, 1995 ; ICRP, 2013). Ce principe découle de la volonté d'éviter l'imposition de charges indues aux générations futures, un des principes

souverains de la gestion des déchets radioactifs (IAEA, 1995 ; NEA, 1999). Il s'agit donc d'utiliser des composants qui ne requièrent ni source extérieure d'énergie ni maintenance (IAEA, 2007b), ce qui les affranchit de tout contrôle humain. La sûreté passive est un principe fondateur de l'approche de sûreté des stockages géologiques (ANDRA, 2005).

Remarquons l'évidente intelligibilité mais aussi l'extrême ambiguïté de ce principe. Bien que découlant de la volonté d'exempter les générations futures de charges indues de gestion et de décision – principe largement accepté et étrangement⁶⁰ très peu questionné dans le milieu des déchets nucléaires – le principe de sûreté passive est celui qui cristallise toutes les objections aux stockages sans pour autant être nommé cité. Lorsque d'aucuns dénoncent un enfouissement « à tout jamais, sans contrôle »⁶¹, c'est bien le principe de sûreté passive qui est à l'examen et qui suscite la crainte et la défiance. Etrangement, la vulnérabilité humaine et l'instabilité de nos sociétés ne semble pas effrayer le citoyen ou le politique alors qu'elles constituent un facteur rédhibitoire chez les experts. Nous n'avons pas choisi de commenter plus avant ce phénomène car il ne relève pas directement de notre question de recherche. Toutefois, nous ne résistons pas à souligner cette ambiguïté car elle révèle le caractère abstrait de la sûreté et surtout le fait que celle-ci ne convainc pas. Sans doute, pour réellement en débattre, aurait-il lieu d'oser invoquer davantage les raisons de *sécurité*⁶² qui poussent également à choisir le stockage. Il est symptomatique de constater que la peur des séismes, même dans des contrées aussi peu sismiques que la Belgique, sur des installations de stockages qui y seraient par ailleurs insensibles semble plus bien grande que celle du terrorisme ou du banal accident industriel sur les installations existantes d'entreposage en surface.

⁶⁰ Nous le discuterons au chapitre 7.

⁶¹ Expression issue d'une déclaration du député Jean-Marc Nollet sur laquelle nous reviendrons ultérieurement. Communiqué par agence Belga, publié le vendredi 9 février 2018 ; https://www.rtbf.be/info/belgique/detail_l-ondraf-propose-un-enfouissement-passif-des-dechets-nucleaires-jean-marc-nollet-s-insurge?id=9835938 [Consulté le 4 décembre 2019].

⁶² Nous reviendrons sur l'acception des termes sûreté et sécurité dans la première partie. Notons simplement que la sécurité nucléaire consiste à se prémunir des actes humains malveillants (e.g. sabotage, terrorisme, guerre) alors que la sûreté concerne l'occurrence de phénomènes délétères soit d'origine naturelle soit d'origine humaine non malveillante (e.g. accident, intrusion par inadvertance).

Le risque éloigné, faible et abstrait relevant de la *sûreté* exerce une fascination qui occulte, dans les médias et les débats citoyens, une tendance bien plus dangereuse, celle du déni d'un risque élevé, proche et extrêmement tangible relevant de la *sécurité*. Sans doute ce principe de sûreté passive aurait-il plus de chance de convaincre l'opinion s'il était présenté comme le *principe de sûreté et de sécurité passives*.

Quoi qu'il en soit, précisons que si le principe de sûreté passive est censé garantir la sûreté d'une installation de stockage même en cas d'effondrement sociétal ou civilisationnel et donc d'une perte complète de la mémoire de ladite installation, ce principe ne s'oppose évidemment pas à ce que l'on s'en souvienne. Une surveillance physique sous la forme d'inspections ou de tests ou encore un monitoring instrumental d'une partie ou de la totalité de l'installation ainsi que de son environnement sont possibles et à l'étude (IAEA, 2001 ; IAEA, 2014 ; ICRP, 2013). Il en est de même des principes de réversibilité (décisionnelle) ou de récupérabilité des déchets. Bien que la récupération éventuelle de déchets enfouis s'oppose à la définition de la sûreté passive, ces modalités de stockages sont extrêmement plébiscitées tant socialement que politiquement (NEA, 2001 ; NEA, 2012b ; NEA, 2012c ; IAEA, 2000 ; Fondation Roi Baudouin, 2010) et l'application du principe de sûreté passive aux stockages doit donc s'en accommoder. Ceci dénote, une fois encore, la difficulté d'accepter telle quelle l'idée de sûreté intrinsèque et participe *in fine* de son ambiguïté.

3.2.2.2 Les principes de robustesse et de défense en profondeur

La notion de *robustesse* comporte différentes acceptions mais répond à l'idée générale de présenter une insensibilité relative à des événements préjudiciables. Les stockages de déchets radioactifs et, en particulier, les stockages géologiques sont des systèmes de grande robustesse dans la mesure où ils sont très peu sensibles aux événements climatiques, à la plupart des événements géomorphologiques d'amplitude modérée ainsi qu'à l'évolution de la société humaine. L'IAEA fournit des lignes directrices de manière à augmenter la robustesse des systèmes en minimisant l'occurrence de phénomènes préjudiciables et en réduisant les incertitudes quant à leurs effets (IAEA, 2006d). L'AEN distingue la *robustesse ouvragée* de la *robustesse intrinsèque*. La première consiste à adopter des dispositions

dans la conception des systèmes en vue de leur fournir davantage de résistance aux aléas comme, par exemple, le surdimensionnement de certaines barrières, tandis que la seconde rejoint l'esprit de la sûreté passive en veillant à prendre des dispositions quant à la localisation de l'installation ou sa conception de manière que l'occurrence et/ou les effets d'événements préjudiciables potentiels soient minimaux (NEA, 1999 ; NEA, 2004a).

Le concept de robustesse revêt une troisième acception qui nous vient des statistiques et touche aux estimations. Dans les problèmes d'inférence statistique, on définit notamment la robustesse d'un estimateur comme la capacité de celui-ci à ne pas être perturbé par une petite modification des données ou des paramètres du modèle de l'estimation⁶³. Notons que cette acception n'est que moyennement rigoureuse puisqu'elle agrège la notion de *résistance* et la notion de *robustesse*. En effet, en toute rigueur, la robustesse implique une « insensibilité aux écarts dus à une non-conformité aux hypothèses sous-jacentes à un modèle probabiliste » alors que la résistance permet « d'avoir une certaine insensibilité aux quelques erreurs localisées qu'il peut y avoir dans les données » (Rapacchi, 1994, p. 1). Par extension, la notion de robustesse a gagné le domaine général des évaluations, comme celle de la sûreté ou de la faisabilité. Cette robustesse désigne l'insensibilité aux incertitudes résiduelles subsistant tant dans les données que dans les modèles d'analyse. En ce qui concerne les domaines de la sûreté et de la faisabilité, cette robustesse s'obtient grâce à la fiabilité des données utilisées ainsi que par le conservatisme des hypothèses retenues dans les évaluations. En d'autres termes, les hypothèses choisies sont suffisamment souples pour s'accommoder d'incertitude résiduelles et ne pas pénaliser le résultat final (ONDRAF, 2020f). Pour diminuer le risque de confusion, il est sans doute préférable de suivre l'AIEA qui recommande plutôt l'utilisation, dans ce contexte, du terme « fiabilité » (*reliability*) (IAEA, 2012, §6.42).

⁶³ [https://fr.wikipedia.org/wiki/Robustesse_\(statistiques\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Robustesse_(statistiques)) [Consulté le 5 décembre 2021]. Ainsi par exemple, la moyenne n'est pas un estimateur robuste car l'introduction d'une valeur extrême dans un sondage en modifiera la valeur. A ce titre, la médiane est beaucoup plus robuste.

Le principe de défense en profondeur (DiD⁶⁴) est, de notre point de vue, un concept fortement lié à celui de robustesse, bien que les interprétations de ce lien puissent fortement différer selon les pays et les commentateurs, comme nous le détaillons ci-après. L'AIEA définit le concept de défense en profondeur comme un déploiement hiérarchique de mesures visant à maintenir l'efficacité des barrières placées entre les substances radioactives et les travailleurs, le public et l'environnement dans les conditions normales et accidentelles :

« Defence in depth consists of a hierarchical deployment of different levels of equipment and procedures in order to maintain the effectiveness of physical barriers placed between radioactive materials and workers, the public or the environment, in normal operation, anticipated operational occurrences and, for some barriers, in accidents at the plant. » (IAEA, 1996, p. 4)

Pour ce faire, la DiD cherche à prévenir les accidents liés aux substances radioactives et à en diminuer les effets délétères si ceux-ci devaient néanmoins avoir lieu. Elle s'organise en cinq niveaux :

- *« Level 1: prevention of abnormal operation and failures,*
- *Level 2: control of abnormal operation and detection of failures,*
- *Level 3: control of accidents within the design basis,*
- *Level 4: control of severe plant conditions, including prevention of accident progression and mitigation of the consequences of severe accidents, and*
- *Level 5: mitigation of radiological consequences of significant releases of radioactive material. » (IAEA, 1996)*

Comme les stockages reposent avant tout sur le principe de sûreté passive, la DiD originelle définie par l'AIEA dans sa publication de référence INSAG-10 (IAEA, 1996) ne peut s'appliquer comme telle et c'est ce que l'AIEA précise elle-même dans ses publications dédiées aux stockages :

⁶⁴ *Defence-in-depth*

« The possibilities for performing corrective actions to influence the evolution of a disposal facility are limited. Following closure, actions can only be taken during the period of institutional control. [...] Consequently, the focus of implementation of the concept of defence in depth for a disposal facility lies in ensuring that the design and construction of the facility will fulfil multiple complementary safety functions. » (IAEA, 2012, §6.30)

Bien que l’AIEA précise sans ambiguïté que le principe de DiD, dans le cas des stockages, se résume essentiellement au concept multifonctions ou multibarrières (IAEA, 2012 ; IAEA 2016), ce principe reste abondamment discuté dans les cénacles de spécialistes⁶⁵.

L’AFCN rejoint l’interprétation des couches complémentaires et indépendantes de sûreté comme interprétation de la DiD, que ces couches soient sous la forme de barrières ou de fonctions de sûreté ou encore sous la forme d’une combinaison des deux :

« Dès la conception, l’application du principe de défense en profondeur doit, autant que possible :

- a) empêcher que l’intégrité des barrières physiques ou des composants qui remplissent une fonction de sûreté, ne soit mise en danger ;*
- b) préserver les performances des barrières ou composants qui remplissent une fonction de sûreté lorsqu’elles/ils sont sollicité(e)s ;*
- c) reposer sur la complémentarité et l’indépendance des barrières et/ou fonctions de sûreté des composants. » (AFCN, 2017c*)*

Toutefois, l’articulation DiD et robustesse est parfois conflictuelle. En effet, il semble établi que la DiD contribue à conférer la robustesse générale du système, comme le rappelle l’AIEA :

⁶⁵ Bon nombre d’entre eux refusent l’interprétation de diversité et complémentarité des moyens de protection comme définition d’une DiD en mode passif. Ce fait est remarquable et nous vient de la pratique des réunions internationales. Nous ne pouvons que difficilement l’expliquer si ce n’est peut-être par le choc de cultures entre les experts des réacteurs et les concepteurs de stockages. Les premiers reprochant sans doute aux seconds une interprétation trop « passive » de la DiD...

« The assessment of the robustness of a disposal system relies on several elements:

- *Demonstration of the robustness of individual barriers and their safety functions.*
- *Evaluation of the defence in depth, i.e. the presence of multiple diverse safety functions, to ensure that the overall performance of the disposal system does not rely on a single safety function, the failure or unexpected poor performance of which would lead to unacceptable radiological consequences [...] » (IAEA, 2012, §6.40)*

Un point de vue que l'AFCN semble partager dans deux guidances :

« La robustesse d'un dépôt repose sur la robustesse de ses composants individuels et l'indépendance et la complémentarité de ses composants (DID). » (AFCN, 2014b)

« La robustesse des composants du système de stockage doit être évaluée [...] Cette évaluation vise notamment à montrer que les composants du système de stockage permettent d'atteindre un niveau de défense en profondeur adéquat lors des différentes phases de sa vie tel que décrit dans le concept de sûreté. » (AFCN, 2014c)

Il apparaît clairement que la robustesse globale d'un stockage repose sur la défense en profondeur, définie comme l'indépendance et la complémentarité de composants eux-mêmes robustes. Le deuxième extrait pourrait s'inscrire dans la lignée du premier puisqu'il faut évaluer la robustesse des composants individuellement afin de voir si ceux-ci peuvent contribuer à la mise en place d'une défense en profondeur adéquate. De cette façon, la défense en profondeur est bâtie sur la robustesse individuelle de composants complémentaires et indépendants et cette défense en profondeur contribue à la robustesse *globale* du système. Toutefois, d'autres interprétations de l'AFCN subordonnent la robustesse à la défense en profondeur, en définissant la robustesse comme :

« The ability to fulfil the safety functions regardless of possible disturbances and construction contingencies, [and] is also a key element of the defence-in-depth principle. » (Bernier et al., 2017)

Cette dernière approche peut surprendre puisque l'AFCN consacre les principes de défense en profondeur et de démontrabilité comme les principes de sûreté principaux qui, adjoints aux principes de protection radiologique, constituent la base du cadre réglementaire spécifique aux stockages géologiques (Bernier *et al.*, 2017). Remarquons que l'ANDRA, le gestionnaire français des déchets radioactifs, considère que les deux principaux principes de sûreté pilotant l'approche globale de sûreté sont la démontrabilité et la robustesse (ANDRA, 2005, p. 36). Ainsi, DiD et robustesse ont l'air d'être interchangeables dans la manière de guider l'approche de sûreté et il n'est pas évident de comprendre quel principe subsume l'autre. Nous constatons que l'approche française est en adéquation avec les recommandations de l'AIEA alors que l'approche du régulateur belge reste ambiguë et diffère d'une publication à l'autre.

3.2.2.3 Le principe de démontrabilité

Bien que la démonstration de sûreté constitue le principal objectif d'un dossier de sûreté, l'AIEA ne semble pas considérer la « démontrabilité » comme un principe. Dans les exigences de l'approche de sûreté, l'AIEA insiste notamment sur les dispositifs passifs de sûreté et la nécessité d'avoir une compréhension suffisante du fonctionnement du système de stockage afin d'avoir « confiance » en la sûreté (IAEA, 2011b). La référence à la démontrabilité est donc implicite. Comme l'AEN le précise également, la démonstration de sûreté ne doit pas s'entendre au sens mathématique du terme mais plutôt comme un faisceau d'arguments qui constitue un dossier de sûreté, la démonstration de celle-ci est donc indirecte (NEA, 1999) et s'apparente davantage à une plaidoirie. Bien que la démontrabilité soit retenue par l'ANDRA comme un principe général guidant l'approche de sûreté, l'agence française précise toutefois que : « *Il convient de noter que la démontrabilité est une notion relative et que la simplicité d'une vérification n'est pas un but en soi. Le dossier 2005 s'efforce de faire le meilleur usage possible de lignes d'argumentations multiples (...)* » (ANDRA, 2005, p. 36)

L'AFCN considère que la démonstration de sûreté est fournie par une compréhension suffisante de l'évolution attendue du système (AFCN, 2014b) rejoignant en cela l'exigence de l'AIEA susmentionnée mais fait, en réalité, de la démontrabilité un principe majeur (Bernier *et al.*, 2017) :

« The principle of demonstrability implies that the implementer of a disposal programme:

(1) demonstrates that the disposal facility can be constructed with the required level of performance (...).

(2) uses proven techniques or new techniques based on qualification tests.

(3) demonstrates that the effective performance of the disposal system (...); and

(4) demonstrates that uncertainties are correctly managed. »

Dans son évaluation des roches hôtes, l'ONDRAF retiendra la robustesse et la démonstrabilité comme principes de sûreté définissant, avec les propriétés de confinement et d'isolation propres à la stratégie générale, les attributs de sûreté.

3.2.2.4 Le principe d'optimisation

Le principe d'optimisation est au cœur de cette question de recherche et nous le commenterons abondamment dans les sections et chapitres suivants. Nous nous contentons ici, dans cette succincte présentation des principes de sûreté, de relever l'origine de ce principe et d'esquisser son développement.

L'optimisation d'un système industriel peut sembler être une notion facilement entendue et appartenant à la bonne pratique de l'ingénierie. Toutefois, dans le contexte de la gestion des déchets radioactifs, ce principe tisse des liens complexes à la fois avec les autres principes de protection radiologique, les principes de justification et de limites de doses, mais aussi avec tous les autres principes de sûreté puisqu'il est le seul à se retrouver à la fois dans le registre de la radioprotection et celui de la sûreté.

Le principe d'optimisation puise sa source dans la protection radiologique des années septante comme la traduction du concept ALARA « *As Low As Reasonably Achievable* » (ICRP, 1973 ; ICRP, 1977), ci-après appelé « principe ALARA », qui se rapporte au maintien des doses d'exposition au plus bas qu'il est raisonnablement possible de les maintenir, compte tenu notamment des

facteurs socio-économiques. L'AIEA en a fait un principe fondamental de sûreté (IAEA, 2006c) non pas comme un principe différent des principes de la protection radiologique mais en référence explicite à ceux-ci. Les fondamentaux de sûreté copient littéralement ceux de la protection radiologique puisqu'en écho au principe de *justification des pratiques* de la protection radiologique, on retrouve le *principe de justification des installations et activités* ; en écho au *principe d'optimisation de la protection radiologique*, celui d'*optimisation de la protection* et enfin, au *principe des limites de doses*, celui de *limitation des risques pour les personnes* (IAEA, 2006c). Est-ce à dire que les trois principes de protection radiologique ont fait l'objet d'une inclusion dans la sûreté ? C'est une question à laquelle nous tenterons de répondre dans la section 8.1. Signalons déjà que c'est le principe d'optimisation qui connaîtra la plus grande extension de sens et d'application et l'AFCN y assujettit tout le développement du système de stockage :

« Le système de stockage résulte de la mise en œuvre du principe d'optimisation de la protection contre les rayonnements ionisants. »
(AFCN, 2011e)

Nous verrons ultérieurement que l'AFCN fait du principe d'optimisation un méta-processus articulant la stratégie de sûreté à son implémentation, dans un « processus d'optimisation », tout en incluant l'optimisation, en tant que principe, comme élément de la stratégie de gestion au sein de la stratégie de sûreté (voir figure 8-1). Cette ubiquité de l'optimisation *en dehors* et *en dedans, inclus et autour* se devait d'être questionnée et c'est ce à quoi nous consacrons une bonne partie de cette thèse.

3.2.3 Choix stratégiques et exigences de haut niveau

Les choix stratégiques correspondent, en l'espèce, aux choix faits par l'ONDRAF et qui orientent le programme de stockage géologique pour les déchets B&C. Ces choix correspondent en général à des décisions pour lesquels il n'existe pas de cadre réglementaire ou d'imposition de quelque ordre que ce soit mais qui doivent néanmoins être (arbitrairement) adoptés tout en amont du processus. Certains de ces choix anticipent des réglementations ou des choix politiques qui tardent à venir, ou encore,

précisent des modalités de leur développement lorsque seul leur principe est adopté.

A titre d'exemple, citons le choix stratégique de développer un stockage de déchets sur le territoire national. Si c'est l'option habituellement retenue internationalement, la possibilité de choisir un stockage multinational partagé n'est interdite ni par le droit international (IAEA, 1997) ni par le droit européen (EC, 2011). Si une politique nationale sur la gestion à long terme des déchets radioactifs venait à être adoptée en Belgique, celle-ci devrait logiquement régler cette question mais elle pourrait tout aussi bien laisser cette possibilité ouverte, en désignant, par exemple, une option de référence nationale et une option alternative de stockage partagé (CSS, 2021). En l'absence de politique d'une telle nature, l'ONDRAF décide de se concentrer sur la seule solution qu'il puisse maîtriser et qui, de surcroît, est aussi la plus probable. Un autre choix stratégique est celui d'assurer la réversibilité et la récupérabilité pendant la phase opérationnelle. Bien que la réversibilité et la récupérabilité soient inscrites dans la loi du 3 juin 2014 transposant la directive 2011/70/Euratom (EC, 2011), les modalités d'application les concernant ne sont pas encore établies. L'ONDRAF, qui a besoin d'hypothèses de travail, fait donc le choix d'assurer la possibilité de récupérer les déchets pendant la phase opérationnelle du stockage. Il s'agit d'un choix stratégique en adéquation avec les attentes de l'AFCN et qui correspond à une bonne pratique industrielle (Depaus *et al.*, 2020).

Ces deux exemples relèvent d'anticipations raisonnables de réglementations à venir. Toutefois, il existe des choix stratégiques qui relèvent *a priori* des seules prérogatives du concepteur. Ainsi par exemple, le choix de minimiser les opérations unitaires de fabrication en souterrain. L'ONDRAF choisit donc de descendre des superconteneurs en souterrain plutôt que de les construire une fois en sous-sol. Ce choix se justifie notamment par la volonté de bénéficier d'un blindage protégeant des radiations pour toutes les opérations souterraines. Ce choix a également pour corollaire de découpler les activités de construction du stockage de celles de remplissage des galeries et donc d'éviter la « coactivité », c'est-à-dire l'exécution concomitante de tâches qui sont distinctes l'une de l'autre industriellement – les premières relevant de la construction souterraine, les secondes des opérations nucléaires – et qui peuvent éventuellement répondre à des exigences

antagonistes. Ce choix entraîne généralement des opérations plus lentes et donc plus longues. Pour peu qu'il n'y ait pas d'allongement indu de la durée des opérations, ce choix de développement est jugé valide. En revanche, les pays choisissant la coactivité doivent prendre des dispositions de sûreté supplémentaires afin de pallier les problèmes spécifiques qui y sont liés. Il est peu probable qu'une réglementation vienne un jour imposer une stratégie plutôt qu'une autre.

Les exigences de haut niveau (*high-level requirements*) constituent un réceptacle méthodologique collectant les contraintes de toute nature ainsi que les choix stratégiques et qui les traduisent, le cas échéant, en exigences commensurables pour l'ingénieur en charge de la construction. C'est sur cette base que les équipes en charge de la construction et de l'exploitation vont établir leur cahier des charges. En effet, les constructeurs n'ont pas nécessairement besoin de comprendre tous les arcanes des enjeux stratégiques résultant éventuellement de choix politiques adoptés en amont. Ce qui est primordial pour eux, c'est de disposer d'une feuille de route, précisant les desiderata de construction et d'exploitation. Certaines des exigences de haut niveau ne diffèrent pas des choix stratégiques (e.g. construire un stockage en Belgique) alors que d'autres sont de nature spécifique au service de la sûreté opérationnelle, de la sûreté à long terme ou d'une combinaison des deux : « assurer une durée de vie suffisante aux composants de sûreté » ; « vérifier la compatibilité des matériaux » ; etc.

L'ensemble de ces exigences de haut niveau doit pouvoir être cartographié en lien avec les prescriptions réglementaires et, le cas échéant, avec les fonctions de sûreté opérationnelles ou à long terme.

3.2.4 La stratégie de gestion (*management strategy*)

Alors que la stratégie de sûreté décrit comment un stockage sûr doit être réalisé, la stratégie de gestion régule les activités de mise en place de la stratégie de sûreté de manière à garantir le respect de toutes les contraintes contextuelles, les principes de sûreté, les choix stratégiques et les exigences de haut niveau et à s'assurer qu'un haut niveau de confiance en la sûreté soit prodigué par le dossier de sûreté (ONDRAF, 2020f). La stratégie de gestion déployée au niveau d'un dossier de sûreté découle d'une stratégie de gestion

intégrée (IMS – *Integrated Management System*) à l'échelle de l'organisation entière (*corporate level*), en l'occurrence, l'ONDRAF. La stratégie de gestion intégrée régit à la fois le rôle de gestionnaire des déchets et exploitant d'installations⁶⁶ (IAEA, 2009d) tels les stockages de déchets (en surface ou géologique) (IAEA, 2008a) et les entreposages (IAEA, 2008b) que les tâches de démantèlement de certaines installations nucléaires (IAEA, 2009d ; IAEA, 2008c, IAEA, 2006d), etc. La stratégie de gestion au niveau du dossier de sûreté répond donc à des principes directeurs provenant d'un méta-système de gestion. Elle est donc doublement contrainte puisqu'elle est également incluse dans la stratégie de sûreté du stockage géologique.

Les principes de la stratégie de gestion du dossier de sûreté (*safety case*) découlent systématiquement de la stratégie de sûreté et plus particulièrement des principes de sûreté mais sans qu'il y ait nécessairement une correspondance directe. Ainsi, le principe de sûreté passive ne devrait générer *a priori* aucun principe de gestion mais c'est pourtant à lui qu'on associe le principe de gestion de la connaissance et de la transmission d'informations à propos du stockage, sur un plan intergénérationnel. De même la sûreté passive s'organise en termes de fonctions de sûreté et la vérification de celles-ci passe par un outil méthodologique intégré issu de la stratégie de gestion. Sur un autre plan, la robustesse et la défense en profondeur se traduisent notamment en termes de redondance de l'expertise, par un programme de formation du personnel continu et adapté ainsi que par un programme d'audits (ONDRAF, 2020f ; EC, 2011).

⁶⁶ L'ONDRAF est à la fois organisme public gestionnaire des déchets radioactifs (M.B., 1980) et exploitant d'installations nucléaires de classe I et ce, depuis la faillite de l'entreprise Best Medical Belgium S.A. dont il a pris la charge de l'assainissement du site de Fleurus. Ajoutons qu'il aura également bientôt la charge de l'exploitation du stockage de surface des déchets faiblement radioactifs à Dessel. Les installations d'entreposage sont, quant à elles, confiées à sa filiale industrielle, Belgoprocess à Dessel. Cette double « casquette » confère à l'ONDRAF, un double statut. En tant qu'organisme gestionnaire, il possède un pouvoir régulateur dans la définition des critères d'acceptation des déchets en provenance des producteurs par exemple ; en tant qu'exploitant, il doit se soumettre, à son tour, au contrôle de l'autorité de sûreté, l'AFCN, qui lui délivre, en cas de succès, des autorisations d'exploitation comme celle du démantèlement du site de Fleurus, accordée le 22 mars 2019 (ONDRAF, 2019b).

3.2.5 Stratégie de conception et méthodologie d'évaluation de la sûreté : l'outil des « *statements* »

La stratégie de conception et sa méthodologie d'implémentation (*design strategy and implementation methodology*) recouvre les niveaux stratégique et méthodologique. La méthodologie d'évaluation de la sûreté (*Safety assessment methodology*) se situe, quant à elle, comme son nom l'indique, à un niveau méthodologique et non stratégique. Elles sont néanmoins toutes deux désignées par « stratégie » dans les textes réglementaires (AFCN, 2014b). Historiquement, ces deux « stratégies » ont été développées en Belgique à l'aide d'arbres de décision, les *feasibility statements* pour la stratégie de conception et les *safety statements* pour l'évaluation de la sûreté (Nagra, 2010 ; ONDRAF, 2020f). Partant de la thèse à démontrer – i.e. un système de stockage sûr, performant et robuste (AFCN, 2014b) – ils décomposent, du niveau le plus abstrait au niveau le plus concret, les différentes assertions à satisfaire afin d'organiser la démonstration de faisabilité d'une part, et la démonstration de sûreté d'autre part. Bien que dérivés *per descensum*, chacune des déclarations de sûreté ou de faisabilité (*safety statement* ou *feasibility statement*) est argumentée de la base au sommet. Ce ne sont que lorsque toutes les feuilles d'une branche font l'objet d'une justification scientifique ou technique suffisante que ladite branche est jugée validée pour l'étape considérée du programme de recherche. Un système de feux a d'ailleurs été mis en place afin de renseigner l'état de la recherche, vert, orange ou rouge, à chaque étape du processus itératif de développement du système. Cette approche, initialement fortement influencée par la sûreté pour ce qui est des *safety statements*, a dû évoluer au fil du temps afin de garantir une recherche scientifique autonome non inféodée aux besoins de la sûreté (Depaus et Capouet, 2012). Ainsi, la structure arborescente a connu de nombreuses révisions afin de refléter la maturité du programme de recherche et conférer à la science l'autonomie nécessaire afin de produire des résultats même lorsque ceux-ci n'étaient pas commandités par les besoins de la sûreté ou de la faisabilité. En effet, ne s'agissant pas d'un programme de développement industriel au sens classique du terme, il a fallu faire la part belle aux incertitudes sur le très long

terme et éviter, notamment, les phénomènes de biais pour les besoins de la sûreté⁶⁷.

La figure 3-5 ci-dessous fournit un extrait de l'arbre de sûreté lors d'une phase de développement en 2009 (ONDRAF, 2009b).

⁶⁷ Les évaluateurs de sûreté aiguillonnent les chercheurs de manière à obtenir les résultats qui leur permettront de démontrer la sûreté. A l'inverse, il est important que les chercheurs puissent conduire des recherches cohérentes et complètes afin de parfaire leur compréhension des phénomènes en jeu dans un stockage. Si les évaluateurs jouent un rôle certain dans la conduite des recherches en fixant des objectifs à atteindre, les scientifiques mettent régulièrement au défi les hypothèses de la sûreté et de la faisabilité afin d'éprouver leur robustesse. Un compromis doit ainsi être trouvé entre une recherche appliquée qui ne peut se perdre dans la discussion « du sexe des anges » mais qui doit laisser suffisamment de liberté à la science pour la mettre à l'épreuve et remettre en question jusqu'à son objectif même, à savoir la construction d'un stockage sûr, performant et robuste.



Figure 3-5 – Extrait de l'arbre des « safety statements » (ONDRAF, 2009b). (I) désigne la fonction « Isolation » ; (C) désigne la fonction « containment » et (R) la fonction « retardation », elle-même divisée en R1 (dissolution de la matrice) ; R2 (transport diffusif) et R3 (phénomène de sorption).

En haut de l'arborescence figurent les *statements* représentant les objectifs à atteindre ou les thèses à démontrer. Ils se décomposent au niveau inférieur sous la forme de fonctions de sûreté désignées ici par *R1* et *R2*. A leur tour, ces fonctions de sûreté se traduisent en une propriété globale de libération progressive pour *R1* et de transport dominé par la diffusion pour *R2*. Pour ce qui est de la partie relative à *R2*, on peut voir que cette propriété globale conduit à une attente précise sur les propriétés spécifiques de la roche hôte en matière de porosité et de conductivité hydraulique. Au plus bas niveau, ces attentes sont traduites sous la forme de thèses scientifiques à démontrer, il s'agit d'une structure poreuse homogène et d'une conductivité hydraulique basse. Ces « *statements* » de bas niveau sont ensuite argumentés par des programmes de recherche dédiés qui visent à tester leur véracité. Sous chacun d'entre eux, une collection de rapports sont organisés en argumentaire, recourant à l'expérience de laboratoire, au relevé de terrain et à la modélisation.

L'outil des « *statements* » est donc un instrument méthodologique synoptique permettant à la fois d'organiser la connaissance, de conduire un programme de recherche et de gérer l'expertise. Il résulte donc de principes tant de gestion que de sûreté (l'un découlant de l'autre) décidés au niveau stratégique. Ils constituent le lien entre la stratégie et la réalisation (ou implémentation). Nous reviendrons ultérieurement sur l'évaluation de la sûreté et, en particulier, sur le calcul de sûreté lorsque nous aborderons le dossier de sûreté (*safety case*) puisqu'elle en constitue l'une des pièces maîtresses (voir chapitre 4).

3.3 Stockage géologique en Belgique ?

3.3.1 L'étendue du programme nucléaire belge et de ses déchets

La Belgique possède une longue tradition nucléaire qui remonte à 1943 avec l'utilisation de l'uranium congolais, à des fins militaires, pendant la Seconde Guerre mondiale. Cette histoire serait même plus ancienne si on prend comme point de départ la découverte en 1915 de minerai uranifère par des ingénieurs belges travaillant pour l'Union minière du Haut-Katanga⁶⁸. Mais si l'on se concentre sur les débuts de l'énergie nucléaire employée à des fins civiles propres à la Belgique, il faudrait retenir la date du 19 novembre 1945, jour où le Conseil d'Administration du Fonds National de la Recherche Scientifique (FNRS) entérine la création d'une commission chargée de « l'étude des problèmes en rapport avec l'énergie nucléaire » (Buch *et al.*, 1994). Ainsi, bien qu'étant un petit pays, la Belgique se caractérise par un très ancien mais aussi très large programme d'activités liées à la radioactivité, qu'elles soient liées aux combustibles nucléaires et donc aux centrales, à la recherche et à la production d'isotopes médicaux pour le monde entier ou encore à toute une série d'activités industrielles non nucléaires mais générant ou utilisant des matières radioactives tels que le démantèlement d'installations, la production de phosphates ou encore la fabrication de paratonnerres et de détecteurs de fumée ionisants.

La Belgique s'est également distinguée par des activités propres de fabrication et de retraitement de combustibles nucléaires par l'usine pilote de retraitement d'Eurochemic (1966-1974) et la fabrication de crayons de combustibles MOX à partir d'UO₂ et de PuO₂ par Belgonucléaire de 1973 à 2006, par exemple (CPNPC, 2015). En matière de recherche, ce ne sont pas moins de six réacteurs qui ont été construits sur le site du Centre d'étude de l'énergie nucléaire (SCK CEN). Le premier, le BR1, a été mis en service en 1956. Si plus de la moitié de ces réacteurs aujourd'hui a été démantelé ou est en cours de démantèlement, deux réacteurs continuent d'être exploités

⁶⁸ La production de radium et d'uranium par l'Union Minière (aujourd'hui Umicore) s'est étendue de 1922 à 1977 (CPNPC, 2015).

dont l'un d'entre eux, le réacteur BR2, sert à la fois de réacteur d'essai de matériaux et de réacteur de production des principaux radio-isotopes utilisés en médecine nucléaire. Parmi ces isotopes, citons le Mo-99 pour les diagnostics ainsi que le Tc-99 et le Lu-177 servant aux radiothérapies contre le cancer. Rien que pour le Mo-99, le BR2 peut couvrir jusqu'à 85% de la demande mondiale (CPNPC, 2015 ; SCK CEN, 2021) ! A ces six réacteurs, il faut encore ajouter ceux des universités comme le réacteur Thétis de l'Université de Gand ainsi que trois accélérateurs linéaires et huit cyclotrons dont deux sont attachés à des hôpitaux universitaires. Une partie de la production de radio-isotopes à usage médical et industriel est également produite à Fleurus par l'Institut national des radioéléments (IRE). Quant aux réacteurs nucléaires utilisés à des fins de production industrielle d'électricité, la Belgique en compte 7 répartis sur deux centrales, à Doel et à Tihange, et totalisant une puissance de 6 GWe⁶⁹ (CPNPC, 2015).

De ce vaste programme résultent les quantités suivantes de déchets, classés dans les trois catégories de déchets conditionnés et qui sont, pour rappel (voir section 2.3.2) (Royaume de Belgique, 2021)⁷⁰ :

- A : déchets conditionnés de faible et moyenne activité et de courte durée de vie, 27 100 m³ de déchets emballés et 26 400 m³ de déchets conditionnés en vrac.
- B : déchets conditionnés de faible et moyenne activité et de longue durée de vie, 8 700 m³.
- C : déchets conditionnés hautement radioactifs, 140 m³ de déchets vitrifiés et 4 100 tHM de combustibles usés des centrales nucléaires.

⁶⁹ 7 réacteurs (capacité nette installée, date de mise en service industrielle et date de fin d'exploitation prévue par la loi de sortie du nucléaire [M.B., 2003]) :

Doel 1 (433 MWe) : 15 février 1975 – 15 février 2015

Doel 2 (433 MWe) : 1^{er} décembre 1975 – 1^{er} décembre 2015

Doel 3 (1006 MWe) : 1^{er} octobre 1982 – 1^{er} octobre 2022

Doel 4 (1039 MWe) : 1^{er} juillet 1985 – 1^{er} juillet 2025

Tihange 1 (962 MWe) : 1^{er} octobre 1975 – 1^{er} octobre 2025

Tihange 2 (1008 MWe) : 1^{er} février 1983 – 1^{er} février 2023

Tihange 3 (1046 MWe) : 1^{er} septembre 1985 – 1^{er} septembre 2025

⁷⁰ Il s'agit d'une estimation de l'inventaire total des déchets conditionnés existants et prévus au 31 décembre 2020.

Pour ce qui concerne les déchets radifères issus des activités d'Umicore ainsi que les déchets NORM produits essentiellement par les industries des phosphates, dont les niveaux d'activités sont inférieurs à un certain seuil, ils ne devront pas être gérés en tant que déchets radioactifs. Cependant, une certaine fraction d'entre eux dépassant ce seuil devront être considérés comme déchets radioactifs. La fraction de déchets NORM dépassant ce seuil sera à gérer comme déchets de catégorie B bien que ceux-ci n'aient pas encore été confiés à l'ONDRAF. Ils ne sont donc pas compris dans cet inventaire. Les substances radifères des installations d'entreposage d'Umicore et issues de futurs assainissements à gérer en tant que déchets radioactifs ne sont pas davantage compris dans l'inventaire ci-dessus. Il s'agit actuellement d'un volume de 300 000 m³ et l'estimation de ce qui sera à gérer en tant que déchets radioactifs est en cours⁷¹. Remarquons que l'inventaire ne comprend pas non plus les déchets d'exploitation et de déclassement des installations futures (Royaume de Belgique, 2021).

3.3.2 Les politiques nationales sur la gestion à long terme des déchets radioactifs

Bien que les inventaires de déchets radioactifs dans notre pays soient impressionnants de par leurs volumes et leur diversité, remarquons qu'il n'existe que très peu de politiques nationales à ce jour qui concernent la gestion à long terme de ces déchets. Seuls les déchets de catégorie A ont fait l'objet d'une politique nationale prise par deux décisions du Conseil des ministres (voir section 2.3.2). En ce qui concerne la gestion des déchets de catégories B et C, il n'existe toujours pas de politique nationale et ce, malgré les nombreux projets d'arrêtés royaux déposés par l'ONDRAF sur la table du gouvernement depuis 2010. En effet, le gouvernement belge, sous une pression principalement écologiste, se refuse jusqu'ici⁷² à prendre une décision sur le principe même du stockage géologique quand bien même celui-ci s'avère la seule solution de gestion à long terme reconnue internationalement et autorisée par le droit international et par le droit européen (ONDRAF, 2020b ; EC, 2011). Cette indigence est d'ailleurs

⁷¹ En 2021.

⁷² Voir l'avertissement en début de thèse.

sanctionnée par la Commission européenne (EC, 2018 ; CSS, 2021) mais l'infraction au droit européen qui en résulte ne semble toujours pas décider la Belgique à adopter officiellement cette solution.

Toutefois, fort d'un programme de recherche ayant débuté en 1974 sur l'enfouissement géologique, qui s'impose comme la seule solution technique réaliste, les experts tant de l'ONDRAF que de l'AFCN travaillent sur cette solution depuis des décennies en attendant que le monde politique régularise cette option de gestion, en l'inscrivant dans son cadre légal et réglementaire. Cette absence de décision est cependant extrêmement néfaste pour la gestion actuelle des déchets puisqu'elle ne permet pas de provisionner tant financièrement que techniquement adéquatement la solution (CSS, 2021). Sans fondement politique, la solution d'enfouissement géologique reste fragile et contestable. Les producteurs d'énergie acceptent de provisionner pour un scénario de référence basé sur un stockage géologique dans une argile peu indurée à une profondeur de 400 mètres, considérant qu'il s'agit de la solution la plus probable en Belgique (Wacquier *et al.*, 2018). Néanmoins, sans décision de principe, les processus de choix de site et les démarches sociétales ne peuvent être entreprises sur des bases légitimes. C'est l'ensemble du programme de gestion qui s'en trouve ralenti et fragilisé alors que le monde politique décide par ailleurs de sortir de l'énergie nucléaire à des fins de production industrielle d'électricité (M.B., 2003). Cette incohérence crée des tensions extrêmes parmi les acteurs de la gestion des déchets puisque l'absence de décision politique sur la solution de gestion à long terme combinée à l'imminence de sortie du nucléaire permettrait éventuellement aux producteurs de quitter la scène sans avoir provisionné suffisamment le scénario de référence sur la base d'hypothèses validées. Il n'est par ailleurs pas possible à l'ONDRAF de négocier des enveloppes majorantes pour faire face à cette incertitude puisque chaque aspect du scénario de référence, chaque risque identifié, doit être minutieusement analysé et âprement défendu (ONDRAF, 2020a). En d'autres termes, le principe du « pollueur-payeur » ne s'applique pas unilatéralement en imposant un tarif non négocié aux producteurs. Par conséquent, en procrastinant la décision de gestion à long terme, le risque d'engager la responsabilité ultime de l'Etat (EC, 2011) croît de plus en plus et, avec lui, celui de chercher dans les deniers publics des générations à venir les

ressources financières pour enfouir les déchets existants le moment venu (CSS, 2021).

3.3.3 Une Belgique schizophrène ?

Le hiatus profond existant entre d'une part, la situation de fait constituée par l'inventaire des déchets déjà produits et ceux qui seront produits encore à l'avenir – même si l'arrêt de toutes les centrales nucléaires pour 2025 est confirmé – qui plaide pour la solution du stockage, et d'autre part, l'immaturation politique à cet égard ainsi que la contestation dudit stockage par une frange de la population – adepte de « solutions transitoires » (Callon *et al.*, 2011, p. 179) – et par certaines instances régionales (GW, 2020 ; GRBC, 2020) constitue un terrible dilemme démocratique. Alors que l'ingénieur et le spécialiste de droit nucléaire ne peuvent entrevoir d'autres solutions que celle dictée par la technique et déjà coulée dans le droit international depuis des décennies et, de surcroît, renforcée par la coutume puisqu'elle est adoptée par tous les pays européens et de l'OCDE possédant au moins un réacteur à des fins de production d'électricité (ONDRAF, 2020b), ils doivent pourtant faire face à une autre réalité, celle d'une action politique qui ne peut se contenter de ce « fondement rationnel » pour décider. Comme le disait Habermas en commentant la scientification de la politique il y a 50 ans déjà, il est « *impossible de trouver à la décision pratique dans une situation concrète une légitimation suffisante grâce à la raison. La rationalité dans le choix des moyens va très précisément de pair avec l'irrationalité déclarée des positions adoptées par rapport aux valeurs, aux buts et aux besoins* » (Habermas, [1968] 1973, p. 99). Ce discours sur le schéma décisionniste des rapports entre « savoir spécialisé » et « pouvoir politique » qu'à décrit Max Weber dans une tradition remontant à Hobbes (Habermas, [1968] 1973, p. 98) semblait pourtant avoir été renversé par le *modèle technocratique* où l'intelligentsia scientifique dicte une certaine conduite politique mais il semble pourtant revenir ici, à la faveur du *modèle pragmatique* où les experts « conseillent » et les politiques « passent commande » (Habermas, [1968] 1973, p. 107). Dans ce modèle cependant, les recommandations techniques ne peuvent s'appliquer à la pratique que par le truchement de l'opinion publique qui communique ses intérêts de manière que la décision politique puisse s'appuyer sur une certaine idée des besoins pratiques réellement

exprimés (Habermas, [1968] 1973, p. 110). Ce n'est qu'après cette prise de pouls de l'opinion que le politique peut donner une direction au « progrès technique » cherchant aussi, par ailleurs, une « légitimité » d'autant plus souhaitable qu'une politique publique en matière de gestion des déchets radioactifs se déploie en contexte d'« incertitudes radicales »⁷³ (Callon *et al.*, 2001 ; Parotte, 2021). Cette *légitimité* est d'autant plus difficile à obtenir qu'elle doit répondre au pluralisme des valeurs des acteurs sociaux et à la nécessité pourtant de recourir à des outils normatifs dans la gestion des conflits sociotechniques (Zwetkoff, 2012, p. 84). C'est sans doute en réponse à ce modèle que l'ONDRAF a proposé à sa Tutelle, en 2021, l'organisation d'un débat sociétal, pour donner suite à une tradition de conférences citoyennes initiée déjà en 2010 à l'occasion de la remise de son Plan Déchets (ONDRAF, 2011a), conférences citoyennes que l'on peut interpréter comme faisant partie d'une « négociation continue » propre au modèle pragmatique où la réalisation technique n'est plus qu'un élément du processus (Feltz, 2013, p. 77).

Force est cependant de constater que la Belgique semble avoir persisté dans un rare déni par rapport à cette problématique de gestion des déchets, voire entretenu une ambivalence schizophrène, en refusant d'entériner, par des politiques nationales comme le lui enjoint pourtant la directive 2011/70/Euratom (EC, 2011), des prédispositions qu'elle avait pourtant elle-même adoptées très tôt dans son cadre légal. Ainsi par exemple, la loi fondant l'ONDRAF stipule :

« Les missions relatives aux déchets radioactifs comprennent le transport en dehors des installations, le traitement et le conditionnement pour les producteurs qui ne disposent pas d'équipements agréés à cette fin par l'Organisme, l'entreposage en dehors des installations et l'évacuation, ainsi que la collecte et l'évaluation de toutes les informations nécessaires à l'exécution des missions précitées.

[En outre, l'Organisme est habilité à prendre toute action et toute mesure qui est destinée à créer et à maintenir l'assise sociétale

⁷³ Michel Callon, Pierre Lascoumes et Yannick Barthe définissent les « incertitudes radicales » comme des incertitudes ne pouvant être réduites qu'a posteriori (Callon *et al.*, 2001, p. 43).

nécessaire pour assurer l'intégration d'une installation de dépôt final de déchets radioactifs dans une collectivité locale.]] » (M.B., 1980, art. 179, §2, al. 4)

Dans cet extrait, l'« Organisme » désigne l'ONDRAF⁷⁴, l'« évacuation », la solution définitive et le « dépôt final » était la terminologie utilisée pour désigner le stockage. On en déduit que la notion de stockage est pour ainsi dire consubstantielle à la création de l'ONDRAF. En outre, le Parlement, alors même qu'il votait la suspension des contrats de retraitement du combustible nucléaire des centrales, précisait tout de même, dans sa Résolution de 1993, qu'il chargeait le gouvernement de donner « *la priorité à la recherche et au développement, y compris dans un cadre international, en vue de pouvoir réaliser à terme l'évacuation directe du combustible irradié, sans réduire le programme de recherche actuel dans le domaine de l'évacuation des déchets de retraitement en couche profonde* » (Parlement, 1993).

Le principe du stockage géologique semble donc avoir toujours été établi mais sans jamais qu'une politique volontariste n'ait été clairement exprimée, une politique qui aurait pu et qui aurait sans doute dû s'accompagner de tous les processus participatifs ou de dialogue à la hauteur de l'enjeu, une politique qui serait née de cette transition entre la « démocratie délégative » des années 80-90 vers la « démocratie dialogique » défendue aujourd'hui (Callon *et al.*, 2001, p. 423). Cette mise au frigo politique pendant de trop longues années a engendré un passif qui constitue un cas d'école pour la « thèse de l'inanité » (Hirschman, 1991), c'est-à-dire une situation où un projet technologique contesté aujourd'hui est le fruit d'un héritage verrouillé techniquement et entériné par des instruments légaux (voir section 10.2.2).

Mais dans l'examen de cet enlisement technico-politique, une interrogation surgit : « Avons-nous besoin d'une telle politique nationale ? ». Voilà la question subversive qu'on aurait envie de poser aujourd'hui. Sur un plan légal, peut-être pas, bien que cette question mérite certainement une étude juridique approfondie. En effet, serait-il par exemple possible de simplement *déduire* du cadre légal existant une politique nationale, comme l'exige

⁷⁴ Une convention d'écriture que nous reprenons également à notre compte en prenant soin d'utiliser une majuscule lorsque « Organisme » se réfère à l'ONDRAF pour le distinguer du nom commun.

aujourd'hui la loi du 3 juin 2014 (M.B., 2014), c'est-à-dire une politique qui y aurait toujours été tacitement inscrite et qui, forte de son antériorité, serait affranchie des prescrits modernes de la loi du 3 juin 2014 (M.B., 2014) ? C'est une piste qui, à notre connaissance, n'a jamais été suivie par l'ONDRAF. Quoiqu'il en soit, sur le plan de la *légitimation* de Habermas ou de la *légitimité* évoquée notamment par Parotte et Zwetkoff, une politique nationale établie selon les procédés légaux récents semble indispensable, une politique qui assurerait « légitimité et soutien » (Zwetkoff, 2012, p. 9), une condition nécessaire pour mener le processus à son terme.

A l'heure d'écrire ces lignes, il est donc difficile de savoir si un stockage géologique sera véritablement construit un jour, en Belgique. Même si une décision quant à son principe était prise sous peu, nous savons que les projets sur la table du gouvernement ont dû faire la part belle à une réversibilité décisionnelle telle que la décision de principe sur le stockage géologique comporte en elle-même la possibilité de se révoquer, comme l'attestent les travaux préparatoires en cours⁷⁵ :

« Lorsqu'il formule les propositions visées à l'article 179, § 6, de la loi du 8 août 1980, l'Organisme prend en considération les résultats obtenus dans le cadre du suivi (...) en particulier, de la réversibilité de la Politique nationale, qui implique, après reconsidération, la possibilité de revenir sur une ou plusieurs parties de cette Politique, y inclus la première partie de celle-ci visée à l'article 5. »

Et où l'article 5 stipule que la solution choisie est le stockage géologique⁷⁶ :

« La solution choisie pour protéger l'homme et l'environnement contre les risques que présentent les déchets radioactifs (...) est le

⁷⁵ Il s'agit des travaux proposant un « Avant-projet d'arrêté royal instituant la première partie de la Politique nationale en matière de gestion à long terme des déchets radioactifs hautement radioactifs et/ou de longue durée de vie et précisant le processus d'institution par étapes des autres parties de cette Politique nationale », à la date du 18 octobre 2021 (Projet A.R., 2021*) et citant la loi du 8 août 1980 (M.B., 1980).

⁷⁶ On observera que l'expression « stockage géologique », terme technique consacré, a dû laisser la place, dans l'avant-projet d'arrêté royal, à « stockage en profondeur » afin de ne pas heurter les sensibilités écologistes francophones.

stockage en profondeur de ces déchets sur le territoire belge (...) »
(Projet A.R., 2021*)

Précisons ici que les « parties de la politique » se réfèrent, pour la première partie de celle-ci, au principe du stockage mais aussi au processus d'institution par étapes des autres parties de la politique nationale. Ce développement en parties vise à répondre aux principes généraux et prescrits propres aux politiques de gestion imposés par la directive 2011/70 et repris à l'article 179, §6 de la loi du 8 août 1980 (EC, 2011 ; M.B., 1980) qui prévoient ce morcellement afin de faire face aux grandes échelles de temps liées à ce type de projet.

Autrement dit, le projet de politique nationale avance, comme solution de gestion à long terme, le *stockage géologique* tout en précisant que le principe même de cette solution pourrait être remis en cause ! Jamais la réversibilité décisionnelle n'avait été poussée aussi loin puisque, même pour le Plan Déchets, la réversibilité⁷⁷ envisagée pour donner suite aux demandes citoyennes exprimées lors des conférences et consultations publiques, n'allait pas remettre en cause jusqu'au principe même du stockage une fois celui-ci adopté (ONDRAF, 2011a). Alors qu'en 2011, la réversibilité décisionnelle visait à tenir compte des progrès techniques ou de la volonté des générations futures de réutiliser les matières enfouies, et répondait ainsi à l'un des critères de l'équité procédurale (Zwetkoff, 2004) ; en 2021, la réversibilité décisionnelle exige de s'assurer, avant toute nouvelle avancée, que la toute première décision prise en amont du processus (i.e. le stockage géologique) est toujours confirmée avant de poursuivre. Cette *réversibilité hyperbolique* semble toutefois peu compatible avec les exigences d'un projet industriel, qui plus est, au très long cours, qui requiert un minimum de stabilité décisionnelle.

Quoi qu'il en soit, comme nous l'écrivions précédemment, nous avons construit notre question de recherche sur l'éventualité de cette solution puisque le stockage géologique constitue l'option légale et technique de référence à ce jour (NEA, 2020) et que c'est elle qui est discutée entre

⁷⁷ Il s'agissait dans le langage de l'époque d'adaptabilité (du processus décisionnel) et non de réversibilité, terme réservé alors aux opérations techniques.

l'ONDRAF et l'AFCN (AFCN/ONDRAF, 2013 ; AFCN/ONDRAF, 2020). Nous abordons à la section suivante, l'une des principales hypothèses de travail scientifiques qui ont été retenues pour le stockage géologique en Belgique à savoir le choix de la roche hôte. Ce choix est au cœur de notre question de recherche.

3.3.4 Hypothèse de travail : le choix des argiles comme roche hôte

Depuis 1974, la Belgique étudie la possibilité d'enfouir des déchets radioactifs dans son sous-sol. Pionnière en Europe dans ce domaine, la recherche est initiée par le Centre d'Etude Nucléaire (SCK CEN) à Mol. L'argile de Boom, argile de cette région et dite argile « peu indurée »⁷⁸, est investiguée. Dès sa création, en 1980, c'est l'ONDRAF qui reprend officiellement la direction des recherches. C'est aussi à cette époque (1980-1984) que démarre la première phase de construction du laboratoire souterrain HADES (D'Orazio *et al.*, 2019) dans l'argile de Boom à Mol. C'est ainsi que depuis plus de quarante ans, l'ONDRAF étudie la possibilité d'enfouissement des déchets conditionnés de catégorie B (faiblement et moyennement radioactifs à vie longue) et de catégorie C (déchets hautement radioactifs et combustibles usés déclarés comme déchets), ci-après « déchets B&C », dans les argiles faiblement indurées dont l'argile de Boom en particulier et l'argile yprésienne, en tant qu'option alternative (ONDRAF, 2011a ; Wacquier *et al.*, 2018).

⁷⁸ L'induration est le durcissement d'un matériau meuble, tel un sédiment (Foucault et Raoult, 1995). Parmi les paramètres représentatifs de ce degré de « dureté », on compte notamment la contrainte de compression uniaxiale (*uniaxial compression strength*) σ (MPa) et le module de Young (*Young modulus*) E (GPa). On voit que l'argile de Boom est peu indurée car ses paramètres sont $E = 0.3$ GPa et $\sigma = 2$ MPa en comparaison d'autres argiles appréhendées pour un stockage géologique de déchets hautement radioactifs telles l'argile Opalinus à Mont Terri en Suisse avec $E = 10$ MPa (horizontalement) $E = 4$ Mpa (verticalement), $\sigma = 10-16$ MPa ou l'argile Collovo-Oxfordienne à Bure, en France $E = 4-6$ GPa, $\sigma = 24$ MPa (*in* Wacquier *et al.*, 2016, valeurs adaptées de Volckaert *et al.*, 2004). A titre de comparaison, un granite présente un module de Young $E = 50\,000 - 80\,000$ GPa pour une contrainte de compression $\sigma = 200$ MPa (essai déconfiné) ou $\sigma = 2\,000$ MPa (essai confiné) (*dans* Persson *et al.*, 1994).

L'ONDRAF a publié, depuis, des documents phares, *peer-reviewed* et fruits de ses recherches en partenariat avec le SCK CEN : SAFIR en 1989 et SAFIR 2 en 2001 (ONDRAF, 2001a ; ONDRAF, 2001b ; NEA, 2003). Aux côtés de nombreux documents techniques produits chaque année afin de rendre compte de l'évolution des recherches dans différents domaines, sa gestion courante ou encore sa mission légale d'inventaire, l'ONDRAF publie en 2011 le « Plan Déchets » afin d'informer le monde politique des différentes options de gestion à long terme et de lui demander de se prononcer en faveur de l'option d'enfouissement des déchets B&C dans l'argile de Boom. Comme il s'agit d'un plan au sens de la loi du 13 février 2006 « *relative à l'évaluation des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement et à la participation du public dans l'élaboration des plans et des programmes relatifs à l'environnement* » (ci-après, « loi SEA⁷⁹ »)(M.B., 2006), l'ONDRAF publie une étude d'incidences environnementales qui compare l'option d'enfouissement à toute autre option de gestion réaliste ou fantaisiste (e.g. entreposage perpétuel, envoi dans l'espace, etc.) et soumet cette étude à une consultation publique. Le gouvernement belge de l'époque se penche sur question de la gestion à long terme des déchets sous l'impulsion du ministre fédéral du Climat et de l'Energie Paul Magnette⁸⁰ mais il tombera malheureusement quelques mois plus tard avant d'avoir pu se prononcer⁸¹.

De son côté, l'AFCN émet un avis favorable au principe du stockage géologique mais considère que le choix de la roche hôte est prématuré (AFCN, 2011a). L'autorité de sûreté invite donc l'ONDRAF à considérer l'ensemble des potentielles roches hôtes en Belgique et, plus particulièrement, les schistes. L'AFCN justifie sa requête au nom de l'application du principe d'optimisation de la protection (AFCN, 2014a). C'est

⁷⁹ *Strategic Environmental Assessment*

⁸⁰ Paul Magnette est resté ministre du Climat et de l'Energie du 21 décembre 2007 au 5 décembre 2011 (Wikipédia : https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_ministres_belges_de_l%27Environnement [Consulté le 2 août 2020]).

⁸¹ Provoquant ainsi les élections anticipées du 13 juin 2010 à la suite desquelles la Belgique connaîtra la plus longue crise politique de l'histoire contemporaine européenne, le pays restant 541 jours sans gouvernement. Ce triste record de longévité sans gouvernement sera battu par l'Irlande du Nord le 25 août 2018 (Wikipédia : https://fr.wikipedia.org/wiki/Crise_politique_belge_de_2010-2011 [Consulté le 2 août 2020]).

cette justification que nous commenterons ultérieurement dans cette thèse et, en particulier, dans la partie consacrée à l'étude de cas (voir chapitre 10).

Pour donner suite à la requête de l'AFCN, l'ONDRAF intègre, dans son programme de recherche, des études sur les autres roches hôtes potentielles en Belgique. Toutefois, devant l'écart énorme de connaissances séparant le programme d'étude sur l'argile de Boom de l'étude des autres roches belges, l'ONDRAF décide de faire des argiles peu indurées sa solution de référence *pour la recherche* de manière à tirer parti de son savoir accumulé depuis quelques décennies (Wacquier *et al.*, 2018 ; Kermisch et Depaus, 2018b). Ce choix de solution de référence pour la recherche se justifie d'autant plus que l'AFCN reconnaît que les investigations d'autres roches hôtes ne conduiront pas nécessairement à une meilleure solution (AFCN, 2011a).

Enfin, pour lever toute ambiguïté, soulignons que le choix d'une roche hôte n'est qu'une étape préalable à celui du site d'installation de stockage. Les deux problématiques, à savoir la sélection d'une roche adéquate pour accueillir un stockage et le choix d'un site d'enfouissement, sont des étapes distinctes du trajet décisionnel partant de l'idée d'enfouissement jusqu'à la réalisation de celui-ci. Le choix du site, le *siting process*, est un processus politico-sociétal, légal⁸² et éthique qui tient compte des données scientifiques déjà fournies⁸³ alors que la sélection de la roche hôte intervient bien plus en amont du trajet décisionnel pour en fournir les conditions d'existence. Si la sélection de la roche hôte est parfois perçue comme un processus comportant également des dimensions politique et sociétale, c'est parce qu'elle préfigure le choix ultérieur d'un site et entérine l'idée du concept d'enfouissement... Rappelons que nous nous intéressons, dans cette thèse, à ce que cette question du choix de la roche hôte et plus particulièrement, à ce que la question du principe d'optimisation appliqué à

⁸² Le choix d'un site doit non seulement tenir compte des prescriptions de sûreté énoncées par l'autorité de sûreté nucléaire (AFCN) mais aussi des législations environnementales, voire même du droit international pour ce qui concerne les aspects transfrontaliers. Enfin, signalons que la géologie ignore les frontières géographiques et que l'argile de Boom, par exemple, est une formation géologique qui traverse la Belgique mais aussi les Pays-Bas...

⁸³ Même si ces données ne cesseront d'être complétées par une caractérisation *in situ* une fois l'emplacement décidé.

ce choix peut recéler comme difficulté sur le plan *épistémologique*, un aspect très peu étudié, à notre connaissance, dans ce domaine d'activités.

Chapitre 4 Le dossier de sûreté

4.1 Définition et portée

Le dossier de sûreté ou, en anglais, *safety case*, est défini par AIEA, comme :

*« The safety case is the **collection of scientific, technical, administrative and managerial arguments and evidence** in support of the safety of a disposal facility, covering the suitability of the site and the design, construction and operation of the facility, the assessment of radiation risks and assurance of the adequacy and quality of all of the safety related work associated with the disposal facility. **Safety assessment**, an integral part of the safety case, is driven by a systematic assessment of radiation hazards and is **an important component of the safety case**. [...] **The safety case and supporting safety assessment provide the basis for demonstration of safety** and for licensing. They will evolve with the development of the disposal facility, and will assist and guide decisions on siting, design and operations. The safety case will also be the main basis on which dialogue with interested parties will be conducted and on which **confidence in the safety** of the disposal facility will be developed. » (IAEA, 2012, §1.3, nous soulignons)*

Il s'agit donc d'une collection d'arguments et de preuves (*evidence*) en vue de démontrer, auprès d'une autorité habilitée à délivrer les permis de construction et d'exploitation, la sûreté d'une installation destinée à enfouir

les déchets pour des périodes de l'ordre du million d'années⁸⁴... Cette définition, la plus officielle qui soit, soulève à elle seule moult questions pour l'épistémologue : le concept de *sûreté* tout d'abord, terme « éluif » qui dépasse le cadre de la science et de la technique (Minon et Depaus, 2013) ; la notion de *démonstration* ensuite qui, de toute évidence, ne peut s'appréhender ici comme le cas particulier de la déduction dans le domaine logique ou mathématique (NEA, 1999) ; le dialogue avec les parties prenantes enfin, en vue d'établir une *confiance* dans la sûreté, mobilisant ici une dimension psychologique dans un contexte nécessairement politique et sociétal (NEA, 1999).

Le *safety case*⁸⁵ est une collection de preuves en vue d'inspirer la confiance de tiers. Ce langage plutôt empreint de légalisme (NEA, 2004a ; NEA, 2020) est pourtant le jargon d'ingénieurs et de scientifiques chargés de constituer ledit dossier, utilisant la science comme moyen d'instruction à charge ou à décharge du projet auquel il se rapporte. Manifestement, cette science – bien que matière première du *safety case* – ne suffit pas à atteindre l'objectif que celui-ci s'est fixé. La définition du *safety case* suppose une mise en perspective qui inspire la confiance et qui place donc le débat au-delà de la « simple » controverse scientifique – que l'on peut tenir comme l'exercice sain et critique de la science par la pratique collective du doute méthodique (Roqueplo, 1997) – en se chargeant, au passage, d'une série de présupposés et ce, en vue de conférer au dossier de sûreté un statut permettant la prise de décisions. Inspirer la confiance est en effet une tâche ardue qui dépasse la compilation d'arguments et la publication de résultats de calculs.

⁸⁴ Les notions d'enfouissement et d'échelle de temps ne sont pas précisées dans la définition même puisque, en réalité, un '*safety case*' peut également être soumis aux autorités pour d'autres types d'installations que le stockage géologique. Ainsi la construction d'un stockage en surface de déchets faiblement radioactifs dont l'intégrité doit être préservée pour quelques siècles seulement fait également l'objet d'un '*safety case*'. Toutefois, dans le cas qui nous occupe (l'enfouissement géologique de déchets hautement radioactifs), la durée de vie d'une telle installation est le plus souvent de l'ordre du million d'années.

⁸⁵ Le choix du terme « *case* » en anglais n'est pas anodin. Il renvoie d'une part à l'idée d'« arguments » et d'autre part, au langage juridique aux notions « d'affaires » et de « procès »... Comme le publiait l'AEN en 2004 : « *The safety case may be seen as analogous, in some respects, to a legal case, in which multiple lines of evidence are produced, and [...] evaluated to allow a judgement to be reached.* » (NEA, 2004a)

Le projet européen *MoDeRn2020* sur le monitoring des installations de stockage de déchets radioactifs a mis en évidence les difficiles mécanismes mis en œuvre dans l'établissement de la confiance. Ainsi, les citoyens invités à assister aux échanges de vue entre scientifiques ont trouvé que la controverse – qui rend « *perceptibles les incertitudes et par conséquent les nouvelles voies de recherche à explorer* » (Callon *et al.*, 2001, p. 60) – était un facteur d'authenticité et donc de confiance dans l'élaboration des solutions à des problèmes donnés. Cette controverse scientifique, à l'inverse des messages de marketing, n'est pas lissée et montre tant l'engagement des scientifiques que la non-univocité des vues, souvent toutes valables et garantes du sérieux apporté à la problématique :

« *The relative messiness of interactions shows authenticity which stimulates trust (in contrast with marketing messages).* » (Depaus, 2019)

Toutefois, aucun citoyen n'est pour autant prêt, sur cette seule base, à légitimer les résultats de la recherche :

« *The citizen stakeholders (CS) are very positive about the interaction within the framework of MoDeRn2020 but are not prepared to legitimate the research outcomes (regarding the whole process, they want to open up but they don't want to close it down).* » (Depaus, 2019)

Le dossier de sûreté se profile donc à l'image d'une plaidoirie qui se tiendrait devant un tribunal de la société tout entière et auquel seraient convoqués ses principaux porte-paroles : l'autorité de sûreté délivrant les permis en tête mais aussi, derrière elle, les ministres qui entérineront la décision par voie d'arrêtés, les ONG, les communes directement concernées par l'implantation de l'installation, etc. Il s'agit d'avoir accumulé suffisamment de preuves accablantes ou disculpantes pour se prononcer en faveur de la culpabilité (danger) ou en faveur de l'innocence (innocuité) du projet d'enfouissement. La confiance ne pourra être obtenue qu'après avoir franchi un intangible seuil de crédibilité, impossible à formaliser *a priori*.

Les concepts scientifiques mobilisés en vue de constituer les arguments et les preuves sont, en réalité, intrinsèquement limités épistémologiquement car débordés de leur champ d'utilisation habituel. Il ne s'agit pas d'établir un

fait ou d'en relier les causes qui lui ont donné naissance, il s'agit de prédire. Prédire, oui, mais à un horizon invérifiable, au-delà de l'échelle de temps commune de l'humanité. Face à la gageure, le consensus est, sinon de prédire avec précision, de dégager des faisceaux d'évolution possible et de s'assurer que ceux-ci ne seront jamais de nature à mettre en péril de générations futures humaines hypothétiques et plus encore, l'environnement et ses biotopes du futur. Il s'agit de garantir la sûreté de l'homme et de l'environnement quoi que cela puisse vouloir dire à ce stade et de borner notre ignorance de façon que celle-ci, nécessairement insaisissable, ne puisse porter préjudice à quiconque. Circonscrire l'étendue de notre ignorance – ce qui suppose déjà de la connaissance – au point d'en connaître les périmètres ou de ramener ceux-ci aux limites connues des lois de la nature, voilà peut-être l'incroyable défi du *safety case* des stockages géologiques de déchets hautement radioactifs !

4.2 *Safety case, faisceau de preuves (multiple lines of evidence) et scénario de référence*

Le *safety case* est donc le lieu de tous les enjeux et de toutes les contestations possibles. Il constitue la pièce maîtresse dans le dialogue avec les autorités mais aussi avec la société civile. L'IAEA y a consacré une publication entière (IAEA, 2012), distincte de celle sur les stockages des déchets radioactifs (IAEA, 2011b) et de celle consacrée au stockage géologique (IAEA, 2011a), mais c'est l'AEN qui, sans aucun doute, est l'institution internationale qui a le plus travaillé le concept de *safety case*. Elle y a consacré d'ailleurs un groupe de travail dédié : le « *Integration Group for the Safety Case* » (IGSC) créé dans les années 2000 afin de se pencher tout particulièrement sur les dossiers de sûreté des stockages géologiques (IGSC, 2020). L'IGSC est le principal organe d'avis du Comité de gestion des déchets radioactifs, le Radioactive Waste Management Committee (RWMC) de l'AEN. Selon ce comité, qui a récemment réalisé une rétrospective de ses vingt ans d'activité, le *safety case* a évolué en conférant à la stratégie de sûreté davantage d'importance et un statut à part de ce qui constituait, jadis, la base d'évaluation (*assessment basis*) et qui regroupait la stratégie, le concept du système (sa conception et son site d'implantation) ainsi que les ressources

pour procéder à cette évaluation (NEA, 1999). A partir de 2004, l'IGSC a estimé que l'argumentaire s'appuierait, certes, sur *l'assessment basis* regroupant, l'information scientifique, le concept et les ressources de calculs mais aussi, à parts égales, sur la stratégie de sûreté (*safety strategy*) couvrant, quant à elle, la stratégie de choix de site et de conception du système, la stratégie de gestion (*management strategy*) et la stratégie d'évaluation (de la sûreté) (*assessment strategy*)⁸⁶. C'est bien la conjonction de ces deux éléments, *safety strategy* et *assessment basis* qui peut fournir la substance de l'argumentaire, les preuves, analyses et arguments (*evidence, analyses and arguments*).

Nous ne cherchons pas ici à présenter exhaustivement tous les composants du *safety case*, cela constituerait une question de recherche en soi mais souhaitons mettre en exergue quelques éléments utiles à notre propos, notamment au sein de la stratégie de sûreté. Nous laissons volontairement en dehors de notre description *l'assessment basis* qui recouvre la base scientifique sur laquelle se fonde l'évaluation et donc la démonstration de sûreté. L'un des éléments que nous souhaitons mettre en lumière est l'évaluation de sûreté ou *safety assessment*.

L'évaluation de sûreté est, comme l'AIEA le précise dans sa définition, une pièce maîtresse du *safety case*. L'évaluation de la sûreté est ce qui répond à ce besoin d'impossible prédiction du système. Devant les échelles de temps millénaires, ce qui est évalué est l'évolution de la dose radiologique et de son risque associé, à laquelle on adjoint des indicateurs complémentaires de sûreté ou de performance tels que le flux ou la concentration (NEA, 2012d). Ces indicateurs complémentaires sont destinés à pallier les lacunes du concept de dose dont l'interprétation sur le très long terme est par trop arbitraire⁸⁷ (NEA, 2004a ; NEA, 2012e ; IAEA, 2012 ; ICRP, 2007 ; ICRP, 2013). Tous ces indicateurs sont attachés à des scénarios. L'utilisation des scénarios est une approche du traitement de l'incertitude que Stirling attribue au sous-domaine de la *perplexité* (Stirling, 2000), c'est-à-dire lorsque les résultats

⁸⁶ Parfois appelé également, notamment dans le programme belge, *safety assessment methodology*

⁸⁷ Les habitudes de vie sont inconnues, les biosphères sont inconnues ce qui rend l'utilisation de critères quantitatifs inappropriée. En revanche, la dose et le risque restent utiles pour la comparaison d'options (ICRP, 2013).

d'un événement sont connus mais que leur occurrence – sous la forme d'une probabilité – ne l'est pas (voir encadré 2, section 9.3).

Un *scénario* est défini par l'AIEA comme :

« A postulated or assumed set of conditions and/or events used to represent possible future conditions and/or events to be modelled, such as the possible future evolution of a repository and its surroundings. A scenario may represent the conditions at a single point in time or a single event, or a time history of conditions and/or events (including processes). » (IAEA, 2003c)

Le *scénario de référence* se définit, quant à lui, sur la base du concept de sûreté, décrivant l'évolution du système de stockage, de façon simplifiée et abstraite, en faisant l'hypothèse qu'aucun événement ou processus ne viendra prématurément affecter une fonction de sûreté ou entraîner sa perte (ONDRAF, 2009b, p. 71).

L'utilisation des scénarios est une approche largement partagée internationalement et, même si certains pays décident de leur assigner une probabilité, la plupart des pays suivent une approche déterministe ou mixte⁸⁸. En effet, sur une base probabiliste, il est *a priori* possible d'écarter l'un ou l'autre scénario dès lors que l'occurrence de celui-ci est reconnue comme très faible ou que son impact est jugé négligeable (AFCN, 2012c). Il s'agit d'une approche similaire à celle suivie pour déterminer l'acceptabilité d'un risque, en établissant un « diagramme de Farmer »⁸⁹ (Mannan, 2005) ou une matrice de risques (Depaus *et al.*, 2021). Toutefois, la plupart des pays s'accordent pour envisager une série de scénarios d'évolution altérée qui, dès lors qu'ils ne peuvent être exclus, sont traités de manière déterministe, c'est-à-dire affublés conventionnellement d'une probabilité égale à un (voir section 4.5).

⁸⁸ L'approche est probabiliste pour exclure des événements jugés particulièrement peu probables ou stochastiquement impossibles. Elle est déterministe pour tous les scénarios jugés plausibles et dans ce cas, on peut considérer, en termes probabilistes, qu'une probabilité unitaire leur est assignée arbitrairement.

⁸⁹ Il s'agit d'établir une relation entre la probabilité d'un événement et sa gravité. Différents domaines peuvent être ainsi définis : acceptable, tolérable, inacceptable. Dans la zone tolérable, une optimisation est requise.

En règle générale, un *scénario d'évolution altérée* se distingue du *scénario de référence* – qui sert de base à l'évaluation de sûreté – par l'endommagement d'une fonction de sûreté. Comme nous l'écrivions à la section 3.2.1, les fonctions de sûreté peuvent être définies à différents niveaux et, dès lors, les critères de transition d'un scénario à l'autre peuvent également varier. Toutefois, le principe demeure identique. Si une barrière principale est endommagée, entraînant avec elle une fonction de sûreté essentielle au stockage, il y a changement de scénario. Si le changement est mineur parce qu'il affecte un composant non essentiel, les concepteurs envisagent cette possibilité comme un *cas alternatif* au sein du *scénario de référence* de sorte que celui-ci est envisagé comme un *scénario enveloppe*⁹⁰ de plusieurs cas possibles, ceux-ci reposant tantôt sur des hypothèses légèrement différentes de conception tantôt envisageant quelques perturbations de faible ampleur du système. Ces cas, dits « alternatifs », se définissent par rapport à un *cas de référence* qui constitue une réalisation spécifique du *scénario de référence*, reposant sur un ensemble d'hypothèses et de valeurs de paramètres découlant directement du *concept de sûreté* (SCK CEN, 2012). Le *cas de référence* représente l'évolution du système si ce dernier répondait, ni plus ni moins, au *concept de sûreté*. Il s'agit donc d'un cas modeste dans sa performance qui illustre le comportement du système selon le minimum garanti par le *concept de sûreté*. Le *scénario de référence* élaboré autour du *cas de référence* est donc *robuste* de façon inhérente. Cette robustesse est rendue possible par le fait de reposer sur des hypothèses dites *conservatives*, c'est-à-dire des hypothèses systématiquement tournées vers la prudence et qui sont peu ambitieuses. A titre d'exemple, si les études actuelles de corrosion montrent que l'*overpack* au sein d'un superconteneur pourrait résister 100 000 ans avant de se rompre, le concept de sûreté ne compte que sur une durée de 5000 ans, cette durée étant elle-même le fruit d'une majoration puisque la phase thermique que l'*overpack* est censé couvrir ne sera, en réalité, que de maximum 2 500 ans (Van Geet, 2008). L'hypothèse consistant à supposer que l'*overpack* résistera pendant (au moins) la phase thermique du déchet chauffant est donc une hypothèse (très) conservatrice. Par conséquent, une rupture de confinement ouvrageé (*containment*) à

⁹⁰ « Un scénario est considéré comme "enveloppe" vis-à-vis de différentes évolutions et états lorsque l'impact radiologique qui lui est associé est supérieur ou équivalent aux impacts associés à ces évolutions et états » (AFCN, 2012b ; AFCN, 2014c).

50 000 ans est toujours incluse dans le scénario de référence, permissif par hypothèse. A force de conservatisme, il arrive que le scénario de référence fournisse des doses attendues qui flirtent avec les limites réglementaires (i.e. contraintes de dose). Toutefois, il importe de bien comprendre que, bien que de « référence », ce scénario ne correspond pas à l'évolution réelle du système et c'est la raison pour laquelle, aux côtes du scénario de référence, un *scénario d'évolution attendue* est souvent présenté (AFCN, 2011b). Ce scénario, bien que n'étant pas une prédiction stricto sensu – puisqu'il n'existe pas de base probabiliste solide à son fondement –, représente l'évolution du système telle qu'elle est attendue par les experts. Il constitue donc un *cas alternatif* plus réaliste au *cas de référence*. Ce cas, bien que *permis par* et *enveloppé dans* le scénario de référence, est souvent présenté comme distinct de celui-ci, à des fins de communication et appelé « scénario » plutôt que « cas » pour ces mêmes raisons. Précisons qu'à défaut de prédiction, il s'agit en fait d'une prévision⁹¹ que les experts attribuent davantage à une plausibilité qu'à une probabilité, recourant ainsi à la terminologie des ensembles flous (Zimmermann, 1996 ; Piegat, 2005). Le *scénario d'évolution attendue* thésaurise la confiance des experts et est une des bases de l'évaluation de sûreté.

Nous décrivons brièvement comment un *cas de référence* est construit, dans la section suivante.

⁹¹ Nous nous distançons ici de la distinction classique entre *prévision* et *prédiction*. Selon cette distinction : *prévision* (lat. *praevisio*, voir à l'avance) relève du caractère fondamental des lois et théories scientifiques et, par conséquent, étant donné un système de conditions, un (et un seul) fait peut être déterminé à l'avance. En revanche, la *prédiction* (i.e. dire à l'avance) ne se fonderait, quant à elle, sur aucune loi vérifiable, sans lien de cause à effet (Morfaux et Lefranc [1980] 2020). En effet, nous observons au contraire que la *prédiction* peut être gage de scientificité pour toute discipline répondant à la méthode nomologico-déductive (i.e. procédant à la déduction de phénomènes observables via des lois), leur pouvoir explicatif étant aussi prédictif (e.g. les sciences de la nature) (Soler, 2019, pp. 79-87). Nous rejoignons donc plutôt la distinction à laquelle procède Robert Nadeau : « la prévision se distingue de la prédiction qui est issue d'une loi ou théorie scientifique hautement confirmée ou corroborée tandis que la prévision découle d'hypothèses ou de conjectures moins assurées » (Nadeau, 1999, p. 511).

4.3 Calcul de sûreté et cas de référence (*reference case*) : descriptions conceptuelle et mathématique

Comme nous l'expliquions à la section précédente, un cas de calcul d'évaluation (*assessment case*), dont le cas de référence est un exemple, constitue la réalisation spécifique d'un scénario, en l'occurrence le *scénario de référence* (ONDRAF, 2009b). Le *cas de référence*, développé en premier lieu, s'élabore au départ d'un *modèle conceptuel* représentant une abstraction de la réalité telle que cette dernière nous est rapportée par les données de la science, dans l'état actuel des connaissances. Ces données scientifiques, même si elles sont parcellaires, présentent un niveau de complexité très élevée. Si certains modèles de processus seront bel et bien développés en parallèle des données récoltées expérimentalement afin d'augmenter la compréhension dudit processus, leur complexité rend, sans simplifications préalables, leur combinaison entre eux difficile. Le modèle de sûreté ne retiendra donc que certains paramètres discriminants et veillera à ce que les simplifications qu'il opère soient toujours dans l'intérêt de la sûreté. Cette évaluation fait l'objet d'interactions régulières entre les évaluateurs de sûreté, abstraiteurs des phénomènes, et les spécialistes desdits phénomènes de manière que les paramètres pertinents soient retenus et les processus bien compris (e.g. corrosion de l'acier au carbone à pH élevé, dissolution d'une matrice de verre, capacité d'échanges cationique, phénomènes de transport, etc.).

Ainsi, dans le *cas de référence* élaboré pour une roche hôte argileuse, on retient principalement la croissance radioactive des radioéléments, le transport majoritairement diffusif de ceux-ci au sein de la matrice argileuse (sous-fonction de sûreté R2) et un phénomène général de sorption linéaire et réversible⁹²(sous-fonction de sûreté R3). Il est également supposé, en première approche d'un site générique (puisque aucun site n'est choisi en

⁹² L'obtention de telles abstractions et le fondement de leur validité a exigé de nombreuses années d'interactions entre scientifiques : le transport est-il majoritairement diffusif ? Quelles valeurs pour les coefficients de diffusion des anions et des cations ? Dans quelles gammes de concentrations, la sorption est-elle linéaire ? Sommes-nous dans ces gammes ou en dehors ? Quels sont les artefacts expérimentaux ? etc.

Belgique), que la formation argileuse sera comprise entre deux aquifères et que le stockage géologique y sera construit en son plan médian (ONDRAF, 2022a). Une épaisseur de 80 mètres est retenue comme valeur de référence pour le modèle de sûreté (SCK CEN, 2012a). Elle est fondée sur la base d'observations *in situ* – sur le site de Mol où le laboratoire souterrain HADES est construit – d'une couche d'une centaine de mètres d'épaisseur dont on a déduit l'étendue des zones de transition⁹³, le diamètre de la galerie d'accès principal et l'étendue des zones endommagées par l'excavation. La variabilité naturelle du site n'a pas été prise en compte puisque celui-ci est inconnu. D'éventuelles discontinuités lithologiques ou des variations en contenus de matière organique pouvant influencer le transport des radionucléides ainsi que des fluctuations de gradients hydrauliques n'ont pas davantage été prises en compte et devront être considérées dans des cas alternatifs et/ou lors de révisions du cas de référence. L'ensemble des interactions chimiques ne peut être prédit et certaines d'entre elles demeurent mal comprises : est-ce que la spéciation chimique des radionucléides influence leur sorption sur les minéraux argileux ? Cette question devra encore être investiguée. Pour l'heure, seules les données le plus défavorables sont prises en compte. Le cas de référence postule également qu'aucun événement géologique majeur ne viendra perturber l'environnement de la roche hôte (ONDRAF, 2022a). Cette hypothèse se justifie dans la mesure où le processus de choix du site aura dû veiller préalablement à éliminer toutes les zones où de tels événements pourraient se produire endéans le million d'années retenu pour l'évaluation de sûreté. La biosphère ainsi que le comportement humain sont approchés de façon stylisée, en veillant à ne considérer que des hypothèses extrêmement sévères, telles qu'une communauté autarcique puisant l'eau d'un puits situé dans l'aquifère de surface placé au-dessus du stockage géologique afin de boire, se laver et nettoyer leurs aliments. Cette communauté cultive des légumes arrosés uniquement avec l'eau du puits et consomme les produits de leurs élevages animaliers, eux-mêmes nourris avec leurs propres cultures (SCK CEN, 2012a). Le cas de référence suppose également que les radionucléides échappés du stockage et gagnant l'aquifère de surface sont immédiatement mélangés sur toute l'épaisseur de

⁹³ Zones où les propriétés homogènes de migration ne peuvent pas être supposées (Aertsens *et al.*, 2005).

la couche aquifère, négligeant ainsi les phénomènes de stratification hydraulique. En raison du transport de radionucléides dans l'aquifère beaucoup plus rapide que dans l'argile, un état stationnaire peut être postulé ce qui affranchit le modèle de sûreté d'une modélisation explicite du transport dans les différents compartiments de l'aquifère et de la biosphère⁹⁴ (ONDRAF, 2022a). Ainsi, une exposition radiologique dans la biosphère et les concentrations radiotoxiques dans l'aquifère de surface peuvent être exprimées en flux de sortie des radionucléides depuis la roche hôte. Un facteur de dilution, propre à l'aquifère, doit également être appliqué (SCK CEN, 2012b ; ONDRAF, 2022a).

Pour ce qui est du champ proche, c'est-à-dire de la zone de barrières ouvragées entourant immédiatement le déchet et comprenant tous les composants depuis la matrice de celui-ci jusqu'au matériau de remblayage des galeries, des perturbations de différentes natures peuvent avoir lieu. Ces perturbations sont regroupées sous l'acronyme THM(B)C afin de désigner les phénomènes thermiques (*Thermal*), hydrauliques (*Hydraulic*), mécaniques (*Mechanical*) et chimiques (*Chemical*) auxquels sont parfois ajoutées les perturbations biologiques (*Biological*). Les phénomènes s'y déroulent à différents moments et interagissent (ONDRAF, 2008). Ils font l'objet de nombreuses études mais sont *conservativement*, dans le cas de référence, appréhendés par la délimitation d'une zone endommagée dont l'étendue est évaluée à trois mètres. Cette zone pourrait être perturbée de façon permanente en raison des réactions chimiques liées à la libération d'un panache alcalin dans l'argile au départ des barrières ouvragées cimentaires. En raison de ce panache pouvant affecter les propriétés de sorption de l'argile, la zone endommagée est assimilée à de l'eau pure dans laquelle les radionucléides diffuseraient librement. Cette abstraction, très conservative,

⁹⁴ En parallèle, des modèles de transport dans la biosphère sont développés. Ceux-ci peuvent atteindre une très grande complexité et intégrer différents récepteurs et différents compartiments. La variabilité dans l'assimilation des radionucléides par les différents animaux et par les différentes plantes est considérée. Il en va de même des habitudes agricoles ainsi que des changements climatiques pouvant survenir au cours de la période d'évaluation. Le résultat de ces modèles permet d'ajuster le cas de référence et/ou les cas alternatifs de manière à donner une image plus complète du scénario de référence et vérifier qu'il n'y aurait pas une combinaison d'hypothèses malheureuses pouvant conduire à une contamination délétère.

permet une modélisation simplifiée en assimilant cette zone à un réservoir d'eau.

Pour ce qui relève du *superconteneur*, assurant la fonction de sûreté C, celui-ci est conçu pour résister pendant une durée équivalente à la phase thermique, elle-même postulée à 5000 ans. Nous avons vu précédemment à quel point cette hypothèse était conservatrice en raison non seulement de la durée réelle plus courte de la phase thermique mais aussi de la résistance à la corrosion considérablement plus élevée de l'*overpack* du *superconteneur*. En outre, les *superconteneurs*, même brisés, offriront encore une barrière au transport des radionucléides mais cette réserve de sûreté n'est pas prise en compte dans le cas de référence, pas plus que l'étalement dans le temps de leur défaillance (SCK CEN, 2015). Celle-ci est, elle aussi, *conservativement*, représentée comme une rupture simultanée affectant l'ensemble de l'inventaire des déchets (ONDRAF, 2022a). La fonction de sûreté de confinement ouvragé est donc supposée totalement perdue à la fin de la phase thermique.

Après la perte de l'*overpack* – que l'on considère comme l'élément principal du *superconteneur* déterminant entièrement la capacité de confinement de celui-ci⁹⁵ – le déchet est exposé à l'eau de pore de l'argile et un relâchement fractionnaire des radionucléides au départ de la matrice de déchets est supposé. L'effet protecteur chimique de la barrière ouvragée dégradée mécaniquement n'est pas pris en compte. Ce relâchement repose sur l'hypothèse d'un mélange homogène des radionucléides et est supposé congruent à mesure que le déchet se dégrade (ONDRAF, 2022a). Lorsque la matrice de déchet ne semble pas pouvoir garantir de rétention (rétention qui correspond à la sous-fonction de sûreté *R1*), telle la matrice de verre des déchets vitrifiés issus du retraitement des combustibles de centrales, l'effet potentiellement retardateur est supposé nul. La matrice de verre se dissout donc instantanément dans le cas de référence.

⁹⁵ Il s'agit ici aussi d'une hypothèse hautement conservatrice puisque le *superconteneur* contient également, entre l'*overpack* et l'enveloppe, un *buffer* cimentaire qui, même dégradé, offrira des propriétés de rétention ainsi qu'une enveloppe sacrificielle en acier inoxydable qui, elle aussi, offrira encore une barrière résiduelle, fût-elle hautement endommagée.

Si l'on considère les principaux phénomènes retenus dans le *modèle conceptuel* du cas de référence, nous pouvons passer au *modèle mathématique* en posant les équations suivantes :

$$\frac{\partial c_{RN}}{\partial t} = -\lambda_{RN} C_{RN} \quad \text{Equation 4-1}$$

L'équation 4-1 est l'équation de décroissance radioactive du radionucléide RN en fonction du temps où λ_{RN} est la constante de décroissance (1/s) et C_{RN} la concentration du radionucléide RN (mol/m³).

$$F = -\eta D_p \frac{\partial c}{\partial x} \quad \text{Equation 4-2}$$

L'équation 4-2 est la première loi de Fick décrivant la diffusion d'un milieu poreux où η représente la porosité de l'argile accessible au soluté (–), D_p est coefficient de diffusion de pore du soluté dans l'argile (m²/s) et c , la concentration du soluté en solution au sein de l'argile (mol/m³). F est le flux massique de l'élément (mol/s). Lorsque la concentration change avec le temps, il faut également recourir à l'équation de conservation de la masse (i.e. seconde loi de Fick) qui relie le changement de concentration en fonction du temps, dans un volume poreux infiniment petit, au flux net, croisant ce volume le long de la direction de diffusion.

$$\eta \frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial F}{\partial x} \quad \text{Equation 4-3}$$

La combinaison des équations 4-2 et 4-3 donne :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{Equation 4-4}$$

L'équation 4-4 représente le phénomène de diffusion exprimé en fonction de la concentration du radionucléide.

Le troisième phénomène principal évoqué dans le cas de référence est la sorption linéaire et réversible. Elle s'exprime de la façon suivante :

$$K_{d,RN} = \frac{C_{RN}^s}{C_{RN}} \quad \text{Equation 4-5}$$

où $K_{d,RN}$ est le coefficient de distribution (m^3/kg) représentant la sorption du radionucléide RN sur l'argile, supposée linéaire et en équilibre thermodynamique, avec C_{RN}^s la concentration du radionucléide sorbé (mol/kg) et C_{RN} la concentration du radionucléide en solution.

Les trois phénomènes couplés, décroissance radioactive, transport diffusif et sorption, donnent lieu à l'équation suivante :

$$\begin{aligned} & (\eta_{RN} + \rho K_{d,RN}) \frac{\partial c_{RN}}{\partial t} \\ &= \eta_{RN} D_{p,RN} \frac{\partial^2 c_{RN}}{\partial x^2} - \lambda_{RN} (\eta_{RN} + \rho K_{d,RN}) c_{RN} \end{aligned} \quad \text{Equation 4-6}$$

où C_{RN} la concentration du radionucléide en solution, λ_{RN} est la constante de décroissance ($1/\text{s}$), η_{RN} représente la porosité de l'argile accessible au soluté (-), $D_{p,RN}$ est coefficient de diffusion de pore du soluté dans l'argile (m^2/s), ρ la masse volumique de l'argile (kg/m^3) et $K_{d,RN}$ est le coefficient de distribution (m^3/kg).

En posant :

$$R_{RN} = 1 + \frac{\rho K_{d,RN}}{\eta_{RN}} \quad \text{Equation 4-7}$$

où R_{RN} est un nombre de similitude adimensionnel appelé facteur de retard (-), on simplifie l'équation 4-6 et on obtient :

$$\frac{\partial c_{RN}}{\partial t} = \frac{D_{p,RN}}{R_{RN}} \frac{\partial^2 c_{RN}}{\partial x^2} - \lambda_{RN} c_{RN} \quad \text{Equation 4-8}$$

où le ratio $\frac{D_{p,RN}}{R_{RN}}$ est le coefficient de diffusion apparent $D_{app,RN}$ qui est le paramètre de diffusion le plus facilement mesuré expérimentalement.

Toutes les fonctions de sûreté sont ainsi représentées. La fonction C impose un intervalle de temps au-delà duquel commence le relâchement et pendant lequel il y a eu partiellement décroissance des radionucléides. La sous-fonction $R1$ est négligée, le plus souvent, en pratique⁹⁶. Les fonctions $R2$ et $R3$ sont traduites par les équations supra et sont capturées par un ensemble de trois paramètres spécifiques à chaque radionucléide : $D_{p,RN}$, R_{RN} et η_{RN} (ONDRAF, 2022a). Quant à I, la fonction isolation, elle est représentée comme la longueur du chemin diffusif, soit l'épaisseur de la roche hôte.

4.4 Résultats-types de l'évaluation de sûreté : modèle numérique

Une fois le modèle conceptuel du cas de référence posé et sa mathématisation établie, celui-ci doit être traduit en modèle numérique. Ces codes numériques peuvent aller de programmes simples, des feuilles de calculs Excel par exemple, à des modèles sophistiqués aux éléments finis (ONDRAF, 2009b). Les modèles de « processus » (*process models*) tentant de décrire certains phénomènes à l'étude sont en général des modèles de plus grande complexité que les modèles de sûreté qui, par l'approche conservative qu'ils privilégient, bénéficient également de simplifications sur le plan numérique. Outre la simplification inhérente à l'abstraction même, la modélisation numérique procède à des simplifications supplémentaires par rapport au modèle conceptuel.

Une première simplification provient du passage d'une réalité tridimensionnelle à un modèle bidimensionnel, les compartiments tant ouvragés que de la géosphère étant considérés comme homogènes et isotropes. Seule une section bidimensionnelle du stockage sur la profondeur de la formation hôte est donc représenté. Les matériaux de remblayage et la galerie d'accès sont également négligés. Enfin, l'ensemble des galeries de

⁹⁶ En fait, cela dépend du type de déchet. Les déchets C vitrifiés, issus du retraitement du combustible, n'offrent qu'une sous-fonction $R1$ dérisoire dans l'environnement cimentaire. La fonction est donc négligée. En revanche, le combustible usé (*spent fuel*), s'il était déclaré comme déchet (la Belgique n'a toujours pas pris position sur son statut, faute de politique nationale), serait enfoui dans l'argile après encapsulage dans un superconteneur et sa matrice offrirait, quant à elle, une sous-fonction $R1$ très significative.

stockage est ramené à la modélisation d'un quart de galerie (figure 4-1). Dans cette figure, le déchet apparaît comme un point rouge autour duquel, on aperçoit, en gris, les barrières ouvragées (EBS). L'annulaire brun foncé représente la zone endommagée par l'excavation (EDZ) et l'argile est représentée par la couleur brun clair. Les conditions aux limites sont également illustrées : $C_{RN} = 0$ sur le bord supérieur traduit la dilution supposée infinie au contact de l'aquifère. $F_{RN} = 0$ sur les côtés gauche et droit ainsi que sur le bord inférieur traduit une condition aux limites de flux nul puisqu'à mi-distance de galeries de stockage contenant le même type de déchet, les flux diffusifs de part et d'autre de ces différentes frontières seront égaux et s'annuleront (ONDRAF, 2022a).

Le passage des galeries multiples à une galerie unique se justifie en postulant toutes les galeries de stockage identiques et, la diffusion se produisant radialement dans toutes les directions, un seul quart de galerie doit être explicitement modélisé (SCK CEN, 2012b ; ONDRAF, 2022a). Des opérations subséquentes de mise à l'échelle sont conduites sur les résultats du modèle afin de retrouver l'ensemble des galeries sur tout l'inventaire.

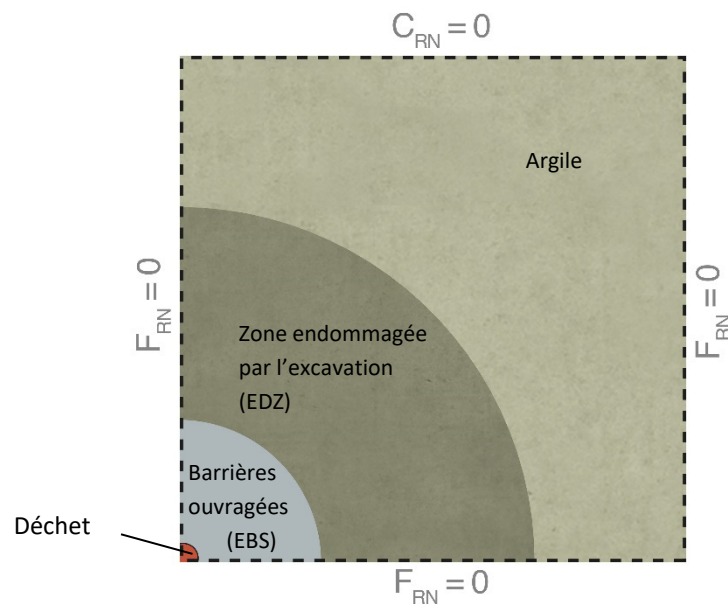


Figure 4-1 – Schématisation d'un quart de galerie de stockage (ONDRAF, 2022a).

Notons que cette simplification n'est suffisante à ce stade que pour un calcul préparatoire de cas de référence sur un site générique. Lorsque le site de stockage sera connu, des modélisations plus complexes devront tenir compte des hétérogénéités du terrain, de propriétés de transport anisotropes, etc.

Nous commentons ici quelques résultats du *cas de référence* simple⁹⁷, pour un site générique dans une argile peu indurée, issus du rapport de l'évaluation préliminaire post-fermeture des déchets vitrifiés dans une argile peu indurée (ONDRAF, 2022a).

La figure 4-2 ci-dessous illustre le flux de sortie (Bq/a) des radionucléides dans la formation hôte sur une période d'évaluation d'un million d'années, pour un déchet C vitrifié. Le flux total est représenté par la courbe noire et la contribution des principaux radionucléides responsables de l'activité est représentée. Il s'agit de six radionucléides représentant plus de 99% du flux cumulé : Se-79, Cl-36, C-14, I-129, Ca-41 et le Pd-107 qui sont des produits de fission et d'activation, la contribution des actinides étant négligeable durant cette période.

La figure 4-3 représente, quant à elle, le débit dose engendré par les principaux radionucléides contributeurs, pour un enfant qui boirait l'eau du puits situé au-dessus du stockage. Le débit de dose, en ligne continue noire, demeure en deçà de la contrainte de dose de 0.1 mSv et ce, malgré le caractère très conservatif des hypothèses du cas de référence.

⁹⁷ Ce cas de référence issu de (ONDRAF, 2022a) ne considère pas, par exemple, les limites de solubilité dans le milieu cimentaire à l'inverse de précédentes évaluations (SCK CEN, 2012a).

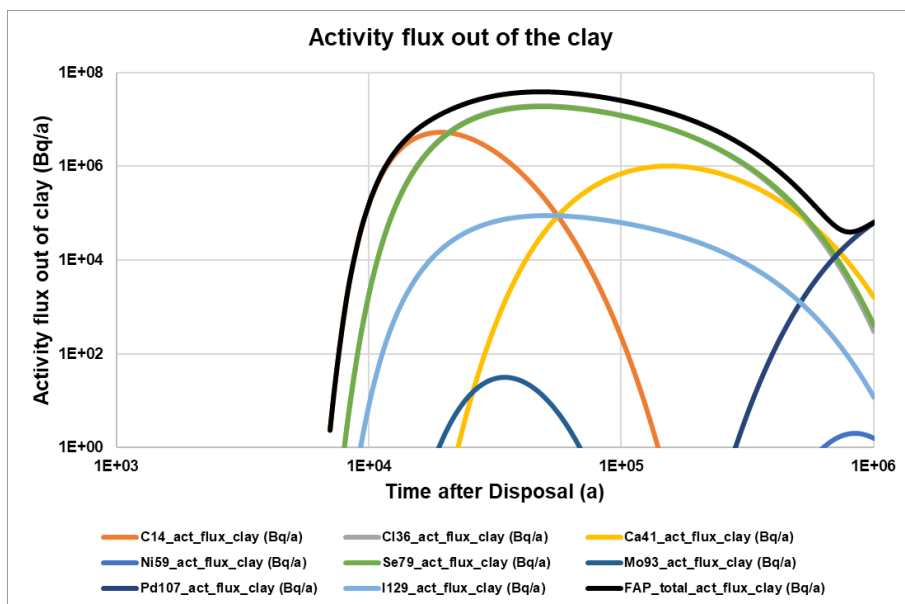


Figure 4-2 – Activité des principaux radionucléides d'un déchet vitrifié responsables de l'activité pendant la période d'évaluation d'un million d'années (ONDRAF, 2022a).

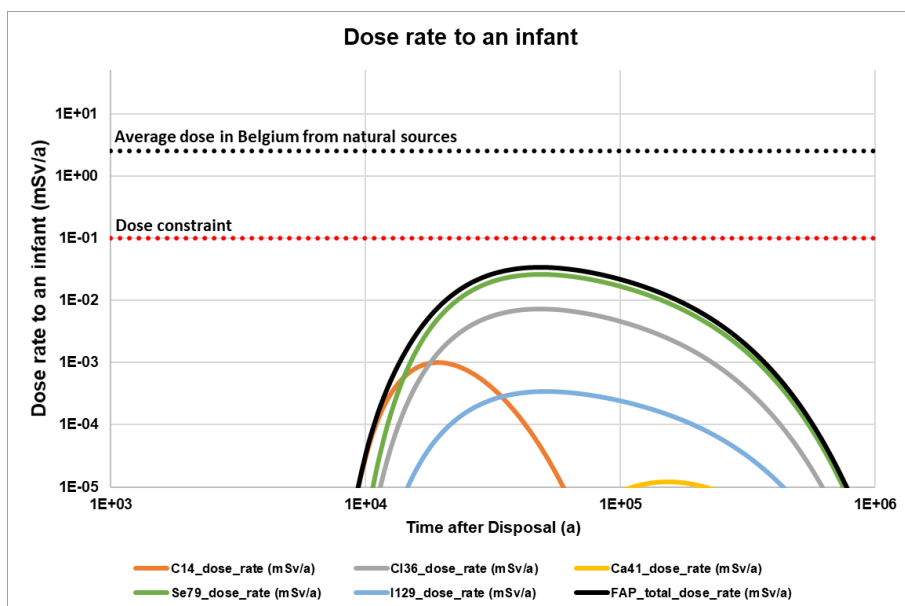


Figure 4-3 – Débit de dose résultant des produits de fission et d'activation d'un déchet vitrifié via le chemin du puits dans l'aquifère supérieur de surface pour un enfant (ONDRAF, 2022a).

Nous ne détaillons pas ici les phénomènes de transport en milieu argileux mais soulignons néanmoins que les radionucléides I-129, Se-79, Cl-36, C-14 sont des espèces non retardées dans l'argile, le seul frein à leur transport étant la diffusion. Pour ces radionucléides, le facteur de retard $R_{RN} = 1$, ce qui signifie une absence de sorption. Il n'y a donc pas réellement de fonction de sûreté $R3$ qui soit efficiente pour ces radionucléides. Notons également qu'à la différence des trois autres espèces non retardées, le C-14 a une durée de vie relativement courte ($t_{1/2} = 5.730$ a) contrairement à l'I-129, par exemple, dont $t_{1/2} = 1.6 \times 10^7$ a⁹⁸. Cette caractéristique le rend particulièrement sensible à l'épaisseur de la roche hôte. En effet, si le chemin diffusif est plus long, le C-14 a le temps de décroître en chemin alors que l'augmentation du chemin de diffusion n'aura qu'une influence très limitée sur les espèces non retardées à longue durée de vie.

4.5 Scénarios d'évolution altérée, scénario d'intrusion humaine (HI⁹⁹) et « *what-if cases* »

Nous avons précédemment défini le *scénario de référence* comme le scénario correspondant à l'évolution du système de stockage selon le concept de sûreté. Il s'agit donc du déploiement régulier des fonctions de sûreté au cours du temps tel que le concept de sûreté le « prévoit » (ONDRAF, 2020f). Ce scénario est une enveloppe de plusieurs cas d'évolution possible dont le *cas de référence* ou *scénario d'évolution attendue* qui correspond à l'occurrence la plus plausible du *scénario de référence*. Notons que, très tôt, le programme de recherche sur le stockage géologique a privilégié la terminologie « cas de référence » plutôt que « scénario d'évolution attendue » puisque ce qui le distingue du scénario de référence n'est pas en lien avec une fonction de sûreté (ONDRAF, 2009b).

⁹⁸ Où $t_{1/2}$ désigne la demi-vie du radionucléide. Celle-ci s'exprime en années (« a » pour *annum*).

⁹⁹ Human intrusion.

Dans cette optique, nous avons tenté, en 2010, d'établir une taxonomie du développement des scénarios¹⁰⁰ dont nous reprenons ici les principaux éléments. Cette taxonomie est illustrée par la figure 4-4 ci-dessous. Le cône des possibles évolutions du système de stockage est représenté en rose. Au sein de celui-ci un cône des évolutions les plus probables ou plausibles, représentant graphiquement le scénario de référence, est dessiné en vert. De ce cône vert jaillit un bâtonnet vert qui représente le cas de référence ou éventuellement le scénario d'évolution attendue, c'est-à-dire le « *best estimate case* ». Un cône d'une autre évolution possible mais peu plausible est dessiné en orange et représente un scénario d'évolution altérée. Un autre scénario d'évolution altérée est dessiné en rouge. Au sein de ces scénarios d'évolution altérée, différents cas alternatifs sont également possibles et sont symbolisés par les cercles orange et rouge respectivement. Les ellipses barrées en croix représentent les « *what-if cases* », de probabilité nulle c'est-à-dire les cas d'évolution stochastiquement impossibles. Un cercle barré en croix figure un cas d'évolution rigoureusement impossible. Un losange bleu figure un cas « vide » c'est-à-dire un cas possible, peu probable et non considéré (ONDRAF, 2010). Un exemple typique de cas vide est celui de l'impact météoritique (majeur). Il constituerait très certainement un danger mais ce dernier dépassant largement celui occasionné par la destruction du stockage, il sort du champ des évaluations calculées. P désigne la probabilité d'occurrence. « *Disruptive event* » désigne un élément perturbateur survenant à un moment donné de l'évolution du système et représenté par une ligne pointillée verticale. « *Data* » désigne les données recueillies du passé.

¹⁰⁰ Cette taxonomie n'a jamais été publiée ; nous l'avons néanmoins présentée à plusieurs réunions entre pairs (ONDRAF, 2010).

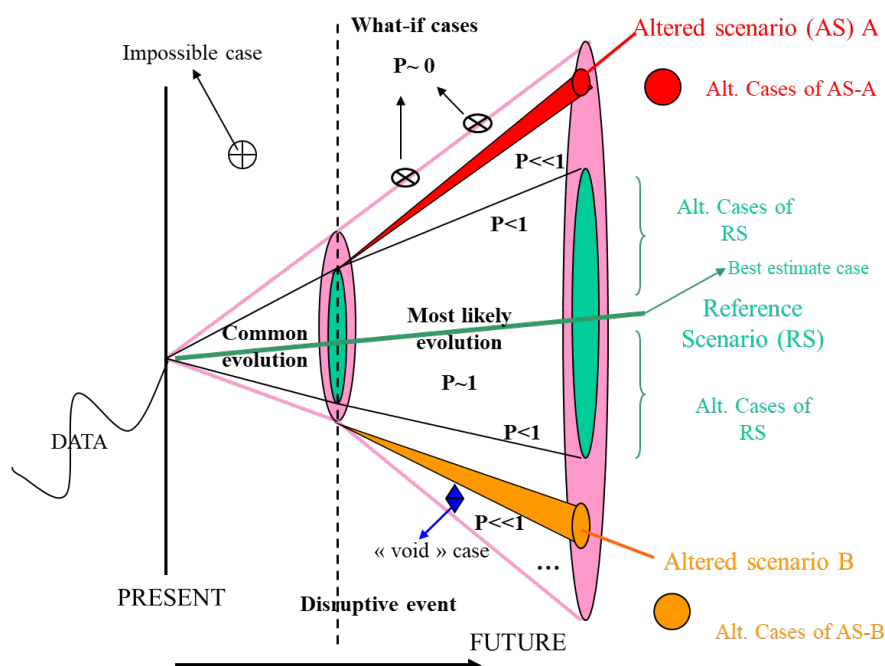


Figure 4-4 – Tentative de taxonomie des scénarios sous-tendant l'évaluation de sûreté à long terme d'un stockage géologique. P désigne la probabilité attachée au scénario. RS est le symbole du scénario de référence (Reference scenario) alors que AS désigne un scénario altéré (Altered Scenario). « Disruptive event » désigne un élément perturbateur survenant à un moment donné de l'évolution du système et représenté par une ligne pointillée verticale (Présentation Depaus C. citée dans ONDRAF, 2010).

Un scénario se construit au départ d'une conception du système, elle-même étayée par les données recueillies *in situ* ou en laboratoire. Il s'agit d'une pré-connaissance qui vient de l'observation du site choisi pour la construction du stockage, comme son évolution géologique. L'instant présent englobe, quant à lui, toute la phase de construction du stockage ainsi que son exploitation, cet instant peut donc durer près d'un siècle. Le système évolue, depuis sa fermeture et sa mise en sûreté passive, et cette évolution est représentée, dans la figure 4-4, par un bâtonnet au sein d'un cône de possibles existences du système. Le bâtonnet correspondant au cas de référence a une probabilité *a priori* proche de 1 puisqu'il correspond à l'attente des experts. Des variations sont néanmoins possibles, elles sont légèrement moins probables mais conservent une occurrence proche de la certitude. Toutes ces

variations sont le reflet d'aléas qui pourraient survenir ou résultent d'incertitudes résiduelles à propos du système qui en feraient dévier l'état mais tout en restant dans l'enveloppe – représentée par un cône – du scénario de référence. Le système de stockage étant intrinsèquement robuste, la mise en danger d'une fonction de sûreté de haut niveau est donc peu probable. Néanmoins si un événement disruptif devait entamer gravement l'état du système au point d'invalidiser l'une de ses fonctions de sûreté, le système évoluerait selon un scénario d'évolution altérée, lui-même enveloppe de plusieurs évolutions possibles. Les fonctions de sûreté étant au moins partiellement redondantes, l'état du système devrait rester sûr jusqu'à la fin de la période d'évaluation.

Les scénarios d'intrusion humaine (HI) constituent un cas particulier de scénarios qui ne résultent pas de l'application d'une méthodologie de sûreté. Ce sont des scénarios imposés à tous les concepteurs de stockages et leur occurrence est postulée (ICRP, 1998 ; IAEA, 2011b ; IAEA, 2012). Les scénarios HI cherchent à déterminer les conséquences d'une intrusion humaine *par inadvertance* dans le système de stockage. Il faut souligner qu'il s'agit d'une intrusion involontaire, lorsque la mémoire du stockage est perdue¹⁰¹. L'intrusion humaine est le corollaire de l'état passif du système de stockage. Les scénarios HI suivent des approches stylisées, par convention, selon des hypothèses convenues avec le régulateur (ICRP, 1998 ; ICRP, 2013). Ils ont pour objectif d'évaluer la résilience du système de stockage.

Les « *what-if cases* » constituent également un cas particulier de scénarios. Ce sont des cas de calcul volontairement irréalistes et dont l'occurrence est néanmoins postulée afin d'éprouver la robustesse du système. Un « *what-if case* » pourrait être par exemple : « que se passerait-il si tous les superconteneurs renfermant les déchets chauffants se brisaient tous en même temps avant la fin de la phase thermique ? ». Ce cas est d'autant plus irréaliste que les superconteneurs sont censés résister des milliers d'années au-delà de la phase thermique mais aussi parce qu'on suppose qu'ils se

¹⁰¹ Les intrusions humaines volontaires (et malveillantes), quant à elles, ne relèvent pas du domaine de la sûreté nucléaire mais bien de la sécurité nucléaire. Ces scénarios ne sont possibles que s'il existe encore une mémoire du stockage. Cette mémoire étant corrélée à une surveillance du site ou à un contrôle institutionnel du stockage, la prévention de tels scénarios est active et limitée dans le temps.

briseraient tous en même temps. Bien que de probabilité nulle, cet événement n'est pas physiquement impossible et l'envisager permet de se donner une idée de la réserve de sûreté du système. Toutefois, l'interprétation de tels scénarios et la communication de leurs résultats constitue un défi en soi comme le confirme l'AEN :

« The treatment of arbitrary scenarios other than those relating to human intrusion is considered or required by several regulators. These scenarios, often called “What if” scenarios, can be defined as imposed or conventional scenarios for which the occurrence of an event or random phenomenon is postulated. It is generally possible to exclude these scenarios from all plausible evolutions of the disposal system through design or the level of knowledge available. A typical example of this type of scenario is a postulated failure of a confinement barrier for undefined reasons. These scenarios are mainly used for assessing the robustness of the disposal system and the relative importance of some of its components or functions. Due to the arbitrary nature of these assigned or assumed perturbations, no regulatory criteria are associated with this type of evaluation. »
(NEA, 2012e)

Bien qu'aucun critère réglementaire ne puisse être opposé aux résultats d'un « *what-if case* », l'obtention de doses dépassant éventuellement largement les limites autorisées rend malaisé leur interprétation et le crédit qu'il faut ou non leur accorder dans l'appréciation d'un dossier de sûreté.

Le point commun de tous ces scénarios est d'envisager une perturbation possible de l'évolution du système pendant la période d'évaluation de la sûreté. Cette dernière est conventionnellement fixée à un million d'années (NEA, 2004b). En effet, au-delà, les incertitudes augmentent exponentiellement et il n'est pas *a priori* raisonnable de pousser l'évaluation plus avant sous peine d'entrer dans de la pure spéculation. La tenue des barrières ouvragées peut être évaluée à l'horizon d'une centaine de milliers d'années et l'évolution de la roche hôte à un million d'années soit une unité de temps géologique (NEA, 2004b). Bien sûr, les modèles de calculs peuvent envisager des échelles de temps bien supérieures mais les résultats obtenus sont toujours *ceteris paribus* et c'est précisément cette condition qui devient irréaliste.

L'horizon du million d'années est aussi corroboré par le résultat des analyses de sûreté elles-mêmes. En effet, au cours de ce million d'années, les produits de fission et d'activation qui sont les principaux contributeurs de la dose aboutissant dans la biosphère ont décru. Seuls les actinides peu mobiles dans la roche hôte et nettement moins contributeurs de la dose peuvent encore engendrer un second pic. Certains d'entre eux, comme l'U-238 ont une demi-vie équivalente à l'âge de la terre et il est donc vain d'espérer le confiner pour l'éternité.

La figure 4-5 ci-dessous illustre le débit de dose (en mSv/an) typique d'un stockage géologique de combustible usé – le déchet le plus pénalisant sur le plan radiologique – dans une argile peu indurée de type argile de Boom ou argile yprésienne, située à 400 mètres de profondeur, pour deux cas de conservatisme variable. Dans le cas le plus conservatif, le confinement ouvrages (*containment*) est de 100 000 ans (cas de référence) et la durée de vie de la matrice de 300 000 ans. L'ordonnée va jusqu'à 1E-20 mSv/a, ce qui n'a pas de sens d'un point de vue radiologique mais ce qui permet d'apprécier les tendances de la modélisation (i.e., la forme des courbes). Les radionucléides non retardés dans l'argile, Cl-36, I-129, Se-79 et C-14, constituent les principaux contributeurs de la dose pendant le premier million d'année. Le C-14 est de courte durée de vie en comparaison des autres radionucléides non retardés et il aura totalement décru avant l'échéance du million d'années. Le pic de C-14, bien que négligeable par rapport aux autres pics, peut être considéré comme relativement haut dans cette figure, en raison d'hypothèses très conservatives (i.e., durée de vie des claddings¹⁰² et parties structurelles supposée nulle). Dans le cas moins conservatif, le confinement ouvrages tient plus longtemps (+/- 500 000 ans) et la durée de vie du déchet est plus longue (i.e., pas de relâchement instantané), ce qui explique la diminution d'un ordre de grandeur du plateau. Le deuxième pic est celui des cations tels que le Cs-135 qui sont sorbés mais qui peuvent subir une diffusion de surface. Le troisième pic est celui des actinides après 100 millions d'années qui, dans le cas le moins conservatif, c'est-à-dire le plus réaliste, est négligeable (les expériences de migration montrent d'ailleurs la quasi-immobilité des actinides dans le premier mètre

¹⁰² Il s'agit des gaines enveloppant les pastilles de combustible et isolant celles-ci du fluide caloporteur du circuit primaire d'un réacteur.

d'argile). Le cas le plus conservatif montre un pic d'actinides plus élevé en raison d'instabilités numériques du modèle. Les deux cas de calcul montrent une courbe de dose en dessous de la contrainte de dose (0.1 mSv/a), elle-même située en dessous de la dose moyenne reçue par l'irradiation naturelle venant de différentes sources (~ 2.4 mSv/a) (Capouet M., communication personnelle, 2021).

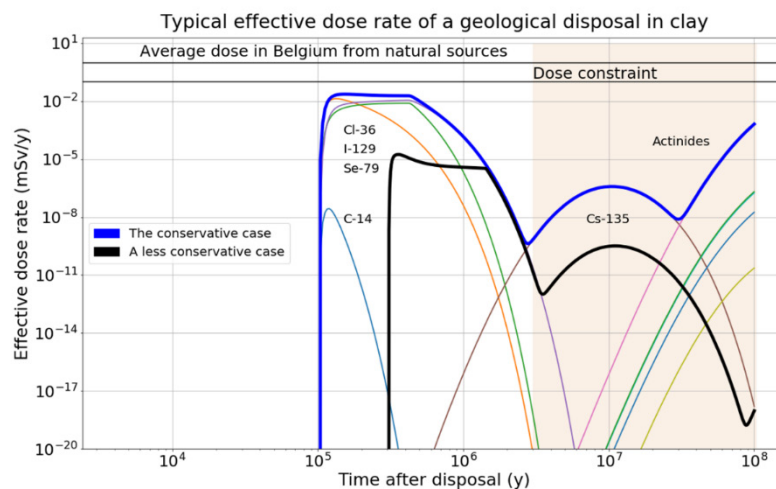


Figure 4-5 – Débit de dose (en mSv/an) typique d'un stockage géologique de combustible usé dans une argile peu indurée à 400 mètres de profondeur, pour deux cas de conservatisme variable. Dans le cas le plus conservatif, le confinement ouvrages (containment) est de 100 000 ans (cas de référence) et la durée de vie de la matrice de 300 000 ans. Dans le cas moins conservatif, le confinement ouvrages tient plus longtemps (+/- 500 000 ans) et la durée de vie du déchet est plus longue (i.e., pas de relâchement instantané). Dans les deux cas la courbe de dose reste en dessous de la contrainte de dose (0.1 mSv/a), elle-même située en dessous de la dose moyenne naturellement en Belgique (~ 2.4 mSv/a) (Capouet M., communication personnelle, 2021).

4.6 Les scénarios pénalisants

Dans sa guidance portant sur les critères de radioprotection à long terme, l'AFCN définit un cas particulier de scénarios, les *scénarios pénalisants*, afin de faire face aux incertitudes affectant le très long terme (AFCN, 2011b ; AFCN, 2012a ; AFCN, 2017b).

Ainsi l'AFCN précise que :

« Les incertitudes concernant l'évolution des performances du dépôt augmentent avec le temps, à tel point qu'à l'issue d'une certaine période, il n'est plus raisonnable de vouloir prédire avec confiance l'évolution de ces performances (sans nécessairement devoir présumer de la perte totale de ces performances). Il faut alors avoir recours aux « scénarios pénalisants » (...) pour évaluer l'impact radiologique (enveloppe). » (AFCN, 2017b, §4.4)

L'AFCN donne une définition du qualificatif « enveloppe » par rapport aux scénarios dans sa guidance « SAR » :

« Un scénario est considéré comme « enveloppe » vis-à-vis de différentes évolutions et états lorsque l'impact radiologique qui lui est associé est supérieur ou équivalent aux impacts associés à ces évolutions et états. » (AFCN, 2012b ; AFCN, 2014c)

L'AFCN explicite l'objectif de tels scénarios dans un projet de complément d'arrêté royal portant sur les prescriptions de sûreté des installations nucléaires (M.B., 2011) :

« [Les scénarios pénalisants sont] destinés à représenter l'évolution du système de stockage définitif lorsque ses performances ne peuvent plus être évaluées de façon fiable » (AFCN, 2013d, p. 30)

En pratique, ces scénarios cherchent à étudier l'évolution du système au-delà de la période habituellement retenue pour une évaluation de sûreté, c'est-à-dire au-delà de la période de « préservation des performances » du million d'années (AFCN, 2013e, p. 7 ; Weetjens, 2013). C'est ce qui distingue notamment les scénarios pénalisants des autres types de scénarios exposés précédemment. Mais ce n'est pas la seule distinction. Le scénario pénalisant doit également représenter les niveaux de performance (en confinement et en isolation) les plus faibles pouvant être atteints (AFCN, 2012b).

Nous verrons, à la section 6.6, que ce type de scénarios pose une série de difficultés à l'ONDRAF parmi lesquelles :

- une contradiction avec la notion même de scénario puisque le scénario est censé constituer un développement « *représentatif des comportements envisageables du système de stockage* » (AFCN, 2012b,

§6.7 ; AFCN, 2014c, §6.6), alors que « [les scénarios pénalisants] *n'ont donc pas pour vocation de représenter une évolution du comportement du système* » (AFCN, 2012b, §6.7.4 ; AFCN, 2014c, §6.6.4) ;

- une contradiction dans les textes puisque le complément d'arrêté royal parle toutefois de *représentation de l'évolution du système* (AFCN, 2013d) ;
- une difficulté herméneutique reposant sur le fait que le scénario pénalisant sous-tend le développement d'un comportement envisageable tout en prenant acte du fait que les performances du système sur lesquelles ce comportement est développé ne sont pas fiables. *La représentation d'un tel comportement peut-elle donc être fiable ?* A cette difficulté s'ajoute encore la détermination de performances minimales mais non nulles, en confinement et en isolation, qui soulève la question de la justification de ces *minima*.

Chapitre 5 Plan de la thèse

Tenter de comprendre la différence d'interprétation, entre l'ONDRAF et l'AFCN, du principe d'optimisation de la sûreté appliqué aux stockages géologiques de déchets requiert *a priori* de comprendre deux choses : ce que l'on entend par sûreté (chapitre 6) et ce que l'on comprend par optimisation (chapitre 7). Dans cette thèse nous chercherons donc à interroger, de façon quasi simultanée, la sûreté nucléaire et la protection radiologique dont le principe d'optimisation est issu, quant à leurs définitions et leurs portées respectives.

La sûreté nucléaire sera investiguée par rapport à la sûreté entendue en son sens le plus commun et ensuite par rapport à la définition spécifique que lui confère l'AIEA, comme « l'obtention des conditions d'exploitation correctes ». Cette démarche nous fera questionner la *sûreté de fonctionnement* des systèmes industriels conventionnels en formulant l'hypothèse que les stockages géologiques peuvent y être assimilés. Cette investigation nous permettra de découvrir les exigences de la *démonstration de fiabilité* dont la *démonstration de sûreté* pourrait bien être l'héritière. Dans la filiation de la notion de *disponibilité*, également constituante de la *sûreté de fonctionnement*, nous retrouverons les possibles origines du principe BAT¹⁰³ (*Best Available Techniques*), un principe corollaire du *principe d'optimisation* pour les stockages. Parmi les attributs de la *sûreté de fonctionnement*, l'*innocuité* retiendra notre attention et la piste de la *preuve d'innocuité* en tant que *démonstration de sûreté* sera investiguée. Cette piste

¹⁰³ « BAT » (*Best Available Techniques*) est l'apocope consacrée par la directive européenne 96/61/EC (EC, 1996) du BATNEEC (*Best Available Techniques Not Entailing Excessive Costs*) introduit par la directive européenne 84/360/EEC (EC, 1984). C'est cette apocope qui sera le plus souvent utilisée dans la suite du texte, sauf exception, de manière à se conformer à l'usage actuel.

nous conduira à considérer la sûreté et la précaution, articulées toutes les deux autour de la notion de risque, comme partageant un terreau conceptuel commun. Une première discussion éthique sera ouverte à l'aune du *Principe responsabilité* de Jonas (Jonas, [1979] 1995) et du *catastrophisme éclairé* de Dupuy (Dupuy, 2002). Cette discussion alimentera la démarche épistémologique en discutant les limites de la *preuve d'innocuité* comme possible *démonstration de sûreté*. Ce premier développement théorique autour du concept de sûreté sera corroboré par l'expérience de terrain qui fournit, par la discussion des scénarios pénalisants proposés par l'AFCN, une possible analogie à la focalisation sur le *scénario du pire* en tant que composante de la *preuve d'innocuité* (**chapitre 6**).

Les trois principes de la protection radiologique, dont le principe d'optimisation fait partie, seront étudiés au niveau de leurs genèses respectives et leurs influences mutuelles. La formalisation de ces principes sera discutée avec le cadre moral de protection des générations futures en prolongeant la réflexion de Jonas dans une perspective déontologique et conséquentialiste. L'équité intergénérationnelle sur laquelle cette investigation débouchera sera questionnée par les principales théories de justice sociale qui relèvent cet enjeu : l'*utilitarisme*, l'éthique *libérale-égalitaire* de Rawls, les *capabilités* de Sen, la *durabilité* de Barry ou encore le *suffisantisme*¹⁰⁴. La place prépondérante de l'optimisation au sein de la protection radiologique ainsi qu'en tant que lien entre la sûreté et la protection radiologique sera mise en évidence en proposant une cartographie de leurs influences mutuelles (**chapitre 7**).

Le caractère ubiquiste du principe d'optimisation étant établi, son évolution sera retracée en croisant les vues tant de l'AIEA que de la CIPR. Son expansion en dehors du champ strictement opérationnel de la protection radiologique sera analysée à mesure qu'il pénètre le domaine de la sûreté et qu'il établit un mode de pensée guidant la sûreté et le développement des systèmes de stockage. Ses liens étroits avec le principe BAT identifié plus tôt ainsi qu'avec le principe de précaution donnera corps à une dualité du principe

¹⁰⁴ Traduction de « *sufficientarianism* » en anglais (Gosseries, 2006)

d'optimisation : le principe ALARA et un principe de conception des systèmes de stockages.

Nous chercherons à montrer que l'élargissement du principe d'optimisation est peu justifié mais aussi que cet élargissement peut entraîner des conséquences indues lorsque les techniques d'aide à la décision, valables en protection radiologique et aidant la recherche d'optimum, sont transposées à la sûreté. L'impossibilité de réduire la sûreté à une fonction d'utilité rend, en effet, l'utilisation de ces méthodes arbitraire (**chapitre 8**).

Afin d'approfondir le constat de cet élargissement et lui fournir un cadre théorique d'analyse, les travaux de *Herbert Simon* seront consultés. Ceux-ci permettront de relier la recherche d'optimisation à un type particulier de rationalité, la *rationalité substantive*, dont on peut montrer les insuffisances tant théoriques que pratiques. Or les solutions à un problème complexe ne résultent que rarement d'une optimisation et répondent le plus souvent à une *rationalité procédurale* en quête de « *satisficing* » (Simon, 1956 ; Simon, 1969 ; Simon, 1979). A ce stade de la réflexion, il sera permis de supposer que l'ONDRAF et l'AFCN s'alignent sur des modèles de rationalité concurrents (**chapitre 9**).

Pour obtenir la confirmation d'une possible différence de rationalités entre l'AFCN et l'ONDRAF, tout en analysant en profondeur ce qui constitue leur principale pomme de discorde, l'application du principe d'optimisation au choix de la roche hôte sera présentée comme étude de cas. L'étude de cas passera par l'analyse de documents exprimant la prise de position de l'AFCN à l'égard des travaux de l'ONDRAF et confirmera l'hypothèse de rationalités différentes en révélant également, aux côtés des dimensions proprement épistémologiques, des *indices socio-politiques* (voir section 10.2.6). Fort de cette confirmation, le cadre théorique de Simon sera concrètement appliqué à la question de l'optimisation de la roche hôte et révélera une différence de cadrage, entre l'ONDRAF et l'AFCN, de la problématique à l'examen.

Bien que théorisée, cette différence n'en restera pas moins inexpliquée tant que les valeurs et les normes derrière les préférences de ces acteurs institutionnels ne seront pas révélées. En outre, la question de l'optimisation revêtant, par nature, un habitus utilitariste, une distance critique sera prise par rapport à la *rationalité instrumentale* de Simon au profit de la *théorie de*

la rationalité ordinaire de Boudon afin de pouvoir envisager, sans biais, d'autres théories de justice sociale. A la recherche des motivations d'ordre éthique conduisant aux choix de l'AFCN et de l'ONDRAF, notre démarche de recherche se penchera une nouvelle fois sur le domaine de la sûreté par l'analyse des déclarations stratégiques des deux institutions. Des fiches signalétiques pour l'AFCN et l'ONDRAF seront finalement dressées avec leurs profils de rationalité et les valeurs morales qu'ils semblent défendre (**chapitre 10**).

Première partie : de la protection radiologique à la sûreté, analyse épistémologique et éthique

Chapitre 6 La « sûreté », concept inclusif et omniprésent

« *Safety is a warm and fuzzy feeling.* » (Jensen, 2010)

Ce chapitre ouvre la première partie de notre question de recherche sur la relation entre la sûreté (nucléaire) et la protection radiologique et, plus particulièrement, sur le rôle du principe d'optimisation dans l'établissement de ce lien. En tant que premier volet, il interroge d'abord la nature de la sûreté, un concept tellement large et familier qu'il se dérobe à l'objectivation (voir section 6.1). L'examen de la sûreté de fonctionnement des systèmes industriels tente de fournir des éléments de réponses à travers les entraves, les moyens et les attributs de la sûreté (voir section 6.2) et permet d'identifier une origine possible à la démonstration de sûreté dans la démonstration de fiabilité.

En outre, un des attributs de la sûreté nous invite à considérer la preuve d'innocuité comme possible démonstration de la sûreté (voir section 6.3). La discussion de la preuve d'innocuité passe par l'analyse de trois composantes : la norme d'un dommage zéro, l'inversion de la charge de la preuve ainsi que la focalisation sur le scénario du pire. Au terme d'une première discussion, nous concluons que les critiques de l'exigence d'innocuité n'épuisent pas totalement la complexité de celle-ci en tant que possible démonstration. Un détour par le *Principe Responsabilité* de Jonas, de même que par le principe de précaution qui partagent de nombreux points communs avec la sûreté dans le contexte des stockages géologiques (voir section 6.4), permet d'approfondir la question de l'exigence d'innocuité à la lumière du *catastrophisme éclairé* de Jean-Pierre Dupuy (voir section 6.5).

6.1 Vers une impossible définition

**« Sûreté : 1. caractère de celui sur qui l'on peut compter
2. Etat de celui qui n'a rien à craindre pour sa personne
ou pour sa fortune. » (Littré, 1882)**

La « sûreté » n'est étrangement pas définie par l'AIEA, du moins pas dans le sens qu'en donnerait un dictionnaire. Pourtant, avec la notion de « sécurité », elle constitue l'une des préoccupations majeures de cette organisation internationale. Le glossaire de l'AIEA (IAEA, 2007a ; IAEA, 2007b) ne fait qu'en préciser la portée, en circonscrit le champ lexical mais ne fournit aucune définition *stricto sensu*. L'AIEA, dans ses publications et normes de sûreté, abrège l'expression « sûreté nucléaire » en « sûreté » (IAEA, 2007a, p. ii) et tient donc l'une pour l'autre en l'absence de mention contraire. Selon Rasa Ptasekaite, juriste au ministère de l'environnement suédois et membre de l'association de droit nucléaire international, même l'instrument de droit international fondamental pour la sûreté – *la Convention sur la sûreté nucléaire* (IAEA, 1994) – ne définit pas ce qu'est la sûreté nucléaire (Ptasekaite, 2014, p. 72).

L'usage du mot « sûreté » est, quant à lui, précisé dans le glossaire de l'AIEA :

« 'sûreté' s'entend de la protection des personnes et de l'environnement contre les risques radiologiques, et de la sûreté des installations et des activités donnant lieu à des risques radiologiques. Le terme 'sûreté' tel qu'employé ici et dans les normes de sûreté de l'AIEA comprend la sûreté des installations nucléaires, la sûreté radiologique, la sûreté de la gestion des déchets radioactifs et la sûreté du transport des matières radioactives, mais exclut les aspects non radiologiques de la sûreté. » (IAEA, 2007a, p. 169)

Il s'agit d'un usage auquel l'AIEA rattache également l'expression « protection et sûreté » que l'agence viennoise identifie encore à « radioprotection et sûreté nucléaire » (IAEA, 2007a, p. ii), ce qui n'est pas sans poser de problème par la confusion qu'elle crée avec la notion de protection radiologique (voir chapitre 7).

Dans l'extrait ci-dessus, on voit que la « sûreté » est renvoyée à elle-même dans une définition quelque peu circulaire et la tautologie n'est évitée que parce que le champ d'application de la sûreté est restreint aux risques radiologiques uniquement. La sûreté non liée aux rayonnements n'est en effet pas couverte. Les domaines d'application de la sûreté telle que l'entend l'AIEA sont explicitement énoncés et invitent à rechercher, dans l'expression « sûreté nucléaire », un socle sémantique plus robuste.

A l'entrée « sûreté nucléaire » du glossaire de l'AIEA, on trouve une définition par rapport au risque et à l'accident :

« Sûreté (nucléaire) : Obtention de conditions d'exploitation correctes, prévention des accidents ou atténuation de leurs conséquences, avec pour résultat la protection des travailleurs, du public et de l'environnement contre des risques radiologiques indus. »
(IAEA, 2007a, p. 170 ; NEA, 2008, p. 11).

Les conditions d'exploitation correctes auxquelles on se réfère sont celles qui permettent d'éviter les accidents ou d'en atténuer les conséquences. On en déduit, par la négative, que la sûreté se définit par l'absence d'accidents ou, en rejoignant Ptasekaite, par la restriction de leur vraisemblance (Ptasekaite, 2014, p. 72).

La difficulté de définir un terme aussi général que « sûreté » tient évidemment dans la familiarité que nous entretenons avec la notion qu'il véhicule. Chacun a une perception de la sûreté et celle-ci vaut pour définition. Une telle approche, qui fait appel au sens commun, s'entache évidemment de subjectivité. La sûreté, concept par trop usé par le quotidien, relève de l'opinion. La difficulté à l'appréhender scientifiquement ne tient probablement pas que de sa polysémie ou de sa complexité (obstacles externes) ni de la « faiblesse » éventuelle de notre esprit, elle réside aussi, comme le dirait Bachelard, dans « l'acte intime de connaître ». On se heurte donc ici à un « obstacle épistémologique ». Car si la sûreté naît de l'opinion, traduisant nos besoins en connaissances, cette dernière confond l'utilité de

l'objet et la vraie nature de celui-ci (Bachelard, 1999)¹⁰⁵. Or c'est cette nature qui nous intéresse. Si la sûreté apparaît comme un fourre-tout mal, voire pas défini, c'est peut-être en effet parce qu'elle provient de l'élection d'un besoin comme concept et compte sur une certaine croyance commune pour lui donner sens.

C'est donc à ce sens commun qu'il s'agira de faire appel à chaque fois qu'une mesure de sûreté sera développée ou qu'un indicateur de sûreté sera défini. La démonstration de sûreté sera celle qui, ralliant le plus grand nombre d'interlocuteurs à un consentement, permettra de gagner la confiance des pairs et, via les institutions publiques, celle des citoyens. Voici pour l'objectif. Le concept n'en est pas pour autant précisé. La question pourrait même sembler rhétorique tant il est admis que définir un terme d'usage commun finit par générer une régression à l'infini à laquelle seul l'usage, précisément, permet d'échapper.

Le problème de la sûreté est qu'elle est au centre d'enjeux technologiques et de société, au cœur de textes légaux et réglementaires, nationaux et internationaux et qu'elle ne semble reposer que sur une certaine idée commune fondée dans l'intersubjectivité. Bâtir un discours scientifique sur elle et autour d'elle, prouver son existence de façon irréfutable en tant qu'objectif atteint ou à atteindre relève donc d'une incroyable gageure mais aussi d'une nécessité. L'*obstacle épistémologique* de Bachelard s'incruste sur une connaissance non questionnée, avec l'effet pervers et aggravant que souligne Bergson : « *notre esprit a une irrésistible tendance à considérer comme plus claire l'idée qui lui sert le plus souvent* », reflétant ainsi une clarté intrinsèque abusive (Bergson dans Bachelard, 1999). Nous pensons que le *safety case* du stockage géologique de déchets radioactifs relève, lui aussi, de cette même gageure.

Poser la question du sens de la sûreté, c'est refuser le sentiment commun et confortable de l'appropriation subjective du concept, c'est interroger les bases d'un possible dialogue entre les acteurs en charge de celle-ci. S'il est effectivement impossible de percer l'intime nature de la sûreté, ne faut-il pas

¹⁰⁵ Bachelard précise que même si la science légitime l'opinion dans certains cas, ce sera toujours pour d'autres raisons que celles qui fondent l'opinion ; de sorte que l'opinion a, en droit, toujours tort (Bachelard, 1999).

au moins se poser la question de la représentation qu'elle engendre : « quelle vision pour la sûreté ? » et ce, afin de comprendre quelle doctrine de conduite raisonnablement pensée elle donne lieu à développer chez ceux qui s'en portent garants. Sans cette interrogation primordiale, la sûreté pourrait être galvaudée et son concept devenir un fourre-tout militant, un prétexte à la revendication d'un « toujours plus » ou d'un « jamais assez », un lieu commun ronronnant dans le sentiment d'un besoin toujours inassouvi.

En réponse à l'expression démagogique « la sûreté n'a pas de prix », le pragmatique et le scientifique pourraient se rejoindre dans une réponse commune : « elle a pourtant un coût », financier certes mais aussi et surtout, intellectuel¹⁰⁶.

¹⁰⁶ Ce dialogue entre d'une part, le pragmatique et d'autre part, l'idéaliste un peu ingénu clamant ses bons sentiments est inspirée de dialogues vécus. Lors de réunions, différents acteurs du secteur sont invités autour de la table tels l'Administration de l'Energie, l'ONDRAF et l'AFCN. D'autres réunions réunissent l'ONDRAF, l'Administration de l'Energie et les producteurs (d'énergie et donc de déchets) tels que Synatom et Engie-Electrabel, ces derniers tenant les cordons de la bourse. La passe d'armes est toujours la même à un moment donné du débat technique : l'AFCN clame que seule la sûreté est au cœur de leurs préoccupations et que celle-ci n'a pas de prix. Cependant, pour les producteurs, elle a un coût financier direct ; pour l'Administration de l'Energie – représentant de l'Etat belge – elle a un coût direct (en tant que producteur de déchets et héritier des passifs nucléaires) et un coût citoyen (l'Etat détenant l'ultime responsabilité de la gestion en cas de défaillance) et pour l'ONDRAF, un coût non seulement direct sous forme de budget de fonctionnement mais aussi un coût d'ordre intellectuel, le degré d'intelligibilité des solutions et leur caractère raisonnable rendant ou non possible la réalisation desdites solutions.

6.2 Sûreté ou fiabilité ? L'apport historique des systèmes industriels « classiques »

6.2.1 Lien entre le monde industriel classique et le monde nucléaire : cas particulier des stockages de déchets radioactifs

En dépit du repli que le monde nucléaire a tendance à opérer sur lui-même, celui-ci bénéficie de nombreuses avancées issues des domaines industriels plus classiques. Les concepts manipulés en matière de sûreté nucléaire ne sont pas toujours innovants, du moins au plan théorique. Il faut aussi reconnaître que le monde nucléaire est, à son tour, porteur d'idées pour les autres secteurs de sorte qu'une ingénierie conceptuelle commune se dessine, les modes de pensée se recoupant largement. Nous aborderons ce lien dans la présente section en tentant de s'inspirer de la doctrine générale concernant la sûreté de fonctionnement des systèmes industriels dont le nucléaire pourrait n'être qu'un cas particulier. Soulignons toutefois que, dans le langage courant, le « nucléaire » est principalement associé à la production d'énergie et donc aux réacteurs. Dans une très moindre mesure, il désignera également les réacteurs de recherche ou de production d'isotopes médicaux. Dans l'imaginaire collectif, est surtout, sinon exclusivement, considérée comme « installation nucléaire » un réacteur de puissance, alors qu'en réalité, des installations d'entreposage ou de stockage de déchets issus de l'industrie nucléaire le sont également (M.B., 2001). Ceci n'est pas sans importance. Le risque associé à l'industrie nucléaire est considéré le plus souvent comme un risque avéré¹⁰⁷ (Lannoy, 2008, p. 85) par opposition à des risques potentiels¹⁰⁸ comme ceux liés par exemple aux

¹⁰⁷ C'est-à-dire un risque dont on peut estimer la probabilité et la gravité.

¹⁰⁸ Nous sommes conscients que le terme « risque potentiel » est une expression mal choisie qui laisse à penser un « risque de risque ». En réalité cette expression est utilisée en opposition au « risque avéré » et permet habituellement de distinguer le monde de la prévention (risque avéré) de celui de la précaution (risque potentiel). Il faut donc comprendre, comme le suggère Jean-Pierre Dupuy (Dupuy, 2002, p. 106) qu'il s'agit d'un événement dangereux qui peut se produire ou non, comme tout aléa mais à l'occurrence duquel il n'est pas possible d'assigner une probabilité, contrairement au risque avéré. Il s'agit donc du cas de l'incertain.

organismes génétiquement modifiés (OGM). Or l'absence de retour d'expérience¹⁰⁹ pourtant essentiel à l'analyse de risques, le recours à un objet naturel qu'est la roche hôte possédant une variabilité intrinsèque ainsi que la très grande échelle de temps envisagée pour garantir la sûreté font du stockage géologique de déchets une source de risques potentiels et non de risques avérés. La prédictibilité d'un réacteur, aux mains des physiciens, ne peut en effet être comparée à l'évolution supposée d'un stockage à l'échelle des temps géologiques.

En conséquence, si le « nucléaire » est un cas particulier des systèmes industriels, en référence aux réacteurs, un tel lien d'appartenance ou d'inclusion ne peut être tenté avec le stockage de déchets, fussent ces derniers « nucléaires » ou « radioactifs ». Comme évoqué dans l'introduction de cette thèse, le projet de stockage géologique est, selon nous, un objet dialectique, encore à l'étude. Le stockage, ne serait-ce que par les composants naturels qu'il contient en tant qu'éléments de sûreté, ne saurait

¹⁰⁹ Il nous faut cependant quelque peu nuancer ce propos. On considère à ce jour qu'il n'existe pas d'installation de stockage géologique de déchets hautement radioactifs. Mais il existe bien des stockages géologiques de déchets moyennement radioactifs ainsi, par exemple, le Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) aux Etats-Unis destiné au stockage des déchets transuraniens, c'est-à-dire des déchets qui, selon la réglementation américaine, ont été contaminés par des radionucléides transuraniens émetteurs alpha (i.e., les éléments transuraniens ont un nombre atomique supérieur à celui de l'uranium) possédant des demi-vies supérieures à 20 ans et à des concentrations supérieures à 3.7 MBq/kg. Le WIPP est situé à Carlsbad dans le Nouveau Mexique. Cette installation stocke les déchets de recherche et de production des armes nucléaires américaines pour une période de 10 000 ans. Il ne s'agit donc pas d'une installation civile destinée à stocker les déchets de réacteurs de puissance pour une période de l'ordre du million d'années. Cependant, cette installation étant unique en son genre, elle offre un précieux retour d'expérience, surtout depuis les incidents de 2014 ayant forcé l'arrêt de son exploitation pendant deux ans. Il existe également des installations géologiques dans d'autres pays tels l'Allemagne et la Hongrie, ceux-ci n'abritent pas davantage de déchets hautement radioactifs. Dans le passé, l'Allemagne a utilisé deux mines de sel (évaporites) désaffectées pour y stocker des déchets de faible et moyenne activité, respectivement de 1967 à 1978 (Asse), à des profondeurs de 511, 725 et 750 mètres (Müller, 2021) et de 1971 à 1998 (Morsleben). Ce procédé, qui consistait à utiliser des cavités souterraines existantes sans appliquer l'approche systémique qui sied aux stockages (i.e. concept multi-barrières, multi-fonctions), maintenant internationalement recommandée, a conduit à l'arrêt définitif des exploitations. Les déchets stockés à Asse vont en être récupérés. Les autorités fédérales ont donné l'autorisation de démarrer la première phase de récupération des déchets en vue de leur gestion ultérieure. L'installation de Morsleben va également être fermée et scellée.

être totalement assimilé à un « système industriel » sans se compromettre dans une réduction facile.

Cette précaution étant posée, nous recherchons, dans la prochaine section, comment l'ingénierie classique définit la sûreté, en clarifiant tout d'abord certaines conventions terminologiques.

6.2.2 Sûreté et sécurité : pagaille terminologique

Le monde nucléaire inverse les définitions de sûreté et de sécurité telles qu'elles sont habituellement utilisées dans les autres secteurs. En effet, les secteurs industriels non nucléaires considèrent la portée de ces vocables de la façon suivante¹¹⁰ :

- la « **sécurité** » se réfère aux **événements accidentels** (i.e. non intentionnels) ;
- la « **sûreté** » se réfère aux **actes de malveillance** (i.e. intentionnels).

Le monde nucléaire en établit l'usage exactement opposé (AFCN, 2018a)¹¹¹ :

- la « **sûreté** » se réfère aux **événements accidentels** (i.e. non intentionnels) ;
- la « **sécurité** » se réfère aux **actes de malveillance** (i.e. intentionnels).

En anglais, dans les domaines non nucléaires, il s'agit de faux amis, « *safety* » se traduisant en français par « sécurité » (*freedom from danger*) e.g. *in place of safety* (en lieu sûr), *to ensure somebody's safety* (assurer la sécurité de quelqu'un) *safety belt* : ceinture de sécurité¹¹², et « *security* » par « sûreté »

¹¹⁰ <http://www.suretedefonctionnement.fr/2014/07/securite-ou-surete.html> [Consulté le 19 décembre 2018].

<https://surete.securitas.fr/questions-frequentes/difference-surete-securite> [Consulté le 4 août 2021].

¹¹¹ <https://afcn.be/fr/dossiers-dinformation/le-transport-de-matieres-radioactives/surete-et-securite-du-transport-de-4>, mise à jour du 26/01/2018 [Consulté le 4 août 2021].

¹¹² La distinction n'est cependant pas toujours aussi claire. On traduit *safety* parfois par « sûreté » e.g. *safety bolt* (verrou de sûreté) mais l'acception demeure (Le Robert & Collins, 1995).

e.g. *security agreement* (accord de sûreté), *security police* (service de la sûreté)¹¹³ (Le Robert & Collins, 1995).

Dans le monde nucléaire francophone, qui ne peut résister à l'intrusion des anglicismes, surtout dans son jargon professionnel, un ajustement terminologique relevant du barbarisme inter-linguistique est d'usage. C'est ainsi que *safety* se traduit par sûreté, validant le faux ami par facilité, et se réfère donc, dans le monde nucléaire, à l'occurrence d'événements non intentionnels alors que la *security* se traduit par sécurité. *Security* se réfère donc, lorsqu'il s'agit de l'exception nucléaire, aux actes de malveillance et de sabotage.

Notons que c'est la convention terminologique qui est utilisée dans cette thèse. Il faut cependant garder à l'esprit le résultat de cette gymnastique de vocabulaire lorsque l'on aborde la littérature technique non nucléaire et en particulier si elle est anglophone¹¹⁴.

6.2.3 Sûreté, sécurité et fiabilité

Fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité ont souvent été amalgamés au fil de l'histoire industrielle. Même si la sécurité est une préoccupation qui remonte à l'aube de l'humanité, son concept n'aurait vu le jour qu'à la fin du 15^e siècle (Delumeau, 1989, p. 12 cité dans Le Breton 2004, p. 23). Ce n'est que vers la fin des années quatre-vingt que l'ensemble de ces concepts ont été clarifiés dans la littérature technique francophone par l'ancien Institut français de sûreté de fonctionnement¹¹⁵. Les définitions suivantes sont depuis en vigueur dans l'analyse des risques et la sûreté de fonctionnement industriel (Villemeur, 1988 ; Lannoy, 2008) :

¹¹³ Là encore, la distinction n'est pas toujours aussi claire : *in security* (en sécurité), *job security* (sécurité d'emploi) (Le Robert & Collins, 1995).

¹¹⁴ La Belgique ajoute la difficulté du néerlandais, les organismes fédéraux étant nécessairement bilingues français – néerlandais. Le terme de *veiligheid* désignera la sûreté telle que définie dans notre usage francophone nucléaire alors que *beveiliging* traduira la notion de « sécurité ».

¹¹⁵ ISdF, créé en 1988 à la suite du 6^e colloque « λμ » dont le premier fut tenu en 1978 dans les locaux de l'UNESCO afin de s'intéresser à la sûreté de fonctionnement (Lannoy, 2008, p. 80).

Sécurité : « aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques. » (Villemeur, 1988)

Ou « état dans lequel le risque de dommages corporels ou matériels est limité à un niveau acceptable (norme ISO 8402) »¹¹⁶ (Lannoy, 2008, p. 107)

Sûreté de fonctionnement : « aptitude à fonctionner comme requis et lorsque cela est requis. » (Norme ISO, 2015)

Ou « ensemble des propriétés qui décrivent la disponibilité et les facteurs qui la conditionnent : fiabilité, maintenabilité et logistique de maintenance (EN 13306 ; 2001)¹¹⁷. » (Lannoy, 2008, p. 59)¹¹⁸

Ou encore, « la propriété qui permet à ses utilisateurs [les utilisateurs du système] de placer une confiance justifiée dans le service qu'il [le système] leur délivre. » (Laprie et al., 1995 cités dans Guillerm, 2011, p. 24 ; Avizienis et al., 2001)¹¹⁹. Cette dernière définition remplaçant à nouveau, comme évoqué dans l'introduction, la confiance au cœur de la sûreté.

Disponibilité : « aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires est assurée. » (EN 13306 ; 2001)
Cette aptitude dépend de la fiabilité, de la maintenabilité et de la logistique de maintenance (Lannoy, 2008, p. 104).

Fiabilité : « aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, durant un intervalle de temps donné. » (Lannoy, 2008, p. 104)

¹¹⁶ Norme obsolète. Remplacée par ISO 9000 : 2015 (encore en vigueur en 2019, lors de l'écriture de ces lignes) et où le terme « sécurité » n'apparaît plus.

¹¹⁷ Norme EN13306, Maintenance - Terminologie de la maintenance, 2001, remplacée par EN13306-2017.

¹¹⁸ Avant 1980, on désignait sûreté de fonctionnement par fiabilité. On amalgamait fiabilité, maintenabilité et disponibilité (voire sécurité) (Lannoy, 2008).

¹¹⁹ La sûreté de fonctionnement (de systèmes computationnels) se traduisant alors par « dependability » (Avizienis et al., 2001, p. 2).

C'est la Commission AGREE (*Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment*), créée en 1952, qui introduit la « démonstration de fiabilité » en recommandant de tester les équipements avant usage et dans des environnements contraignants (Kervern, 1995, p. 9 ; Lannoy, 2008, p. 52). La fiabilité est assurée par trois facteurs (Lannoy, 2008, p. 56) qu'il est aisé d'extrapoler au domaine nucléaire et en particulier, au développement de stockages de déchets :

- **La simplicité de conception** : plus l'équipement est complexe, moins sa fiabilité est élevée.

Nous pensons que cette simplicité donne lieu au principe de robustesse intrinsèque dans le domaine des stockages. Apparenté à la robustesse¹²⁰, le principe « BAT » qui préconise l'utilisation des « *Best Available Techniques* » et qui, il ne faudrait pas s'y méprendre, enjoint le recours à des techniques éprouvées (EC, 1996¹²¹) ayant l'aptitude pratique à servir leur objectif (IOMC, 2017) et non nécessairement les plus récentes¹²², pourrait également en être dérivé. En outre, même si ce n'est pas explicite dans la directive qui le définit, nous pensons que le terme « *availability* » fait également référence à la disponibilité en tant qu'attribut de la sûreté de fonctionnement, c'est-à-dire au fait d'être prêt à l'utilisation (Guillerm, 2011, p. 25) ou encore à l'aptitude à accomplir une fonction requise dans des conditions spécifiques (Chafik, p. 5). Cette « *availability* » n'aurait donc que peu de choses à voir avec l'existence « dernier cri » sur le marché¹²³. Quand on sait que le principe « BAT » est issu du droit environnemental (EC, 1996) et est volontiers associé au principe d'optimisation, on entrevoit la portée du facteur « simplicité de conception » dans la sûreté de fonctionnement nucléaire. Remarquons également que cette simplicité de conception fait

¹²⁰ Que l'on peut définir, non sans une certaine circularité, comme la sûreté de fonctionnement face aux fautes externes (Chafik, p. 5).

¹²¹ La directive européenne 96/61/EC qui introduit le principe BAT précise qu'il s'agit du stade de développement le plus *efficace* (...) (EC, 1996, art. 2, nous soulignons).

¹²² Il est bien question de techniques « avancées » mais seulement si elles sont applicables dans le contexte du secteur industriel concerné, dans des conditions économiquement et techniquement viables (EC, 1996, art.2). Il ne s'agit donc pas de techniques expérimentales ou encore en phase pilote.

¹²³ Une existence qui se doit d'être compatible avec une mise en œuvre dans le secteur industriel concerné dans des conditions de viabilité technique et économique (EC, 1996).

également écho à la célèbre loi de Murphy (1949) qui préconise une conception d'objets qui présente la plus faible probabilité de mauvaise utilisation¹²⁴. Cette loi serait aussi, selon certains auteurs, l'une des premières formalisations du principe de précaution (Lannoy, 2008, p. 50).

- **La redondance** : en cas de défaillance d'un composant, d'une structure ou d'un système, un relais est prévu afin de ne pas compromettre le fonctionnement du bien considéré.

Le principe de défense en profondeur, en particulier dans le cas des stockages qui diffère sensiblement de la définition et de l'application dudit principe pour les réacteurs de centrales, se définit par la redondance et la diversité des barrières ou des fonctions de sûreté (NEA, 2008, p. 12). Cette diversité est le corollaire de la redondance. Un circuit de secours n'a vraiment d'intérêt que si son fonctionnement ne repose pas sur les mêmes composants que le circuit primaire dont il assure la relève. La redondance ne suppose pas la simple répétition. Les exemples sont légion : les blocs d'éclairage de secours dans un bâtiment fonctionnent sur des batteries alors que l'éclairage principal est relié au secteur. Les camions de grand tonnage employés dans les exploitations minières à ciel ouvert disposent de deux systèmes de freinage indépendants (l'un électrodynamique, l'autre par friction mécanique), etc.

Notons que cette redondance a un coût, elle nécessite plus de maintenance, plus d'investissement, consomme plus d'énergie, etc.

- **Le dimensionnement pessimiste** : on prend des marges importantes.

Il s'agit là encore d'une « philosophie » de construction qui « surdimensionne » un ouvrage, le plus souvent pour faire face à l'aléa que l'ouvrage pourrait subir et qui n'est pas toujours prévisible mais aussi pour couvrir d'autres types d'incertitude, dès la conception. De

¹²⁴ La loi de Murphy « *if anything can go wrong, it will* » énoncé par Edward Murphy, officier de la US Navy en 1949 n'est pas un canular même si celle-ci n'a jamais pu être démontrée. Tous les ingénieurs savent qu'elle est malheureusement toujours vérifiée car elle a un fondement statistique lié aux grands nombres (en l'occurrence, le grand nombre d'utilisations d'un appareil ou objet dont un mauvais emploi est toujours possible).

façon simplifiée, il s'agira, en ingénierie, de transposer l'adage « qui peut le plus peut le moins ».

Ce dimensionnement pessimiste donne lieu à la pratique du « conservatisme », tant dans l'élaboration physique du stockage que dans les évaluations de sûreté qui l'accompagnent¹²⁵.

Il n'est pas déraisonnable de penser que la démonstration de la fiabilité soit à l'origine de la démonstration de sûreté telle que conçue dans le cas des stockages de déchets radioactifs. Il reste à analyser ce qui de la sûreté de fonctionnement (englobant fiabilité, maintenabilité et logistique de maintenance) et de la disponibilité est à l'origine de la définition de la sûreté telle qu'envisagée par l'AIEA au niveau des stockages. Rappelons que la sûreté nucléaire selon l'AIEA se définit comme suit (voir section 6.1) :

« Obtention de conditions d'exploitation correctes, prévention des accidents ou atténuation de leurs conséquences, avec pour résultat la protection des travailleurs, du public et de l'environnement contre des risques radiologiques indus. » (IAEA, 2007a, p. 170)

Un fait remarquable qu'il convient de relever et qui deviendra, selon nous, une source de confusion par glissement sémantique au fil de l'usage, c'est que la protection des travailleurs, du public et de l'environnement est bel et bien le résultat d'une série d'actions menées en vue de constituer les conditions d'exploitations adéquates. Cette série d'actions relève de la sûreté qui est donc bel et bien un principe actif, un principe de gouvernance là où la protection (radiologique) n'est que le résultat de ces mesures. Veiller à la protection radiologique relève donc de la sûreté et celle-ci englobe une série d'actions et de décisions pour atteindre cette protection. De ce point de vue, la protection (radiologique) n'est donc qu'un (des) objectif(s) de la sûreté.

¹²⁵ On pourra ainsi, en cours de développement, négliger, à escient, une série de facteurs favorables à la sûreté pour rechercher le minimum nécessaire à celle-ci et ne compter que sur ce minimum. Les facteurs négligés constitueront ainsi des réserves sécuritaires dont le décompte et l'évaluation en phase formelle, conféreront au bien envisagé toute sa fiabilité y compris dans des conditions plus rudes que celles initialement imaginées en phase de développement.

Nous comprenons que la fiabilité est une composante essentielle de la sûreté de fonctionnement. La fiabilité dépend elle-même de la robustesse intrinsèque (simplicité de conception), de la redondance auquel on rattache le principe de défense en profondeur et de l'usage du conservatisme dans le dimensionnement des installations. Nous ne serons donc pas surpris de retrouver ces propriétés comme principes de sûreté dans le domaine de la sûreté nucléaire. Notons que la fiabilité participe aussi de la disponibilité¹²⁶, cette dernière pouvant s'exprimer sous la forme d'une probabilité ou d'un pourcentage, en divisant la durée durant laquelle un équipement a effectivement fonctionné et la durée théorique totale durant laquelle on aurait souhaité qu'il fonctionne. Certains spécialistes, tels ceux de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) agrègent même les deux notions, énonçant la fiabilité comme la « *caractéristique d'un dispositif, exprimée par la probabilité qu'il accomplisse une fonction requise dans des conditions données, pendant une période donnée* » (Pesqueux, 2020, p. 11). La fiabilité est donc à la fois une notion qualitative et quantitative (Lannoy, 2008, p. 104). Mais la corrélation entre disponibilité et sûreté de fonctionnement n'est pas toujours positive : sécurité (dans le langage de l'ingénierie classique c'est-à-dire sûreté dans celui de l'ingénierie nucléaire) et disponibilité peuvent aller de pair dans le cas où il n'existe pas de solution de repli possible (ex : transport aérien¹²⁷) alors que si l'état de panne est plus sûr que l'état de fonctionnement (ex : transport ferroviaire, système informatique), une sécurité (sûreté) élevée peut entraîner une disponibilité plus faible (Chafik, p. 5). Dans ce dernier cas, la recherche d'un compromis disponibilité – sûreté de fonctionnement est nécessaire.

La sûreté de fonctionnement se présente le plus souvent sous la forme d'un arbre réunissant les attributs, les moyens et les entraves (figure 6-1) (Guillerm, 2011 ; Avizienis *et al.*, 2001).

¹²⁶ Nous laissons de côté, ici, le rôle de la maintenabilité auquel on peut rattacher la notion de testabilité car elles ne servent pas notre propos. Il s'agit notamment du lien entre la fiabilité et le « vérifiable » (Pesqueux, 2020, p. 11).

¹²⁷ Cet exemple est donné par Wikipédia : https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%BBret%C3%A9_de_fonctionnement#cite_note-NormeTermMaint-4 [Consulté le 4 août 2021].

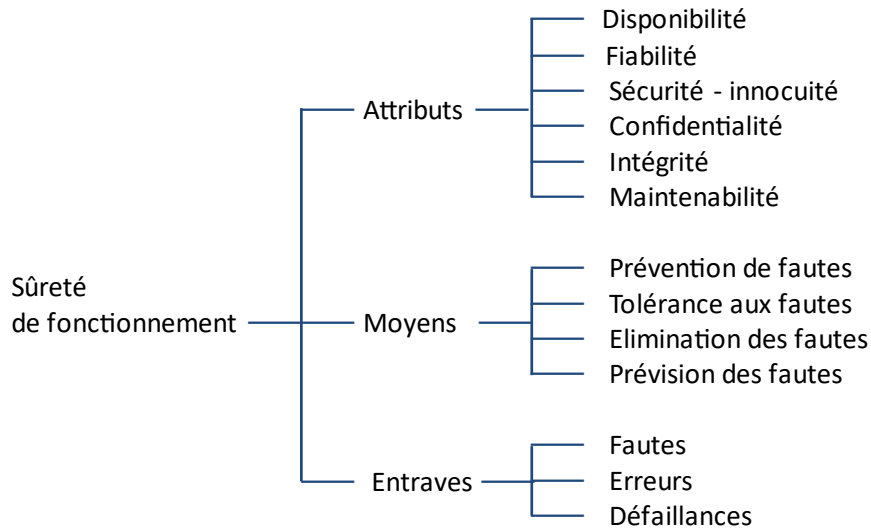


Figure 6-1 – Arbre de la sûreté de fonctionnement (Guillerm, 2011).

La lecture de cet arbre appelle quelques commentaires. Détaillons-le en commençant par le bas.

En ce qui concerne les entraves, nous retiendrons essentiellement les défaillances. En effet, la sûreté de fonctionnement vise essentiellement à réduire le nombre de défaillances, engendrées elles-mêmes par une erreur dont l'origine est à rechercher dans les multiples causes et types de fautes obéissant à la chaîne causale que nous illustrons ci-dessous (figure 6-2) (Guillerm, 2011).



Figure 6-2 – Relation faute-erreur-défaillance (Avizienis et al., 2001)

La typologie des fautes (phénoménologique, intentionnelle, de conception, ...) n'a que peu d'intérêt pour nous¹²⁸, du moins en première intention, contrairement aux défaillances. En effet, si le principe de défense

¹²⁸ Pour plus d'informations à ce sujet voir (Avizienis et al., 2001).

en profondeur est l'un des principes cardinaux de la sûreté nucléaire (Bernier *et al.*, 2017), c'est parce qu'il est mobilisé pour réduire les risques d'occurrence des modes communs de défaillance (i.e. erreurs). Or, la défaillance est une notion (entrave) directement associée à la fiabilité (attribut de la sûreté de fonctionnement). Il en résulte une étroite imbrication de la fiabilité et de la sûreté, la première se présentant comme condition nécessaire de la seconde.

Quant aux moyens associés à la sûreté de fonctionnement, ils ne peuvent renseigner, par définition, la nature de celle-ci. Nous notons cependant que nous les retrouvons dans l'implémentation du principe de défense en profondeur en phase de construction et d'exploitation de l'installation et dont les premiers niveaux s'apparentent à la prévention des fautes ainsi qu'à leur détection et au contrôle des fonctionnements anormaux (IAEA, 1996)¹²⁹. Pour ce qui est de la sûreté à long terme, l'étude de ces moyens n'est pas pertinente.

Saisir l'essence de la sûreté de fonctionnement passe donc inévitablement par l'étude de ses attributs. Nous n'en retiendrons que les trois premiers, après avoir discuté brièvement les raisons de ne pas retenir les autres. En effet, la confidentialité et l'intégrité sont des attributs propres aux systèmes informatiques et au traitement de l'information qui ne nous intéressent pas ici. La maintenabilité que l'on peut définir comme l'aptitude aux réparations (Guillerm, 2011, p. 25) ne concerne pas la sûreté à long terme des stockages géologiques puisque ceux-ci reposent intrinsèquement sur le concept de sûreté passive (voir section 3.2.2.1). Bien que la maintenabilité puisse jouer un rôle dans la sûreté opérationnelle, cet attribut devient non pertinent après la période de fermeture de l'installation souterraine. Il nous reste donc la disponibilité, la fiabilité et la sécurité-innocuité.

Nous avons vu que la disponibilité est un attribut de la sûreté de fonctionnement, en corrélation – positive ou négative – avec la sûreté ainsi

¹²⁹ Durant les phases de construction et d'exploitation, le principe de défense en profondeur s'entend de la façon classique et comporte 5 niveaux. Il ne se résume pas à la diversité et la redondance de barrières physiques ou de fonctions de sûreté comme on l'entend dès que le système de stockage entre en phase passive.

qu'avec le principe BAT¹³⁰, qui joue un rôle important dans le déploiement du principe d'optimisation. Nous reviendrons d'ailleurs largement sur ce dernier principe. Nous avons également montré la proximité de cet attribut avec celui de la fiabilité. Ces attributs sont autant de modalités de déploiement de la sûreté mais ils ne nous révèlent pas totalement la nature de celle-ci.

Le troisième attribut nommé « sécurité-innocuité » dans le vocabulaire de la sûreté de fonctionnement des systèmes (non nucléaires) dégage, quant à lui, une piste d'investigation à laquelle nous consacrons la prochaine section. Nous nous interrogerons ensuite sur la proximité du concept de sûreté avec le principe de précaution dans le prolongement des questions de robustesse et de disponibilité évoquées plus haut.

6.3 Sûreté ou innocuité ?

« **Sûreté** : 5. *Mesure de précaution* » (Littré, 1882)

Démontrer la sûreté d'un stockage de déchets radioactifs reviendrait-il à prouver son innocuité ?

L'innocuité se définissant comme la qualité de ce qui n'est pas nuisible¹³¹ et par extension donc, l'absence (totale) de nuisance, le terme laisse peu de place à l'ambiguïté. Or, même en se gardant de toute discussion sémantique, la proposition ci-dessus n'est pas simple à traiter. Est-il possible pour toute innovation de prouver son innocuité ? Une innovation impliquant par

¹³⁰ *Best Available Techniques/Technology*. Ce principe BAT est officiellement instauré par la directive européenne 96/61/CE (EC, 1996) portant sur la prévention et la réduction intégrées de la pollution bien que son origine semble être plus ancienne. En effet, la directive 84/360/CEE relative à la lutte contre la pollution atmosphérique en provenance des installations industrielles (EC, 1984) en fait déjà mention. De toute évidence, c'est à cette directive de 1984 que l'on doit l'appellation complète du principe : BATNEEC pour *Best Available Techniques Not Entailing Excessive Costs* (EC, 1984, article 8). La littérature secondaire utilise tantôt l'apocope BAT semblant faire peu de cas de la dimension économique tantôt, au contraire, rappelle son libellé global, comme le fait la CIPR. La CIPR stipule toutefois que cette mention d'évitement de coûts excessifs ne remplace pas l'expression « *reasonably achievable* » du principe ALARA (ICRP, 1998). Dans cette thèse, BAT et BATNEEC ou BAT(NEEC) sont synonymes.

¹³¹ Petit Robert, 1987

définition, un au-delà de ce qui est connu, ce qui est à découvrir comporte son lot d'incertitudes et donc de risques potentiels¹³². Dans l'innovation, tous les risques ne sont pas avérés et la prévention seule ne suffit donc pas. Nous avons précédemment soutenu que les stockages géologiques, contrairement aux réacteurs, présentaient aussi des risques potentiels et, étant donné le peu de stockages souterrains existant à ce jour dans le monde, il n'est pas abusif de considérer ceux-ci comme des innovations¹³³. Les risques potentiels relèvent de ceux éventuellement imaginés, suspectés ou craints mais sans que la preuve ne soit apportée par rapport à leur existence ou leur vraisemblance.

En filigrane de cette introduction apparaît le spectre d'un principe bien connu, une occurrence particulière de la prudence en situation d'incertitude et de responsabilité collective : le principe de précaution (Kaiser, 1997 ; Zaccai, 2007 ; Zaccai et Missa, 2000 ; Godard *et al.*, 2002). Dans le *Traité des nouveaux risques*, Godard, Lagadec, Henry et Michel-Kerjan discutent le principe de précaution et la façon dont celui-ci peut se fourvoyer dans une formulation correspondant à une variante simpliste de la règle d'abstention jonassienne – certains parleront « d'interprétation forte » du principe de précaution (Larrère, 2017) – selon laquelle une action n'est autorisée que si son innocuité est démontrée. Nous reviendrons sur cette question à la section 6.4. Lors de cette discussion, ils énoncent trois composantes à l'exigence de preuve de l'innocuité en situation d'absence de certitude scientifique (Godard *et al.*, 2002) :

- La norme d'un dommage zéro (l'innocuité) ;
- L'inversion de la charge de la preuve (prouver l'innocuité) ;
- La focalisation de la prise de décision sur le scénario du pire, dans lequel le dommage doit être nul, ce qui revient à assurer l'innocuité en toute hypothèse.

¹³² C'est-à-dire, pour rappel, des risques hypothétiques, non encore scientifiquement confirmés mais considérés comme possibles (Lannoy, 2008, p. 77).

¹³³ Cette remarque est une prolepse. D'aucuns s'étonneront ou contesteront l'idée d'innovation dans la réalisation de stockages géologiques de déchets. En particulier, face aux technologies nucléaires dites avancées sur lesquelles nous reviendrons en discutant des questions éthiques, dans la section 10.6.2.1.

La première composante est matériellement impossible, le « risque zéro » ou le « dommage zéro » ne peut servir de norme pour l'action collective, à moins de pouvoir disposer de ressources infinies pour la prévention. Il ne s'agirait pas que de ressources matérielles mais aussi d'omniscience. Quand bien même ce dommage zéro pourrait servir de norme dans un cas particulier très précis, cette exigence déséquilibrerait nécessairement le stock de ressources à allouer à la prévention d'autres risques.

En outre, comme le font remarquer les auteurs du *Traité des nouveaux risques*, cette norme ne tient pas compte des avantages liés à la pratique soumise à l'examen et faisant l'objet du risque. Or, il est censé de supposer que la pratique en question soit porteuse d'avantages sans quoi la collectivité n'aurait même pas l'intention de l'envisager.

Enfin, selon ces auteurs, la norme de « dommage zéro » ne vaudrait vraiment qu'en situation où la comparaison d'options est possible et dont l'une ne présenterait aucun risque. Ce genre de situation étant rare, la norme en tant que maxime d'action est invalide. Ce dernier argument est discutable et nous ne souscrivons pas intégralement à ce raisonnement sans pour autant nous départir de la conclusion¹³⁴ car les deux premiers arguments restent valides et la première composante à l'exigence d'innocuité semble ne pas pouvoir se justifier.

En ce qui concerne **la deuxième composante**, elle pose une question qu'il est aisé de reprendre à notre compte : « *Faut-il demander aux promoteurs de projets ou à ceux qui veulent introduire un nouveau produit ou une technique nouvelle d'apporter la preuve d'absence de dommages potentiels avant qu'ils ne puissent voir leurs entreprises autorisées ?* ». Godard et ses collègues en dénoncent le piège rhétorique. En effet, en contexte d'incertitude

¹³⁴ En effet, dans le contexte d'évolution technologique, le progrès ne répond pas toujours à un besoin préalablement identifié et ne sert parfois qu'à renforcer la sphère du confort individuel. Par exemple, s'il est évident que la découverte de la pénicilline a permis de sauver de nombreuses vies humaines et a répondu à un besoin identifié, il est nettement moins évident, en revanche, de prouver que l'invention des smartphones ait pu sauver des vies autrement que de façon très marginale. Même s'il n'y avait pas un éventail d'options ouvert, l'exigence de dommage zéro aurait pu tempérer cet essor technologique qu'est l'invention du smartphone dont la fabrication et le recyclage constituent une charge importante pour l'environnement !

scientifique – comme dans le cas des stockages géologiques de déchets –, l'inversion de la charge de la preuve bute sur une difficulté similaire à celle qui s'oppose à ce qu'on attende une preuve du dommage avant de prendre les nécessaires mesures de précaution. Pas plus que la preuve du dommage, la science ne peut apporter la preuve d'absence de dommage, en contexte d'incertitudes.

Vouloir établir de façon irréfutable l'innocuité procède d'une mécompréhension de l'exercice de la science ou alors d'une foi aveugle en celle-ci. L'une ou l'autre postule que les incertitudes sont toutes réductibles ou passagères alors que celles-ci peuvent être de nature ontique¹³⁵, au sens que lui donne Anne Knol (Knol *et al.*, 2010), et résister à jamais à l'investigation scientifique. Dans les questions de fondements et de méthode de son *Principe responsabilité*, Jonas lui-même souligne que l'extrapolation exigée (au niveau éthique) réclame une scientificité d'un ordre de grandeur supérieur à celle disponible, faisant du savoir réclamé un savoir qui n'existe pas encore pour le moment et n'existera jamais en tant que savoir anticipé (Jonas, [1979] 1995). En d'autres termes, « *la construction du savoir scientifique est inséparable de différents types d'incertitudes* » (Godard, 2002).

Ici se dessine tout l'enjeu de la sûreté et de sa prétendue démonstration. Peut-on, par l'absence d'indications de nuisance – c'est-à-dire dans le cas qui nous occupe, une dose liée à des relâchements éventuels inférieure à celle des limites et contraintes acceptées –, prouver l'innocuité d'un stockage géologique de déchets radioactifs ? Le travail à l'élaboration du *safety case* semble se construire autour de cette ambition. Pourtant, passer une batterie

¹³⁵ Knol *et al.* distinguent les incertitudes épistémiques réductibles par la connaissance et les incertitudes ontiques intrinsèques à la nature même du système étudié : « *The nature of uncertainty characterizes whether the uncertainty is primarily caused by incomplete knowledge (epistemic uncertainty) or by intrinsic properties of the system itself (ontic uncertainty)* » (Knol *et al.*, 2010). Notons qu'il convient d'ajouter à cette classification les incertitudes aléatoires qui peuvent être à mi-chemin entre les deux précédentes catégories, selon la nature des probabilités mobilisées, objectives ou subjectives. La distinction « incertitudes aléatoires et épistémiques » est la plus répandue dans le milieu de la gestion à long terme des déchets radioactifs mais tend à occulter l'existence d'incertitudes proprement ontiques. La classification de Knol est certainement plus satisfaisante sur ce point mais, issue d'une autre discipline, elle ne rend pas justice aux incertitudes aléatoires qui ne seraient pas subjectives.

de tests (ou de calculs de modélisation) en vue de démontrer l'innocuité ne devrait pas lever l'objection poppérienne de réfutabilité : l'absence d'indications de nocivité d'une technique à la suite d'une série de tests ne suffit pas à prouver l'innocuité de ladite technique (Godard *et al.*, 2002). Il est en effet plus facile de réfuter une proposition que d'en prouver une : « *absence of evidence is not evidence of absence* »¹³⁶. Il faudra dès lors s'entendre précisément sur quoi il s'agira d'apporter la preuve et de quelle façon. Comme à l'évidence les connaissances disponibles ne suffiront jamais et qu'il convient pourtant d'embrasser toutes les incertitudes (*known unknowns*) voire l'ignorance (Stirling, 2000) complète (*unknown unknowns*)¹³⁷, il faut imaginer des tests (c'est-à-dire ici des modélisations numériques) qui soient fondés sur des hypothèses ou présomptions et qui soient à même de repousser l'horizon des connaissances avérées. De toute manière, ces modélisations seront elles-mêmes contingentes desdites hypothèses. Qu'est-ce qui pourrait néanmoins rendre celles-ci satisfaisantes ? Ne pouvant reposer sur les seules connaissances établies, même si ces modélisations sont jugées suffisantes ou satisfaisantes, elles ne pourront pas apporter de « preuve », en toute rigueur.

A cela s'ajoute une ambition, sans doute plus déraisonnable encore, de vérification de la complétude de ces hypothèses traduites sous la forme de FEPs (*Features, Events and Processes*) compilées en listes internationales¹³⁸ et nourries des cas particuliers de tous les pays. Ces listes visent à recenser l'ensemble des caractéristiques, événements et processus pouvant engendrer un dysfonctionnement, un incident, un accident ou plus généralement une atteinte à la sûreté à plus ou moins long terme. Nous pensons qu'elles ne sont qu'une tentative d'imagination de ces dits tests pour asseoir une confiance dans la sûreté. S'il est louable et même

¹³⁶ Dans le cas d'une proposition existentielle négative de type : *il n'y a aucun risque* ou dans le cas de proposition générale positive de type : *toutes les situations sont sûres* (Dratwa, 2007 dans Kermisch et Hottois, 2007).

¹³⁷ Expression aujourd'hui commune dans le secteur du management de projet mais qui puise son origine dans un discours de Donald Rumsfeld, secrétaire à la défense aux Etats-Unis de 2001 à 2006 qui, lors d'une interview le questionnant sur le manque de preuves reliant le gouvernement iraquien à la fourniture d'armes de destruction massive à des groupes terroristes, a fait état des différences entre les « *known knowns* », les « *known unknowns* » et les « *unknown unknowns* ».

¹³⁸ Essentiellement compilées et enregistrées par l'AEN/NEA (NEA, 2000).

indispensable que la communauté scientifique internationale tente de penser jusqu'à l'impensable, répondant ainsi à l'exigence de rigueur qui la caractérise – à moins que ce ne soit à l'appel d'une croyance prédominante en la certitude (Dratwa, 2007)¹³⁹ ou encore à un refus de s'abandonner à l'ignorance ? –, il n'en demeure pas moins que la preuve scientifique constitue, comme le souligne Godard à l'égard de l'exercice du principe de précaution, un piège rhétorique à finalité politique (Godard *et al.*, 2002). En effet, dans le travers politique que Godard dénonce, il s'agit de la tendance à récuser les tests déjà faits pour en exiger de plus convaincants qu'il est toujours possible de récuser. Face à une telle régression à l'infini, l'essor de la nouvelle technologie finit par être condamné, de guerre lasse. D'aucuns y reconnaîtront le travail de certains militants contre les stockages de déchets radioactifs. Cette opposition est ici d'autant plus interpellante qu'elle ne vise pas l'essor d'une nouvelle technique au nom d'un progrès aux fins économiques incertaines mais bien le développement d'un concept technologique dans une démarche de résolution de problèmes, un problème dénoncé depuis longtemps et qui appartient, selon Ulrich Beck, à la « *Société du risque* »¹⁴⁰ (Beck, [1986] 2001). Un dernier élément à cette brève digression qui peut toutefois nourrir la réflexion sur la question de la « preuve » réside dans le fait qu'autoriser de tels stockages reviendrait à fournir la preuve matérielle, à défaut d'être formelle, que l'industrie nucléaire serait en mesure résoudre son problème majeur. Ce faisant, elle trouverait peut-être, dans le chef citoyen ou politique, un encouragement à une prolongation de son existence. La circularité de ce raisonnement ne manque pas de plonger les défenseurs du stockage géologique dans l'abîme... du dépit ! Toutefois, cette circonvolution de la pensée tendrait à reconnaître que la démonstration ultime de l'innocuité sera celle fournie par

¹³⁹ Nous ne pensons pas que la rigueur mobilisée dans toute investigation scientifique puisse justifier, à elle seule, une quelconque ambition de complétude. Nous aurions tendance à penser, avec Jim Dratwa, que l'interprétation des indéterminations comme incertitudes épistémiques (réductibles par accroissement de connaissance) entretient le mythe d'une colonisation par la science du savoir mais aussi de l'ignorance elle-même. Comme nous l'évoquons supra : « Vouloir établir de façon irréfutable l'innocuité procède d'une mécompréhension de l'exercice de la science ou alors d'une foi aveugle en celle-ci ».

¹⁴⁰ La catastrophe de Tchernobyl est l'événement « historique » contemporain de la parution de la *Société du risque* et porte en elle, tout l'enjeu de l'ère nucléaire.

le *faire* et donc nécessairement a posteriori car il ne pourrait en exister d'autres qui soient plus convaincantes...

La troisième composante est celle de la focalisation sur le scénario du pire. Cette composante découle logiquement de la première, le « dommage zéro », dont nous avons montré l'indigence précédemment. Avant d'aller plus loin, remarquons cependant qu'envisager le pire scénario est une pratique courante de l'ingénierie. Les pires événements sont ceux qui permettront le plus souvent de dimensionner adéquatement un ouvrage d'art, tel un pont ou un barrage. Mais il y aura, si l'on peut dire, des « limites au pire ». Attardons-nous un instant sur cette pratique.

Nous reproduisons ci-dessous, à titre d'exemple, un extrait de la guidance « *earthquakes* » de l'AFCN à l'intention des installations de stockage de surface, qui définit les événements dimensionnants de la façon suivante (AFCN, 2009a) :

« 'Design Basis Accident'

A supposed event which a facility manages to withstand thanks to its design. The occurrence of such an event will thus not give rise to an accident which entails the loss of one or more barriers, safety functions or loss of the integrity of one or more SCCs¹⁴¹ that are important for safety.

'Design Basis Earthquake'

The Design Basis Earthquake is the earthquake that will be considered as a Design Basis Accident.

'Beyond Design Basis Accident'

This accident is more serious than a Design Basis Accident. It is however too improbable to be considered in the design.

'Beyond Design Basis Earthquake'

Earthquake considered as a Beyond Design Basis Accident ».

¹⁴¹ Structures, Systems and Components.

La limite au dimensionnement d'ouvrage est donc donnée par l'accident de base à la conception (*Design Basis Accident (DBA)*), au-delà duquel l'ouvrage n'est plus censé résister (*Beyond Design Basis Accident (BDBA)*). Ce n'est toutefois pas aussi simple. Ainsi, la même guidance précise que dans le cas d'une faillite d'une seule barrière de protection :

« The data below need to be included and where necessary justified in the Safety Case: (...) Data related to the DBE [Design Basis Earthquake] calculations: (...) In the frame of the demonstration of the risk of a single failure, the potential demonstration of at least one barrier withstanding an earthquake that is significantly larger than the Design Basis Earthquake. » (AFCN, 2009a)

L'au-delà de l'accident de conception doit donc être prévu dans une certaine mesure. Il n'existe évidemment pas de limite préalablement définie à ce dépassement mais les normes de génie civil sont d'application. Ainsi, les normes EUROCODE reposent sur la détermination de l'accélération maximale du sol (*Peak Ground Acceleration – PGA*) (EUROCODE, 2002). C'est sur cette même variable que l'on définit l'aléa sismique d'une région donnée :

« le niveau d'un fort séisme qui risque de se produire dans cette région, généralement caractérisé par la valeur de l'accélération de pointe (...) PGA et reportée sur les cartes de zonation de l'aléa sismique. » (Plumier et Degée, 2011)

Ce qui ne manque pas de poser la question de l'établissement de la valeur de cette accélération. On a observé que, dans une région donnée, il existe une relation entre la magnitude de ces séismes et leur fréquence d'apparition : les petits séismes sont nombreux, les gros sont rares. Des lois statistiques ont ainsi été élaborées. Une fois que la loi (magnitude – fréquence d'apparition) est connue pour une région donnée, il est possible de définir l'aléa sismique à utiliser dans les projets de construction. Mais il faut au préalable définir la probabilité d'occurrence du séisme contre lequel on décide de se prémunir. Ce choix résulte évidemment d'un équilibre entre la sûreté voulue et le coût de la construction. Plus on veut se prémunir contre la possibilité de séismes rares (et donc intenses), plus les dispositions parasismiques seront onéreuses. Le choix de la valeur de la probabilité de dépassement ou de la

*période de retour*¹⁴² est nécessairement entaché d'une certaine part d'arbitraire ou à tout le moins est conditionné par notre degré d'aversion au risque tempéré par les moyens financiers mis à disposition dans la réalisation du projet. Il n'est évidemment pas possible de choisir une *période de retour* infinie pour le dimensionnement pas plus qu'il n'était sans doute possible, pour les concepteurs de la centrale nucléaire de Fukushima, de raisonnablement prévoir une installation résistant à un séisme apocalyptique engendrant un tsunami qui l'était tout autant. Ceci nous ramène aux « limites du pire » que nous évoquions précédemment.

La question réside donc tant dans la détermination de la valeur de retour choisie que dans l'importance accordée au scénario du pire dans le processus de décision. Faire ou ne pas faire ? Et si faire, jusqu'où pousser la prévoyance ? Le respect des normes, comme l'EUROCODE, revient à s'aligner sur des valeurs consensuelles, jugées « raisonnables » mais elles ne suffisent évidemment pas à éradiquer le risque. Dans le cas où l'événement à craindre n'est lui-même pas connu et n'appartient qu'à un faisceau de possibles, le scénario du pire dépend de l'imagination du concepteur. L'écriture des scénarios n'est pas univoque, ne reflète pas la réalité des dangers et ne relève pas de la science (voir sections 4.2 et 4.5). Le choix des scénarios et leur niveau d'exploration est, lui aussi, affaire de convention. La sûreté des stockages géologiques est évaluée en partie sur la base de tels scénarios. Sans l'utilisation des probabilités ou, à défaut, d'estimations de plausibilité pour les scénarios envisagés, le pire est au rendez-vous de chaque option choisie. Ce piège est celui que Godard et ses collègues nomment le « *nivellement par le pire* » (Godard *et al.*, 2002) et rejoint la règle d'abstention jonassienne simplifiée qui ne serait, selon ces auteurs, d'aucune utilité pratique.

Face à de telles limites épistémologiques, il serait tentant de conclure que la démonstration de sûreté n'est pas une démonstration d'innocuité car les composantes de cette exigence ne peuvent être rencontrées. On se rabattra alors sur une pratique « raisonnable » qui envisage les scénarios plausibles et représentatifs d'une possible évolution du système avec les chaînes de

¹⁴² La période de retour, ou temps de retour, d'un séisme est la durée moyenne au cours de laquelle, statistiquement un séisme de même intensité se produit.

conséquences qui leur sont associées. Faut-il pour autant renoncer à prendre à notre compte l'innocuité comme visée de la démonstration de sûreté ou le scénario du pire comme « contrainte dimensionnante » ? Lorsque l'AFCN exhorte à une optimisation sans limite (prédéfinie) de la sûreté d'un système de stockage ainsi qu'à l'élaboration de scénarios pénalisants au-delà de l'horizon prédictif, il semble que l'ONDRAF ne puisse écarter aussi facilement la discussion des questions du dommage zéro et de sa preuve – l'optimisation poussée enjoignant la recherche d'une fiabilité maximale – ni celle du scénario du pire qui prouverait l'innocuité en toute circonstances et dont on retrouve les traits les plus caractéristiques dans la définition du scénario pénalisant.

Il nous semble que les critiques de la preuve d'innocuité avancées par l'équipe de Godard n'épuisent pas totalement la complexité de l'exigence d'innocuité en tant que possible démonstration de la sûreté, pas plus que la portée constructive du scénario catastrophique. La sûreté de fonctionnement des systèmes d'ingénierie utilise, elle aussi, ces mêmes concepts mais elle définit l'innocuité comme la « *non-occurrence de conséquences catastrophiques pour l'environnement* » (Guillerm, 2011, p. 25) ou encore l'évitement de défaillances catastrophiques (Avizienis *et al.*, 2001, p. 3)¹⁴³, liant l'innocuité à l'absence de catastrophe, rejoignant la définition de la sécurité donnée par Villemeur (voir section 6.2.3). Ce sont bien les mêmes ingrédients auxquels il est fait appel mais avec une nuance importante : si la sûreté de fonctionnement définit l'innocuité comme l'absence de catastrophes, l'innocuité discutée par l'équipe de Godard est une absence de dommage y compris dans le cas du pire scénario (ou scénario catastrophique).

Nous proposons une critique du point de vue de Godard et ses collègues dans la section 6.5 mais il nous faut revenir auparavant sur un point évoqué précédemment, le lien entre sûreté et principe de précaution, ce qui fait l'objet de la prochaine section.

¹⁴³ Pour Avizienis, Laprie et Randell, l'innocuité est la « *safety* » au service d'une sûreté de fonctionnement « *dependability* » (Avizienis *et al.*, 2001).

6.4 Sûreté, générations futures et principe de précaution

Principe (de sûreté) 7 : Protection des générations actuelle et futures
« Les générations et l'environnement actuels et futurs doivent être protégés contre les risques radiologiques. » (IAEA, Safety Fundamentals, 2007)

Le principe de sûreté énoncé par l'AIEA visant à protéger les générations actuelle et futures apporte une substance à la réflexion esquissée précédemment. Il précise l'idéal de protection auquel est assignée la sûreté nucléaire, en le temporalisant. Le risque indu contre lequel la sûreté nucléaire doit prémunir le travailleur, le public et l'environnement ne vaut pas seulement pour la société actuelle mais concerne également les générations futures encore inconnues. Un détour par *Le Principe responsabilité* de Jonas permet de contextualiser ce principe. Jonas établit une éthique du futur de laquelle une règle d'abstention peut être dégagée. Cette règle est fondée sur le constat selon lequel les hommes ont acquis la capacité de mettre en jeu la survie de l'humanité, soit par la destruction de ses conditions naturelles de vie, soit par une altération de ce qui, moralement, constitue l'humain. Jonas reformule ainsi l'impératif catégorique kantien de la façon suivante (Godard *et al.*, 2002) :

« Agis de façon que les effets de ton action soient compatibles avec la permanence d'une vie authentiquement humaine sur terre. »

ou, pour l'exprimer négativement :

« Agis de façon que les effets de ton action ne soient pas destructeurs pour la possibilité future d'une telle vie. »

ou même encore :

« Inclus dans ton choix actuel l'intégrité future de l'homme comme objet secondaire de ton vouloir. » (Jonas, [1979] 1995, p. 40)

C'est ainsi que Jonas développe une *heuristique de la peur* centrée autour de l'évitement du mal apocalyptique afin de guider notre action. La responsabilité nouvelle ainsi dégagée invite également à une profonde humilité, celle consistant à reconnaître toute la part d'ignorance de l'humain

quant aux possibles conséquences de ses actions et, par là, tempérer sa quête de progrès et de puissance technologiques. Selon ce nouvel impératif, poursuit Jonas :

« Nous avons bien le droit de risquer notre propre vie mais non celle de l'humanité [...] mais nous n'avons pas le droit de choisir le non-être des générations futures à cause de l'être de la génération actuelle et que nous n'avons même pas le droit de le risquer. » (Jonas, [1979] 1995, p. 40).

Il en découle que le risque, dès lors qu'il serait de nature à compromettre l'existence de générations futures – il s'agit donc d'un risque aux conséquences apocalyptiques – est inacceptable en toutes circonstances. La seule possibilité d'un tel risque entraîne l'obligation de s'abstenir. Notons, comme le fait remarquer également Godard et son équipe, qu'il ne s'agit pas d'une probabilité ou d'une plausibilité mais d'une simple possibilité de risque, tel qu'imaginé ou imaginable par l'homme. Un tel impératif confinerait automatiquement l'humanité à l'ataraxie s'il ne portait pas uniquement sur les risques aux conséquences catastrophiques. Fort heureusement, les autres risques, ceux qui n'engagent pas le devenir de l'humanité ne sont pas soumis à l'application d'une telle maxime. Faut-il pour autant s'en réjouir ?

Selon Godard, l'impératif jonassien n'a que peu de valeur pratique dans la prise de décision relative aux actions collectives et mobilisant les capacités technologiques modernes. En effet, les cas de figure extrêmes sont immédiatement exclus : soit aucune action humaine n'est capable d'engendrer l'apocalypse, ce qui dément le constat de base de Jonas soit toutes les actions humaines (collectives et mobilisant les progrès technologiques) peuvent conduire à l'apocalypse et l'humanité se retrouve stoppée net dans son avancement. Les situations intermédiaires, celles qui reviendraient à supposer que seulement quelques rarissimes actions peuvent compromettre le devenir de l'humanité ou qu'un nombre significatif d'actions pourraient conduire au même résultat, supposent une faculté de discernement capable de juger avec certitude les conséquences des actions futures. A défaut, l'apocalypse doit être envisagée et l'humanité doit à nouveau s'abstenir. Mais comment prévoir toutes les conséquences ultimes des actions envisagées ? Dans la ligne de Popper – si un résultat contraire à

un test suffit à falsifier une théorie, l'absence de résultats contraires ne suffit pas à établir la vérité de ladite théorie – l'absence de potentiel apocalyptique d'une action telle qu'évaluée à un instant donné ne suffit pas à établir une fois pour toutes l'absence totale de conséquences apocalyptiques liées à cette action. Avec un tel raisonnement, la catastrophe doit toujours être supposée et la règle d'abstention conduirait finalement à l'immobilisme (Godard *et al.*, 2002). Une utilisation à peine déguisée de cette règle d'abstention de Jonas nous intéresse au premier chef. Elle consiste à appliquer, dans tous les domaines impliquant la santé publique et l'environnement, un principe selon lequel une action n'est autorisée que si son innocuité a pu être démontrée. C'est ainsi qu'une journaliste du journal *Le Monde* formulait le *principe de précaution* à l'occasion de la suspension, par le Conseil d'Etat français, de l'autorisation de mise en culture du maïs génétiquement modifié de la société Novartis :

« *Principe qui veut qu'un décideur ne se lance dans une politique que s'il est certain qu'elle ne comporte absolument aucun risque environnemental ou sanitaire.* » (Rivais, 1998 cité dans Godard, 2000, p. 25)

L'organisation non gouvernementale *Greenpeace*, dans sa définition de politique de lutte contre la pollution en mer du Nord, écrivait également :

« *Aucun rejet ne doit être déversé en mer tant que son innocuité n'a pas été prouvée.* » (Godard, 2000, p. 25)

Des telles formulations sont légion. Comme le dénoncent d'ailleurs Callon, Lascoumes et Barthe :

« *Mais ils [Francis Chateauraynaud et Didier Torny¹⁴⁴] ne veulent voir dans la précaution qu'un synonyme de la sûreté absolue, une action qui porterait plus à « verrouiller » qu'à explorer, qui conduirait à*

¹⁴⁴ Francis Chateauraynaud, Didier Torny, *Les Sombres précurseurs, une sociologie pragmatique de l'alerte et du risque*, Paris, Éditions de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales, Paris, 1999, 480 p. cité dans (Callon *et al.*, 2001).

*rechercher coûte que coûte une sécurité totale*¹⁴⁵. » (Callon et al., 2001, p. 335)

Ou encore Comte-Sponville, critiquant ce que devient trop souvent le principe de précaution dans la bouche des politiques et des médias :

« Ne faisons rien qui puisse présenter un risque que nous ne sommes pas capables d'évaluer précisément ni certains de pouvoir surmonter. » (Comte-Sponville, [2001] 2013, p. 790)

Il s'agit donc d'une lecture certes contestable mais pas nécessairement marginale du principe de précaution (Godard, 2000) et celle-ci vise à en faire une règle d'abstention, d'autant moins justifiable en l'espèce qu'elle ne considère pas la possibilité d'un horizon apocalyptique comme le fait Jonas mais vise l'atteinte d'un dommage zéro, c'est-à-dire la démonstration d'innocuité. Soyons clairs : *l'heuristique de la peur* de Jonas reste valide, elle tempère un optimisme facile attaché à une soif de progrès et comporte une inestimable visée éthique. Toutefois, la variante extrême de la règle d'abstention jonassienne paraît, elle, peu opérante et relève de la caricature.

Nous n'approfondirons pas ce point qui nous éloigne de notre recherche de définition de la sûreté, de nombreux auteurs ayant, en outre, déjà défendu le principe de précaution (Kaiser, 1997 ; Godard, 2000 ; Godard et al., 2002 ; Stirling, 2000 ; De Sadeleer, 2000 ; Zaccai, 2007). Toutefois, nous pensons que c'est vraisemblablement la difficulté pratique d'utilisation de l'impératif jonassien qui a conduit, fort heureusement, à la formalisation d'un principe de précaution dans une perspective de développement durable, distante d'une approche apocalyptique radicale. Il s'agit d'une perspective visant à agir de façon à transmettre aux générations futures un monde suffisamment viable pour évoluer et répondre à leurs besoins. Ce point retient particulièrement notre attention car l'ONDRAF, dans sa déclaration de mission (*mission statement*), énonce explicitement le principe de précaution et déclare veiller à développer des solutions durables pour les déchets radioactifs (ONDRAF, 2020c). Ce qui est intéressant de relever, c'est le terreau du débat entourant la naissance du principe de précaution car nous

¹⁴⁵ Nous ne commenterons pas ici la synonymie forcée entre sûreté et sécurité car elle est fréquente dans le langage non technique.

pensons qu'il contient également en germe la notion de sûreté telle que nous la concevons aujourd'hui.

Quant au risque, qu'il soit indu ou apocalyptique, qu'il touche le travailleur, le public ou l'environnement, qu'il soit immédiat ou à venir, il constitue ce trait d'union entre précaution et sûreté. Tout comme pour le principe de précaution, le risque a été étudié par de nombreux penseurs depuis Leibniz (Boucher, 2004) jusqu'aux auteurs les plus modernes (Beck [1986], 2001 ; Stirling, 2000 ; Dagorne et Dars, 2005 ; Giddens, 2002 ; Le Breton, 2004 ; Peretti-Watel, 2001 ; Van Nuffelen, 2004 ; Verdel, 2000 ; Kermisch et Hottois, 2007 ; Lannoy, 2008 ; Laes *et al.*, 2009 ; Kermisch, 2010) – pour n'en citer que quelques-uns – et nous y avons également consacré une analyse (Depaus, 2006) que nous ne souhaitons pas répéter ici. L'exigence d'innocuité, de dommage zéro, d'éradication du risque, fût-elle dépassée aujourd'hui dans une conception plus mature du principe de précaution, est sans doute de même nature que celle à l'origine de la formalisation de la sûreté. Démontrer l'absence de risque d'une politique ou l'innocuité d'un produit visés par le progrès technologique soumis à l'examen revient, en première hypothèse, à démontrer la sûreté de la pratique ou de l'innovation technologique. Si l'AIEA ne fait pas mention du principe de précaution dans ses principes de sûreté, la perspective temporelle qu'elle confère à son 7^e principe – « *les générations et l'environnement actuels et futurs doivent être protégés contre les risques radiologiques* » –, au-delà de l'horizon connu de la génération actuelle, rapproche nécessairement la réflexion sur la sûreté de celle sur le principe de précaution en contexte d'incertitude scientifique. Avant d'aller plus loin, rappelons toutefois que le principe de précaution a une vocation pratique et constitue un principe d'action. A ce titre, ce principe pourrait être de nature similaire à un principe de sûreté. Précaution, sûreté et risque ont également une forte dimension éthique que nous commenterons dans le prochain chapitre.

Avant de poursuivre, précisons que, pas plus que la valeur de prudence ne puisse être réduite au principe de précaution, la sûreté ne peut se réduire aux principes énoncés par l'AIEA, ni la sûreté de fonctionnement à quelques-uns de ses attributs. Nous sommes conscients que comparer le principe de précaution à la sûreté procède d'une double distorsion, à la fois conceptuelle – sûreté et précaution ne s'équivalent pas – et d'échelle, un principe pratique

issu d'un concept ne résume pas ce dernier. Mais le principe de précaution que nous avons mobilisé ici avait pour objectif de creuser le terreau conceptuel commun avec la sûreté. Il constitue, à cet égard, un indice dans la quête de définition du concept *élusif* de la sûreté (Minon et Depaus, 2013) qui se dérobe à toute tentative de définition positive, un sentiment flou et réconfortant comme la citation de Jensen en début de ce chapitre (Jensen, 2010), auquel il faut pourtant arc-bouter science et technique. La notion de sûreté ne s'appréhende qu'associée à « culture (de) », « principe (de) », « indicateurs (de) » ou en fausse synonymie avec « protection » et qui, à l'instar de la notion de *risque* indissociable de la *perception* qu'on en a (Kermisch, 2010), ne se départit pas de la *confiance* qu'on lui voue. Si la sûreté est un être polymorphe aux avatars multiples, connaître plusieurs de ses visages, c'est progresser dans sa compréhension. Le détour par le principe de précaution aura au moins permis de confirmer le rôle prépondérant de l'exigence d'innocuité. Nous discutons, dans la prochaine section, les conditions de cette exigence.

6.5 Critique de l'exigence d'innocuité

Selon Olivier Godard et son équipe, l'exigence d'innocuité découle d'une interprétation simpliste du principe de précaution et est soumise à trois conditions. Nous pensons que le principe de précaution partage un terreau commun avec la sûreté et par extension, la sûreté nucléaire. Nous avons également montré que la sûreté de fonctionnement des systèmes industriels posait elle aussi la question de l'innocuité en tant qu'attribut. Le rapprochement entre sûreté et principe de précaution est également possible, entre autres, par les grandes échelles de temps qui intéressent la sûreté qui nous occupe – celle des stockages en profondeur des déchets radioactifs – ainsi que par les incertitudes qui leur sont associées. Dans le domaine de la *prévention* simple, c'est-à-dire la manière de se prémunir contre l'avènement de risques avérés dont la probabilité est connue, et la probabilité plus ou moins bien établie, la sûreté¹⁴⁶ est affaire de science et de technique et « *l'analyse causale est le fil directeur de l'action* » (Larrère,

¹⁴⁶ Remarquons que Catherine Larrère emploie le terme « sécurité » et non sûreté (voir section 6.2.2).

2017). Même si nous ne prétendons pas que, dans ce dernier cas d'espèce, la définition de la notion de « sûreté » n'est pas, elle aussi, problématique, nous rappelons que dans le contexte précis qui nous occupe, elle l'est d'autant plus que ladite sûreté embrasse les « risques potentiels » en univers controversé. Ce sont bien ces caractéristiques, à savoir un horizon temporel lointain, les « risques potentiels » ainsi que l'univers incertain qui rapprochent la sûreté, dont nous essayons de saisir la signification profonde, de la *précaution* dont le principe ne constitue qu'une éventuelle porte d'entrée.

Revenons à présent aux trois conditions de l'exigence d'innocuité (Godard *et al.*, 2002) ou formulées autrement, aux trois dimensions de l'attitude par rapport à la menace incertaine (Dupuy, 2002), ou encore, aux trois composantes de la règle d'abstention d'après une « interprétation forte » du principe de précaution (Larrère, 2017). Ces trois conditions, le « dommage zéro », « l'inversion de la charge de la preuve » et le « scénario du pire » ont été récusées méthodiquement précédemment. Ceci nous a permis, du moins temporairement, de nous détacher de l'idée d'une démonstration d'innocuité en tant que possible démonstration de sûreté. Pourtant, comme nous l'évoquions, la condition du scénario du pire n'est pas sans rappeler l'exigence des scénarios pénalisants imposés par l'AFCN dans les évaluations de sûreté des stockages en profondeur. Par ailleurs, la démonstration d'innocuité semble guider, au moins à distance, une certaine interprétation du principe d'optimisation de la sûreté. En effet, l'absence de limite (prédéfinie) à l'optimisation laisse entrevoir une propension à l'atteinte d'un dommage zéro. Nous avons formulé l'hypothèse que les arguments de Godard et ses collègues n'épuisaient pas toute la complexité de l'exigence d'innocuité, pas plus que de l'importance d'envisager la catastrophe pour en déduire une éthique telle que celle visée par Jonas dans son *Principe Responsabilité*. Nous étayons ci-après notre critique.

Commençons par questionner la focalisation sur le scénario du pire. Le scénario du pire ne constitue pas nécessairement quelque chose pouvant ou devant se produire dans l'avenir comme le soutient Godard et son équipe mais quelque chose qui pourrait ou devrait se produire *si* l'on entreprenait telle action (Dupuy, 2002, p. 83). Ouvrons une parenthèse afin de signaler immédiatement que, selon nous, cette condition à l'actualisation possible

d'un scénario n'est pas du même ordre que celle couverte par la probabilité ou plausibilité dudit scénario. La probabilité d'occurrence d'un scénario recouvre le hasard qui conduit à sa possible réalisation et donc l'ensemble de tous les facteurs qui y conduisent, y compris éventuellement l'action humaine qui préside au choix des options en amont dudit scénario. Le « si » introduit par Jean-Pierre Dupuy est celui qui vise plus particulièrement l'hypothèse conditionnelle dans la délibération qui conduit au choix, parmi les options disponibles, de celles(s) qui rendraient ce *pire* plus acceptable. Si l'on peut penser que l'hypothèse conditionnelle est éventuellement comprise dans la probabilité globale d'occurrence du scénario avancée par Olivier Godard, elle n'est pas isolée de cette dernière en tant qu'option rendant le *pire* le moins dommageable possible. Refermons la parenthèse. Dans la perspective de Godard, le scénario du pire relève de la *prévision* alors qu'avec l'hypothèse conditionnelle de Dupuy, on s'ouvre à une démarche de *minimax* revenant à minimiser le dommage maximum ; ce qui, en théorie de la décision imite, mais en mode inverse, le concept de *maximin* de la *Théorie de la Justice* de John Rawls, en éthique. Il s'agit donc pour Dupuy de « minimiser le pire » et non d'atteindre le risque ou le dommage zéro (Dupuy, 2002.). Dans son approche, Dupuy soutient que :

« C'est parce que la catastrophe constitue un destin détestable dont nous devons dire que nous n'en voulons pas qu'il faut garder les yeux fixés sur elle, sans jamais la perdre de vue. » (Dupuy, 2002, p. 51)

La possibilité du pire entraîne donc la vigilance dans l'action. En accord avec Jonas, Dupuy préconise de raisonner comme si le fait d'envisager la catastrophe comme possible équivalait à penser qu'elle se produira nécessairement (Dupuy, 2002, p. 86). Il ne s'agit pas ici de sombrer dans une sorte d'alarmisme paralysant mais au contraire d'ouvrir un espace de non-catastrophe. Avec *l'heuristique de la peur* de Jonas, il s'agit en fait de faire de la peur imaginée, simulée, un révélateur de ce qui a pour nous une valeur incomparable et que l'on tient à protéger. La peur est ici au service d'une rationalité et non son antithèse. Comme le précise Jonas lui-même, la première obligation de l'éthique d'avenir est de se procurer une idée des effets lointains. Ceci va au-delà d'une simple rêverie et c'est ici que l'on peut percevoir le germe d'action dans l'éthique de Jonas. Il s'agira bien de placer sur un pied d'égalité le *malum* imaginé et le *malum* éprouvé. Comme le précise Jonas :

« [...] ce qui doit être craint n'a précisément pas encore été éprouvé et que cela est peut-être sans analogie aucune dans l'expérience actuelle ou passée. Ici le malum imaginé doit donc assumer le rôle du malum éprouvé et cette représentation ne s'impose pas automatiquement mais il faut se la procurer délibérément : se procurer cette représentation par une pensée tournée vers l'avenir devient la première obligation [...] de l'éthique qui est ici recherchée. » (Jonas, [1979] 1995, pp. 67-68)

Et l'appropriation de cette pensée, déjà précurseur de l'action, est ce qui permettra à Jonas de lier peur, espérance et responsabilité. L'espérance est une condition de tout agir puisqu'il suppose qu'il est possible d'aboutir à quelque chose. Que le déploiement des effets de l'action dans le flux imprévisible des choses soit réellement « ce qui sera encore désirable » ne peut jamais être qu'une espérance. Celui qui sait, dit Jonas, doit toujours s'attendre à devoir souhaiter plus tard ne pas avoir agi ou avoir agi différemment. La peur dont parle Jonas n'est pas celle associée à cette incertitude mais elle se réfère au fait de se tenir responsable par avance même pour l'inconnu, elle est la condition de la responsabilité agissante.

« La peur qui fait essentiellement partie de la responsabilité n'est pas celle qui déconseille d'agir, mais celle qui invite à agir ; cette peur que nous visons est la peur pour l'objet de la responsabilité. » (Jonas, [1979] 1995, p. 421)

L'abstention à laquelle se réfère Godard en parlant de Jonas doit donc être tempérée. Par une *heuristique de la peur*, il est question d'une heuristique de l'action et non l'appel à un immobilisme mortifère¹⁴⁷.

¹⁴⁷ Dans une interview du 30 avril 2006, le philosophe Luc Ferry, sans pour autant en développer une théorie de l'action, pointait, lui aussi, un changement du statut de la peur : « Depuis trente ans, depuis la naissance de l'écologie, on assiste à une véritable prolifération des peurs. On a peur de tout : de la vitesse, du poulet, de l'alcool, du tabac, du sexe, de l'effet de serre, de la mondialisation, de l'Europe, des OGM, [...]. Chaque année, une nouvelle angoisse vient s'ajouter aux autres. La peur a toujours existé, bien sûr, mais, la grande nouveauté, c'est qu'il ne s'agit plus, comme quand j'étais petit, d'un sentiment honteux que l'on doit surmonter. Au contraire, elle peut être vécue de façon positive, affichable. Et cela, on le doit à l'écologie contemporaine, qui a voulu faire de la peur un facteur de sagesse » (dans Lannoy, 2008, pp. 74-75).

En ce qui concerne à présent le principe d'inversion de la charge de la preuve dans la démonstration de l'innocuité, nous avons vu que celui-ci devrait buter sur l'objection poppérienne de la falsifiabilité. En effet, si l'absence d'innocuité peut être prouvée par la découverte d'un seul cas de nocivité, la preuve de l'innocuité exigerait, elle, une infinité de tests visant à montrer qu'en toutes circonstances et dans tous les cas, l'objet d'étude ne peut être nocif. Pari impossible. Donc, si l'on suppose que la démonstration d'innocuité repose sur l'absence *complète* de risque, alors cette objection est valide et fatale. Mais Dupuy y voit une pétition de principe¹⁴⁸. En effet, la notion de risque est indissociable d'un cadre de pensée statistique dans lequel le fait de ne pas prouver une proposition P n'implique pas que l'on prouve non-P¹⁴⁹... Autrement dit, l'impossibilité de démontrer l'innocuité n'implique pas de reconnaître la nocivité et, comme nous l'écrivions ci-avant, la science ne peut pas davantage apporter la preuve du dommage que la preuve d'absence de dommage, en contexte d'incertitudes (Godard *et al.*, 2002, p 98).

Remarquons qu'une dimension semble être passée sous silence dans cette discussion, il s'agit de la sévérité du ou des tests en regard du danger dont on cherche à se prémunir. Le niveau de risque n'est ici évoqué que par rapport à son occurrence, pas sa magnitude. La sévérité des tests à ajuster à la mesure de l'amplitude du risque encouru n'est pas discutée par ces auteurs. C'est probablement parce que l'innocuité, avec la quête de son dommage zéro, s'accompagne d'un effet d'aplatissement : pas l'once d'un dommage ou de nocivité. Or, au même titre que Dupuy fait remarquer le

¹⁴⁸ Qui vise donc à introduire, autrement, en prémisse ce que l'on cherche précisément à démontrer.

¹⁴⁹ J-P Dupuy explique son point de vue par l'exemple d'une pièce de monnaie servant au jeu de pile ou face et dont on cherche à prouver qu'elle est équilibrée. Supposons qu'après 3 jets, elle soit retombée sur face. La probabilité *a priori* de ce résultat est de $\frac{1}{2} * \frac{1}{2} * \frac{1}{2} = \frac{1}{8}$ c'est-à-dire 12,50%. Par convention, on admet qu'une probabilité supérieure à 5% ne suffit pas à rejeter l'hypothèse que le résultat est dû au hasard. Ce seuil de 5%, même s'il est arbitraire, traduit bien la notion de *charge* de la preuve. Il faut en effet consentir à des efforts supplémentaires pour mener cette expérience de façon à écarter tout doute raisonnable sur le fait que cette pièce est ou non truquée. Le sophisme consisterait ici à conclure qu'il est prouvé que la pièce n'est pas déséquilibrée (Dupuy, 2002, p. 90). Cet exemple rejoint les cas où l'on croit pouvoir conclure à l'absence de nocivité alors qu'on a seulement échoué à prouver la nocivité. Aller au-delà du doute raisonnable c'est ramener à moins de 5% la probabilité (*a priori*) que les résultats d'expériences soutenant l'hypothèse d'innocuité ne soient dus au hasard.

caractère statistique du risque, nous pourrions souligner le spectre d'amplitude continu de celui-ci et introduire, dans la discussion de l'innocuité, l'ampleur du dommage dans l'appréciation de ce qui est réputé nocif ou non. Cette idée est d'ailleurs traduite par le concept d'approche graduée¹⁵⁰ (*graded approach*) selon laquelle les ressources à allouer au développement de la sûreté sont proportionnelles au niveau de risque radiologique (IAEA, 2006 ; IAEA, 2012, §6.23)¹⁵¹.

Les conditions attachées à l'exigence d'innocuité semblaient donc pouvoir être récusées méthodiquement, en s'inspirant largement des arguments de Godard et ses collègues (Godard *et al.*, 2002). Mais nous avons cherché à nuancer ces arguments. Parmi les conditions retenues pour l'exigence d'innocuité, la focalisation sur le scénario du pire peut être considérée autrement, comme nous l'invite à l'envisager l'auteur du *catastrophisme éclairé*. En introduisant une hypothèse conditionnelle dans l'acte de délibération qui conduit au choix de l'option rendant le « pire » plus acceptable, on cherche à « minimiser le pire » plutôt qu'à atteindre un chimérique risque zéro ou un dommage zéro, ce qui change la perspective. Quant à l'objection poppérienne sur l'inversion de la charge de la preuve pointée par Godard, elle n'est pas infallible car elle peut négliger la nature statistique des phénomènes mis en jeu, comme le défend Dupuy. Enfin, nous avons souligné un effet d'aplatissement liée à la considération littérale du concept d'innocuité en ignorant la notion d'approche graduée.

La preuve d'innocuité n'a donc pas totalement perdu de sa pertinence, même si elle n'est pas non plus totalement convaincante.

¹⁵⁰ On pourrait s'étonner de cette traduction, « gradué » étant employé dans son acception « progressif » c'est-à-dire en synonyme de « graduel » et non dans le sens de « porter une graduation ». Toutefois, le dictionnaire des difficultés du français souligne que « graduel » est un adjectif-substantif ayant une valeur active « qui va par degrés » alors que gradué est plus passif (i.e., divisé par degrés). Le dictionnaire mentionne l'usage de « graduel » surtout dans le vocabulaire religieux (Colin, 1989).

¹⁵¹ Ceci permet non seulement de classer les événements accidentels au sein du domaine nucléaire mais permet aussi, selon nous, de les distinguer des accidents industriels conventionnels ou assimilés (e.g. catastrophe de Tchernobyl versus un crash d'avion de ligne).

6.6 Les scénarios pénalisants comme élément d'analyse de la sûreté à long terme

Nous avons introduit les scénarios pénalisants à la section 4.6. Rappelons brièvement leur propos : les scénarios pénalisants seraient une réponse aux incertitudes affectant le très long terme et sont destinés à représenter l'évolution du système lorsque ses performances ne peuvent plus être évaluées de façon fiable (AFCN, 2011b ; AFCN, 2012b ; AFCN, 2013d ; AFCN, 2017b).

Les scénarios pénalisants comportent deux caractéristiques qui les distinguent *a priori* fondamentalement des autres scénarios. La première réside dans une temporalité repoussée au-delà des limites des évaluations habituelles de la sûreté à long terme, la seconde, dans des niveaux de performance du système les plus faibles pouvant être atteints (AFCN, 2012b) sans pour autant être nuls (AFCN, 2012a ; AFCN, 2017b).

En ce qui concerne la première caractéristique, à savoir la limite de temps étendue pour l'évaluation de sûreté, l'ONDRAF et l'AFCN avaient convenu qu'en pratique cela revenait à prolonger les évaluations de sûreté au-delà du million d'années (AFCN, 2013e). L'AFCN rappelle par ailleurs que, de toute façon, les intervalles de temps considérés dans l'analyse de sûreté doivent être argumentés en ce et y compris, le « million d'années » conventionnel :

« En particulier, la durée de la période de préservation des performances doit être définie et argumentée. Cet intervalle de temps est la période pour laquelle il est possible de montrer de façon fiable que les performances attendues d'isolation et de confinement du système de stockage pourront être atteintes tenant compte des incertitudes associées à ces performances. » (AFCN, 2012b, §6.6)

Or, s'il est facile d'envisager éventuellement une période d'évaluation plus courte¹⁵², une période d'évaluation de la sûreté au-delà du million d'années n'est habituellement pas retenue dans les pratiques internationales,

¹⁵² Les concepts de sûreté suédois et finlandais considèrent généralement une période d'évaluation de référence plutôt à 100 000 ans qu'à 1 000 000 années (Posiva, 2012 ; NEA, 2012f).

l'évolution tant du système que de ses performances étant jugée par trop spéculative (NEA, 2004b)¹⁵³. L'AFCN est bien consciente de ce consensus scientifique mais elle souligne que cette période du million d'années ne peut être validée indépendamment du site choisi et c'est la raison pour laquelle elle exige une justification spécifique (AFCN, 2013e, annexe 1).

En ce qui concerne les niveaux de performances minimales du système, l'ambiguïté réside dans le fait que s'il n'est plus raisonnable de prédire avec confiance les performances du stockage, il serait tentant de ne plus préjuger de ces performances et donc, de supposer la perte totale de celles-ci. Cette démarche s'apparenterait à évaluer ce qu'il se passe quand il y a une faillite totale des fonctions de sûreté et pourrait être associée à la simulation d'un « *what-if case* », c'est-à-dire un cas de calcul irréaliste dont l'objectif est d'évaluer la robustesse du système (voir section 4.5). Or ce n'est pas ce que souhaite l'AFCN qui tient à distinguer le scénario pénalisant du cas « *what-if* » :

« O/N : Les scénarios pénalisants appartiennent à une catégorie de scénarios de type « what-if » basés sur des hypothèses peu plausibles voire physiquement impossibles mais destinés à éprouver la robustesse du système. »

AFCN : L'objectif des scénarios pénalisants n'est pas de montrer la robustesse du système étant donné que l'on ne peut plus prédire l'évolution des performances. L'objectif est plutôt de montrer que la dégradation des performances ne résulterait pas en une situation inacceptable. » (AFCN, 2013e)

Les scénarios pénalisants se profilent donc comme des narratifs d'évolution plus optimistes que le cas reposant sur la faillite totale des performances du système – les performances doivent être minimales mais non nulles¹⁵⁴ (AFCN, 2012a ; AFCN, 2017b) – mais reposent sur un développement en dehors de la confiance, quand l'évaluation ne peut plus être « fiable » (AFCN,

¹⁵³ Soulignons cependant que le pic de dose est, dans tous les concepts de sûreté actuels, obtenu bien avant cet horizon prédictif et que le deuxième pic de dose attribué aux actinides peut se produire plus tard mais il est toujours largement inférieur au premier.

¹⁵⁴ Supposer la faillite totale du système reviendrait au calcul d'un terme source radiologique au-delà d'un certain horizon temporel.

2013d, §4.4). Toutefois, les hypothèses pouvant sous-tendre de telles performances minimales ne sont pas expliquées. En outre, si le scénario pénalisant représente peu ou prou un comportement du système de stockage – bien que cette représentation ne soit pas formellement établie dans les textes de l’AFCN (voir section 4.6)¹⁵⁵ –, comment établir celui-ci si les performances sur lesquelles il repose sont réputées non fiables, par définition ?

L’ambiguïté s’épaissit encore lorsque l’AFCN demande de considérer, pour le calcul du terme source radiologique à prendre en compte dans les scénarios pénalisants, un système (très) performant :

« les performances des barrières seront maximales. » (AFCN, 2014c)

c’est-à-dire,

« sans tenir compte des relâchements de radionucléides pouvant survenir lors de la période de préservation des performances. » (AFCN, 2012b ; AFCN, 2014c).

Ici, la contradiction n’est qu’apparente. Nous comprenons de cette exigence que ce que l’AFCN souhaite éviter, c’est d’envisager des pertes de confinement liées à une dégradation prématurée des barrières pendant la période conventionnelle d’évaluation, c’est-à-dire pendant la période où les performances peuvent être évaluées de façon fiable. En effet, cette diminution du confinement serait de nature à diminuer le terme source à la fin de la période conventionnelle d’évaluation de la sûreté, c’est-à-dire, en d’autres termes, à diminuer la quantité de radionucléides encore présents dans le système au moment de calculer son comportement à très long terme et donc à diminuer l’impact radiologique du scénario pénalisant qui démarre après cette période.

Mais, si cette exigence peut trouver une justification sur un plan calculatoire, elle renforce le tableau contradictoire du scénario pénalisant qui suppose un état de performance *maximale* des barrières pendant la période (fiable) d’évaluation des performances qui soit immédiatement succédé par une

¹⁵⁵ Nous faisons allusion ici aux contradictions relevées dans les textes de l’AFCN (voir section 4.6).

performance *minimale* de ces mêmes barrières afin que le confinement et l'isolation soient les plus faibles possibles. Postuler arbitrairement un enchaînement d'états de système diamétralement opposés dénote une certaine artificialité.

C'est cette artificialité de même que la difficulté à donner du sens à une période d'évaluation des performances exagérément longue qui semblent pousser l'ONDRAF, dans son commentaire sur la guidance « SAR » de l'AFCN (AFCN, 2012b), à parler, à l'endroit des scénarios pénalisants, d'une *difficulté herméneutique*. L'Organisme se demande comment se créditer de certaines propriétés résiduelles, au-delà de l'horizon prédictif des performances du système, en vue de constituer le « minimum » requis, sans, de surcroît, assimiler *de facto* lesdites propriétés à des performances, non fiables, par définition (ONDRAF, 2012). L'ONDRAF y voit une sorte d'antithèse et parle d'une « énantiose » en cherchant à exprimer-là une opposition essentielle¹⁵⁶.

Quoi qu'il en soit, dans ce procédé de *balancement des contraires* (Fromilhague et Sancier-Chateau, [1991] 2004, p. 187), l'AFCN développe un improbable calcul qui s'apparente à une combinaison des pires, fussent ceux-ci irréalistes ou en exclusion logique l'un par rapport à l'autre. L'hypothèse d'une « combinaison des pires » semble être encore confirmée par l'AFCN lorsqu'elle corrige l'ONDRAF sur l'éventualité d'envisager un *scénario pénalisant* comme un *scénario d'évolution altérée* dont la durée d'évaluation serait simplement prolongée :

« O/N : Les hypothèses choisies sont postulées de façon à conduire de façon certaine, à un impact plus grand que celui attendu (RS¹⁵⁷) ou ceux envisagés dans des situations dégradées, peu probables mais possibles (AES¹⁵⁸).

AFCN : Ceci constitue une condition nécessaire mais non suffisante. En effet, ce n'est pas parce que l'on se place dans une situation pénalisante par rapport aux scénarios de la phase de préservation de

¹⁵⁶ Sans doute aurait-il été plus correct de parler simplement d'antilogie, c'est-à-dire d'une contradiction entre deux idées au sein d'un même texte (ou chez un même auteur).

¹⁵⁷ *Reference Scenario* – Scénario de référence.

¹⁵⁸ *Altered-Evolution Scenario* – Scénario d'évolution altérée.

l'évolution des performances que l'on est pénalisant par rapport aux situations plausibles au-delà de cette période. » (AFCN, 2013e)

Il est utile ici de prendre un peu de recul. Dans une perspective d'ensemble, l'évaluation de sûreté va donc reposer sur la formulation de plusieurs scénarios, à commencer par le *scénario de référence* et le *scénario d'évolution attendue*. A ces scénarios, s'ajouteront des scénarios dits *d'évolution altérée* afin d'envisager la perte de fonctions de sûreté à la suite d'événements inattendus mais possibles et ce, tout au long de la période conventionnelle d'évaluation des performances du système, soit habituellement un million d'années (NEA, 2004b ; AFCN, 2013e). Au-delà de cette période, lorsque et alors que les performances du système ne peuvent plus être évaluées de façon fiable, des scénarios pénalisants seront imaginés. Un état du système sera postulé à l'entame de ces scénarios de manière à garantir un terme source radiologique qui soit le plus élevé possible pour la période démarrant au million d'années. L'existence d'un tel terme source suppose que le système aura parfaitement fonctionné, en honorant des performances maximales pendant toute la période conventionnelle d'évaluation. Après quoi, les performances seront supposées les plus dégradées possibles sans pour autant être annihilées puisque dans ce dernier cas, le système aurait totalement disparu et l'évaluation s'apparenterait alors à celle d'un terme source dans la biosphère. Que cette succession plutôt improbable d'états du système de stockage, passant du fonctionnement maximal au fonctionnement minimal s'opère sans transition, mais bien précisément au moment où l'on passe de la fin de la période réputée fiable d'évaluation des performances au début de celle dite non fiable – c'est-à-dire à un moment de basculement nécessairement ponctuel, puisque fixé arbitrairement, et qui le fait s'apparenter *de facto* à une catastrophe¹⁵⁹ – ait conduit l'ONDRAF à penser qu'il ne s'agissait que d'un « exercice de style » ne devrait pas surprendre :

« O/N : Les scénarios pénalisants sont en marge des évolutions plausibles du système de dépôt et peuvent être exclus soit par design

¹⁵⁹ C'est-à-dire un changement rapide et généralisé. Bien que restreinte à l'échelle du stockage, il s'agit d'envisager une dégradation généralisée de tout le système et donc une faillite de toutes ses barrières et fonctions de sûreté.

soit par l'état de la connaissance. S'agissant d'un "exercice de style", il n'existe pas de critère prédéfini à satisfaire. » (AFCN, 2013e)

Mais là encore, l'AFCN corrige cette interprétation erronée de l'ONDRAF :

« AFCN : Il ne s'agit pas d'un exercice de style (cf. objectif des scénarios pénalisants). L'AFCN demande que l'impact associé à ces scénarios soit comparé à une valeur de référence de 3 mSv/an (+ utilisation indicateurs complémentaires). » (AFCN, 2013e)

Rappelons qu'étant donné les incertitudes existant sur de telles échelles de temps et l'interprétation de la dose sujette à caution sur le très long terme (ICRP, 2007 ; ICRP, 2013 ; AFCN, 2012a ; AFCN, 2017b), l'AFCN évoque la comparaison à des valeurs de référence plutôt qu'à des contraintes de dose. Néanmoins, les valeurs de dose atteintes dans ces configurations particulières du système contribuent à évaluer *l'impact radiologique enveloppe* visé par les scénarios pénalisants.

Il nous semble indéniable que le *scénario pénalisant* se veut représenter le *scénario du pire* en recherchant une évolution non monotone du système qui lui soit la plus défavorable. Même si l'importance relative qu'accordera l'AFCN à l'interprétation du scénario pénalisant dans la démonstration de sûreté n'est pas établie, il y a bien une certaine *focalisation sur le scénario du pire* mais qui ne peut être interprétée, ici, comme un appel à l'abstention ou un « nivellement par le pire » (Godard *et al.*, 2002). En effet, l'abstention serait l'antithèse d'une réglementation liée aux stockages, à moins de supposer l'AFCN complètement malhonnête dans son rôle de régulateur, hypothèse que nous rejetons évidemment.

L'interprétation du scénario pénalisant s'inscrit donc nécessairement dans une interprétation plus positive qui pourrait bien être celle esquissée par Dupuy et selon laquelle le scénario pénalisant est *postulé* – au même titre que la réalisation future de la catastrophe est *inévitabile* selon l'auteur du *catastrophisme éclairé* – car seuls ce postulat ou cette « inévitabilité » peuvent conduire à la « prudence » (Dupuy, 2002, p. 82), valeur que défend particulièrement l'AFCN, nous y reviendrons ultérieurement (voir section 10.6).

L'AFCN, en imposant le développement de scénarios pénalisants qui constitue une pratique originale sur le plan international (Weetjens, 2013), semble s'inscrire dans une tradition catastrophiste à laquelle l'ONDRAF pourrait avoir du mal à souscrire. En tant que telle, cette tradition relève d'une métaphysique qui se donne comme fondement d'une prudence adaptée au temps des catastrophes et qui consiste, comme l'explique Dupuy, à se projeter dans l'après-catastrophe (Dupuy, 2002, p. 87). Dans cette optique, le scénario pénalisant est développé et explicité, à l'instar d'une catastrophe qui serait annoncée, non pas avec un statut de prévision – le scénario pénalisant n'est pas une véritable représentation de l'évolution du système¹⁶⁰, de même que l'annonce de la catastrophe ne prétend pas dire ce que sera l'avenir – mais afin de dire ce qu'aurait été l'avenir si l'on n'y avait pas pris garde (Dupuy, 2005, p. 18).

Il est sans doute audacieux d'associer le scénario pénalisant à la *prophétie de malheur* du *catastrophisme* mais nous pensons leur mécanisme de pensée commun, à savoir une conjugaison au futur antérieur. La catastrophe résulte d'un destin inexorable et les conséquences seront donc inévitables. Le processus de pensée est tel que le présent en conserve la mémoire et permet de se projeter dans l'après-catastrophe de sorte qu'il existe « *un moment du point de vue duquel la catastrophe aura eu lieu* » (Dupuy, 2005, p. 17). Ce subterfuge permet d'augmenter la prise de conscience ainsi que l'agir de façon que la catastrophe n'ait finalement pas lieu. La catastrophe, dans cette métaphysique, est un événement à la fois nécessaire et improbable et c'est ce que permet le futur antérieur. La catastrophe, nécessaire au futur antérieur, est néanmoins contingente et pourrait donc ne pas se produire.

Remarquons, à toutes fins utiles et nous y reviendrons (voir section 10.6), que la valeur morale que sous-tend le catastrophisme est bien la *prudence* et non la *prévention*. Dans la dynamique de la prévention, l'événement est un possible qui, par nos actions – si elles sont efficaces –, ne se réalise pas alors que la *catastrophe*, dans la perspective qu'en donne Dupuy, est de l'ordre de

¹⁶⁰ Les hésitations et contradictions de l'AFCN dans la formulation de ses guidances en sont peut-être la preuve.

la fatalité et tout événement en puissance, qui n'appartiendrait donc ni au présent ni au futur, est impossible (Dupuy, 2005, p. 19).

Toutefois, la seule adhésion à cette troisième composante de la preuve d'innocuité, qui est la *focalisation sur le scénario du pire* (Godard et al., 2002), ne permet évidemment pas d'affirmer que l'AFCN associe la démonstration de sûreté à une démonstration d'innocuité. Mais la difficulté de l'ONDRAF à considérer l'utilité de ce type de scénario dans la démonstration de sûreté tend au moins à révéler une différence de perception entre les deux acteurs de ce qu'est censé comporter une démonstration de sûreté...

6.7 Conclusions du chapitre 6

Nous avons vu que le concept de sûreté se laissait difficilement appréhender par une définition positive et univoque. L'AIEA définit la sûreté nucléaire par rapport à la sûreté entendue en un sens commun et par rapport à *l'obtention de conditions d'exploitation correctes* permettant d'éviter les accidents radiologiques. Nous avons discuté ces deux acceptions. D'une part, la familiarité que nous entretenons avec la notion véhiculée par le vocable « sûreté » participe certainement à la création d'un *obstacle épistémologique* au sens où l'entend Bachelard et nous renforce dans l'idée de questionner cette connaissance implicite, logée entre émotion et rationalité. D'autre part, puisque la notion de sûreté nucléaire est renvoyée à celle de sûreté au sens classique, nous avons interrogé ce que les ingénieurs entendaient par sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Bien que l'objet dialectique que constitue le stockage géologique ne puisse totalement s'apparenter à un système industriel, il nous semblait toutefois pertinent de questionner cette connaissance établie de longue date. Nous y avons découvert principalement le rôle de la *disponibilité* ainsi que celui de la *fiabilité* dans la construction de la sûreté de fonctionnement. La *démonstration de fiabilité* établie depuis les années 1950 pourrait être aux origines de la *démonstration de sûreté* qu'ambitionne le *safety case*. Elle repose d'ailleurs sur les notions de simplicité de conception, de redondance et de dimensionnement pessimiste qui font écho à certains grands principes de la sûreté nucléaire (appliquée aux stockages), à savoir la robustesse, la défense en profondeur et le conservatisme des évaluations de sûreté et de

faisabilité. Quant à la disponibilité, elle est représentée, dans la sûreté nucléaire des stockages, par le principe BAT, lui-même associé au principe d'optimisation de la sûreté. Le principe BAT joue un rôle clé dans le développement des installations de stockages. Par ce truchement, l'optimisation et la disponibilité se lient tout comme la fiabilité et la disponibilité qui, en pratique, ont aussi tendance à s'agréger. Un lien entre optimisation (de la sûreté) et fiabilité se laisse donc entrevoir et il pourrait constituer une piste d'investigation dans la compréhension de la vision de l'AFCN sur l'optimisation.

Par ailleurs, l'analyse des attributs de la sûreté de fonctionnement met en évidence la composante (sécurité)-innocuité. Bien que l'innocuité entendue dans le contexte de la sûreté de fonctionnement (i.e. l'évitement des catastrophes) s'écarte de l'acception commune du mot (i.e. l'absence de nuisance), cette analyse soulève la piste de la preuve d'innocuité en tant que démonstration de sûreté. Cette exigence d'innocuité a été discutée par certains auteurs dans le cadre du principe de précaution (Godard *et al.*, 2002). Celui-ci n'est pas étranger à la sûreté. En effet, la sûreté qui nous occupe, celle à laquelle l'AIEA nous renvoie lorsqu'il est question de sûreté nucléaire et celle qui nous intéresse au premier chef dans les stockages géologiques, partage une proximité avec la précaution, du fait de sa grande temporalité et par le contexte d'incertitudes dans lequel elle se déploie. Ce lien, bien que non explicité par l'AIEA, se voit également confirmé dans la préoccupation de protéger les générations futures, une protection érigée en tant qu'objectif de la sûreté nucléaire et qui fonde aussi la démarche de précaution.

Nous avons également vu que précaution et sûreté s'articulent autour de la notion de risque et nous avons conclu à un terreau conceptuel commun. Une brève discussion éthique que nous approfondirons ultérieurement a été entamée à l'aune du *Principe responsabilité* de Jonas (Jonas, [1979] 1995) et du *catastrophisme éclairé* de Dupuy (Dupuy, 2002). Ce détour par l'éthique nous a ramenés une nouvelle fois à la question de l'exigence d'innocuité et nous a invités à l'approfondir. La différence d'acceptions du concept d'innocuité s'est finalement retrouvée au cœur de ce débat d'idées oscillant entre le zéro mal et la *minimisation du pire*. Les arguments qui nous avaient

permis de récuser, dans un premier temps, la preuve d'innocuité en tant que possible démonstration de sûreté ont dû être nuancés.

En particulier, l'argument lié à la focalisation sur le scénario du pire a retenu toute notre attention et nous l'avons exploré à la lumière des scénarios pénalisants proposés par l'AFCN. Nous y avons vu une similitude. L'AFCN ne cherche pas une prévision de l'évolution du système grâce au scénario pénalisant mais, par ce biais, elle emprunte au catastrophisme l'idée de regarder ce à quoi le système pourrait être conduit si l'on n'y prenait pas garde. Ce subterfuge consistant à regarder le possible désastre porté par le scénario pénalisant permettrait d'augmenter la conscience des actions à entreprendre pour que ce destin ne se réalise jamais. Usant ainsi de la métaphysique du catastrophisme, l'AFCN s'attache à une valeur morale de prudence sur laquelle nous reviendrons ultérieurement.

Ainsi, après avoir lié optimisation et disponibilité, disponibilité et fiabilité, fiabilité et sûreté, l'optimisation sans limite de la sûreté – telle que préconisée par l'AFCN – est apparue dans le miroir de la recherche d'innocuité en tant que démonstration de sûreté, puisque le but ultime d'une telle optimisation serait – nous le supposons – de pouvoir garantir un dommage zéro. Cette piste d'investigation n'est cependant pas totalement convaincante et, bien qu'elle éclaire possiblement la vision de l'AFCN, cet éclairage n'est que partiel. Il est cependant suffisant pour mettre au jour une première pierre d'achoppement dans l'interprétation de la sûreté. La fiabilité est une grandeur discrète que l'on déduit de l'axiome de Peirce (1926) sur la rupture d'une chaîne : la résistance d'une chaîne est celle de son maillon le plus faible (Lannoy, 2008, p. 51). Il en résulte que la fiabilité d'un système résulte de celle de ses constituants et la fiabilité de chacun d'eux se devra d'être maximisée si l'on veut conférer à l'ensemble la plus grande fiabilité possible. Mais ce qui est vrai pour la fiabilité, l'est-il pour l'optimisation ? Nous ne le pensons pas. Avant d'approfondir ce point (voir section 8.6), nous souhaitons questionner, dans les prochains chapitres, un autre glissement possible dans l'interprétation de la sûreté. Il s'agit de comprendre ce qui rend ou non légitime la généralisation du *principe d'optimisation de la protection radiologique* à la sûreté.

Chapitre 7 Protection radiologique : des fondements éthiques à la sûreté

Si le principe d'optimisation retiendra principalement notre attention dans le développement de cette thèse, il ne peut être abordé hors contexte. Le présent chapitre propose tout d'abord une introduction aux trois principes fondamentaux de la protection radiologique (section 7.1) en soulignant le cadre moral dans lequel ils s'inscrivent et qui, à l'instar de la sûreté, est en lien avec la protection des générations futures. Rappelons que ce principe de protection des générations futures constitue la clé de voûte de la sûreté pour l'AIEA par le biais de son septième principe fondamental (IAEA, 2006c) ainsi que du principe de précaution qui souligne le contexte d'incertitudes dans lequel cette sûreté se déploie (voir section 6.4). Les fondements éthiques de la protection des générations futures sont ici discutés (section 7.2) ainsi que quelques notions de justice permettant d'appréhender l'équité intergénérationnelle (section 7.3).

La perspective conséquentialiste de la radioprotection est également abordée dans ce chapitre en remarquant en particulier le lien étroit qu'entretient le principe ALARA avec la notion d'utilité, en tant que concept collectif à maximiser (section 7.4). Nous reviendrons encore sur cette notion d'utilité au chapitre suivant (voir chapitre 8), par l'analyse des outils d'aide à la décision auquel le principe d'optimisation a recours en pratique et qui considèrent l'utilité comme une fonction, au sens économétrique du terme.

En outre, après avoir discuté de l'origine du principe des limites de doses (section 7.4.3), ce chapitre esquissera les liens reconnus par la CIPR entre le

principe d'optimisation et le principe de sûreté BAT – témoignant ainsi de la frontière fragile et perméable entre la protection radiologique et la sûreté des systèmes (section 7.4.4) – ainsi qu'avec le principe de robustesse en tant que principe de sûreté (section 7.4.5). Le chapitre se conclut sur les fondements éthiques du principe de justification (section 7.4.6).

7.1 Principes généraux de la protection radiologique, protection des générations futures et durabilité

Dans cette section, nous énonçons les trois principes de la protection radiologique mais sans les discuter individuellement. Nous nous intéressons au cadre moral dans lequel ils s'inscrivent qui, à l'instar de la sûreté, est en lien avec la protection des générations futures.

Les trois principes généraux de la protection radiologique tels que formalisés par la CIPR¹⁶¹ dans sa publication 26 en 1977 sont (ICRP, 1977) :

- Le principe **de justification** (des pratiques) : toute décision qui modifie la situation d'exposition aux rayonnements doit faire plus de bien que de mal. En d'autres termes, toute activité susceptible de soumettre des personnes à une exposition aux rayonnements ionisants ne peut être entreprise ou exercée que si elle est justifiée par ses avantages, notamment en matière sanitaire, sociale, économique ou scientifique, rapportés aux risques inhérents à cette exposition.
- Le principe **d'optimisation** : la possibilité d'expositions, le nombre de personnes exposées et le niveau des doses individuelles doivent être

¹⁶¹ Les travaux de la CIPR remontent à bien plus loin que 1977, mais la publication de cette année-là a formalisé les principes de la protection radiologique d'une manière qui est encore utilisée aujourd'hui. Il n'est pas intéressant, dans le contexte de cette section, de faire référence aux travaux de la commission à des époques antérieures, avant, par exemple, la découverte des effets stochastiques de l'exposition radiologique. En effet, la CIPR a quantifié pour la première fois les risques des effets stochastiques des rayonnements dans sa publication 26 et a proposé un système de limitation des doses avec les trois principes de la radioprotection. Toutefois, lorsqu'il s'agira d'étudier l'histoire du principe d'optimisation, nous remonterons à des travaux de 1966.

maintenus aussi bas que raisonnablement possible, en tenant compte des facteurs économiques et sociétaux.

- Le principe **d'application des limites de doses** : la dose totale reçue par un individu, due aux sources réglementées dans les situations d'exposition planifiée autres que l'exposition médicale de patients, ne doit pas dépasser les limites appropriées indiquées par la Commission.

Même si leur énoncé est resté fondamentalement inchangé au cours du temps, la compréhension et l'application de ces trois principes ont évolué afin de refléter les changements de pensée au plan éthique. Au niveau de la CIPR, c'est en 1997 avec la parution de la publication 77 (ICRP, 1997), suivie en 1998 de la publication 81 (ICRP, 1998) que la protection des générations futures devient un principe cardinal déterminant le cadre moral dans lequel ces trois principes doivent s'interpréter, comme l'atteste l'extrait de la publication 77 reproduit ci-dessous.

*« (67) There are also **ethical questions** in judging the importance of possible harm to future generations from decisions taken in the present. The Commission can only indicate the implications of some of the options for presenting the analysis of future risks and add some general suggestions. » (ICRP, 1997)*

Précisons que le principe de protection des générations futures voit, en réalité, le jour dans la littérature dédiée à la gestion des déchets nucléaires dès 1955 via le Comité de l'Académie nationale américaine étudiant les aspects géologiques des stockages de déchets (NRC, 1966) et qu'on le

retrouve également dans la publication de l'AIEA SF-111 consacrée aux principes de gestion des déchets radioactifs (IAEA, 1995)¹⁶² :

« Principle 4: Protection of future generations

*Radioactive waste shall be managed in such a way that **predicted impacts on the health of future generations will not be greater than relevant levels of impact that are acceptable today. (...)** » (IAEA 1995, p. 6, nous soulignons)*

Le principe 4 de la SF-111 ne se contente pas d'énoncer une responsabilité à l'égard des générations futures mais instaure un principe d'équité intergénérationnelle puisque les impacts futurs ne peuvent dépasser ceux jugés acceptables aujourd'hui. De façon très actuelle, le principe 5 de la même publication justifie la nécessité pour les générations ayant bénéficié de l'atome de veiller à ne pas faire porter indûment la charge de cette gestion

¹⁶² Aujourd'hui remplacée par la publication sur les principes fondamentaux de sûreté SF-1 (IAEA, 2006). Nous reproduisons ici l'énoncé complet de ce principe :

« Principle 4: Protection of future generations

Radioactive waste shall be managed in such a way that predicted impacts on the health of future generations will not be greater than relevant levels of impact that are acceptable today. 315. This principle is derived from an ethical concern for the health of future generations. In the establishment of acceptable levels of protection, the latest recommendations of international organisations, for example the ICRP and the IAEA, are typically taken into account.

316. While it is not possible to ensure total isolation of radioactive waste over extended timescales, the intent is to achieve reasonable assurance that there will be no unacceptable impacts on human health. This is typically achieved by applying the multibarrier approach in which both natural and engineered barriers are utilised. The existence of suitable natural barriers is usually determined within a siting process.

Furthermore, account should be taken of possible future exploration for, or exploitation of, valuable natural resources that could potentially result in adverse effects on the isolation capability of a disposal facility. In the implementation of radioactive waste management, particularly for disposal, uncertainties in long-term safety assessment due to the inherent difficulty in predicting impacts far into the future should be taken into account. »

sur les générations futures, tout en insistant sur la nécessité de transmettre l'information *ad hoc* à ces générations (IAEA 1995, p.7)¹⁶³ :

*« Principle 5: Burdens on future generations
Radioactive waste shall be managed in such a way that will not
impose undue burdens on future generations (...) » (IAEA 1995, p.7)*

Si la publication SF-111 a été supplantée par la SF-1 sur les principes fondamentaux de sûreté (IAEA, 2006a) qui érige la protection des générations actuelles et futures comme principe n°7 (voir section 6.4), ce n'est pas sans avoir fertilisé au passage la regrettée « bible » du stockage géologique, la publication WS-R-4 de l'AIEA (IAEA, 2006b) avant qu'elle ne soit elle-même remplacée par la publication plus générique SSR-5 (IAEA, 2011b) et le guide spécifique SSG-14 (IAEA, 2011a). Ainsi la publication SSR-5 spécifie les critères à satisfaire afin d'atteindre cet objectif de protection en insistant sur l'optimisation de l'installation et le respect des limites de doses :

« The safety objective is to site, design, construct, operate and close a disposal facility so that protection after its closure is optimised, social and economic factors being taken into account. A reasonable assurance also has to be provided that doses and risks to members of

¹⁶³ « Principle 5: Burdens on future generations

Radioactive waste shall be managed in such a way that will not impose undue burdens on future generations

317. Consideration for future generations is of fundamental importance in the management of radioactive waste. This principle is based on the ethical consideration that the generations that receive the benefits of a practice should bear the responsibility to manage the resulting waste. Limited actions, however, may be passed to succeeding generations, for example, the continuation of institutional control, if needed, over a disposal facility.

318. The responsibility of the present generation includes developing the technology, constructing and operating facilities, and providing a funding system, sufficient controls and plans for the management of radioactive waste.

319. The timing and implementation of disposal of individual radioactive waste types will depend on scientific, technical, social and economic factors such as the availability, acceptability and development of suitable sites and the decrease of radioactivity levels and heat generation during interim storage.

320. The management of radioactive waste should, to the extent possible, not rely on long-term institutional arrangements or actions as a necessary safety feature, although future generations may decide to utilise such arrangements, for example to monitor radioactive waste repositories or retrieve radioactive waste after closure has been effected. The identity, location and inventory of a radioactive waste disposal facility should be appropriately recorded and the records maintained. »

*the public in the long term will not exceed the dose constraints or risk constraints that were used as design criteria*¹⁶⁴. » (IAEA 2011b, p. 13).

Notons au passage que l'AIEA n'ignore pas le problème des incertitudes sur le long terme et relativise la considération de la dose comme (seul) outil d'aide à la décision¹⁶⁵. Le principe de protection des générations futures ne servira cependant de véritable plaidoyer pour le stockage géologique que dans la note de positionnement de l'AEN de 1995 en invoquant le respect de l'équité intragénérationnelle et de l'équité intergénérationnelle (NEA, 1995) :

« After a careful review of the environmental and ethical issues, (...), the members of the NEA Radioactive Waste Management Committee: (...)

- *believe that the strategy of geological disposal of long-lived radioactive wastes:*
 - *takes intergenerational equity issues into account, notably by applying the same standards of risk in the far future as it does to the present, and by limiting the liabilities bequeathed to future generations; and*
 - *takes intragenerational equity issues into account, notably by proposing implementation through an incremental process over several decades, considering the results of scientific progress; this process will allow consultation with interested parties, including the public, at all stages; (...) » (NEA, 1995, p. 5)*

¹⁶⁴ La publication spécifie la limite de dose: « *the dose limit for members of the public for doses from all planned exposure situations is an effective dose of 1 mSv in a year. This and its risk equivalent are considered criteria that are not to be exceeded in the future* » (IAEA, 2011b, p. 13).

¹⁶⁵ « *2.16: it is recognized that radiation doses to people in the future can only be estimated and that uncertainties associated with these estimates will increase for periods farther into the future. Caution needs to be exercised in applying criteria for periods far into the future. Beyond such timescales, the uncertainties associated with dose estimates become so large that the criteria might no longer serve as a reasonable basis for decision making* » (IAEA, 2011b, p. 14).

Ce principe de protection des générations futures sera également repris dans le traité international qu'est la *Convention commune* (IAEA, 1997). Il s'y énonce comme suit :

« À l'avenir, les individus et les populations devraient bénéficier au moins du même niveau de protection que la génération actuelle. »
(IAEA, 1997, article 1, (ii)).

Notons que l'énoncé de la *Convention commune* va au-delà de l'idée simple de protection puisqu'elle énonce aussi les *besoins* et des *aspirations* des générations futures :

« Faire en sorte qu'à tous les stades de la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs il existe des défenses efficaces contre les risques potentiels afin que les individus, la société et l'environnement soient protégés, aujourd'hui et à l'avenir, contre les effets nocifs des rayonnements ionisants, de sorte qu'il soit satisfait aux besoins et aux aspirations de la génération actuelle sans compromettre la capacité des générations futures de satisfaire les leurs. » (IAEA, 1997, article 1, (ii), nous soulignons)

Cette vision est contemporaine du concept de durabilité au sens de Brian Barry qui soutient que, pour comprendre notre lien avec les générations futures – et mesurer les devoirs potentiels que nous avons à leur égard –, nous devons commencer par nous interroger sur notre lien avec les générations contemporaines et étudier dans quelle mesure et de quelle manière il peut être élargi aux générations futures (Kermisch et Taebi, 2017). Le principe sur lequel se fonde Barry est celui de l'égalité fondamentale des êtres humains, qui le conduit à définir le concept de durabilité de la manière suivante :

« Il existe un X quelconque dont la valeur doit être maintenue pour autant qu'il soit en notre pouvoir de le faire, et ce dans un futur indéfini. » (Barry, 1997, p. 50, nous traduisons).

Sur la base de l'idée qu'une caractéristique fondamentale des êtres humains est « leur capacité à se forger leur propre conception de la vie bonne », Barry définit X comme « l'opportunité de mener une vie bonne en fonction de sa propre conception de la vie bonne » (Barry, 1997, p. 52, nous traduisons). La durabilité doit donc être entendue comme l'exigence pour nous de fournir

une telle opportunité aux générations futures. En d'autres termes, comme nous ne sommes pas en mesure de prédire la conception de la vie bonne adoptée par les populations à venir, nous ne devons pas réduire le champ des possibles qui s'offre à elles.

Le lien que nous établissons avec la durabilité, de même qu'avec le principe de précaution que nous évoquions précédemment (voir section 6.4) est explicitement établi par la publication 122 de la CIPR (ICRP, 2013) :

*« (15) Over the last decades, reflections on safety and societal issues associated with this long-term dimension of the hazard from long-lived radioactive waste clearly point out the complexity of the situation: on one hand, it is not possible to envisage how society will be organised in the distant future, while on the other hand, the current generation has a duty of care to future generations. This complexity is central to the ethical reflections required in the design of waste **management strategies that are based on the precautionary principle and sustainable development in order to preserve the health and environment of future generations.** » (ICRP, 2013, nous soulignons)*

Remarquons que le point de vue de la CIPR de 2013 contraste avec la vision anthropocentriste des premières publications¹⁶⁶ puisqu'il est aujourd'hui question de protection de l'environnement sans référer à sa valeur relative par rapport à l'humain comme ce fut longtemps le cas¹⁶⁷. La CIPR consacre même une publication entièrement dédiée à la protection de l'environnement (ICRP, 2014) et, en travaillant de façon plus holistique, rend effectif le cadre moral de la durabilité.

Enfin, signalons que l'exigence légale de protection des générations futures a plus récemment également été reprise par la directive européenne

¹⁶⁶ Comme l'atteste par exemple, cet extrait la publication 26 de 1977 (ICRP, 1977) :

« (14) The level of safety required for the protection of all human individuals is thought likely to be adequate to protect other species, although not necessarily individual members of those species. The Commission therefore believes that if man is adequately protected then other living things are also likely to be sufficiently protected. »

¹⁶⁷ Se référant à un principe qui a prévalu pendant longtemps et selon lequel si l'individu est protégé, l'environnement l'est aussi.

2011/70/Euratom (EC, 2011), dans son article 1 ainsi que dans son préambule (considérant 24) dont nous reproduisons les extraits ci-dessous :

« Chaque Etat membre devrait avoir l'obligation morale d'éviter d'imposer aux générations futures des contraintes excessives liées au combustible usé et aux déchets radioactifs, en ce compris des déchets radioactifs résultant du démantèlement d'installations nucléaires existantes. En mettant en œuvre la présente directive, les Etats membres démontreront qu'ils ont pris des mesures raisonnables pour que cet objectif soit atteint. » (EC, 2011, préambule, § 24)

« La présente directive établit un cadre communautaire visant à garantir la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs afin d'éviter d'imposer aux générations futures des contraintes excessives. » (EC, 2011, article 1)

Cette prescription légale est aussi une exigence d'un point de vue empirique¹⁶⁸ comme l'attestent de nombreuses études sur le sujet (Kermisch, 2016a ; SCK CEN, 2011 ; EC, 2008b ; Fondation Roi Baudoin, 2011). Nous ne commentons pas ces études à caractère sociologique mais nous retenons que le report de charges sur les générations futures semble inacceptable tant d'un point de vue éthique que sociétal.

Toutefois, nous remarquons que les textes légaux et de doctrine¹⁶⁹, tant de l'EC que de l'AIEA et de l'AEN, postulent le principe de protection des générations futures plus qu'ils ne le défendent, recourant comme pour la définition de la sûreté à une sorte de « sens commun » pour sa validation. Or, même si le principe de protection des générations futures connaît peu de détracteurs, ses fondements éthiques méritent néanmoins d'être questionnés. Ne pas interroger ce sens commun pourrait bien donner raison à la crainte de « récupération de l'opinion » exprimée par Pierre Strohl¹⁷⁰ :

¹⁶⁸ C'est-à-dire en lien avec l'acceptation sociétale par le biais d'analyses sur la perception du risque comme par exemple, des études psychométriques de type « baromètre » (SCK CEN, 2011).

¹⁶⁹ Nous entendons par là les textes qui constituent les recommandations internationales et qui forgent un cadre de pensée. Il s'agit de l'un des rôles du droit mou (*soft law*).

¹⁷⁰ Pierre Strohl était directeur général adjoint de l'AEN dans les années 1990.

« En effet, les experts sont tentés de justifier par des arguments de caractère moral des choix technologiques dictés, en réalité, par les données de leurs connaissances et de leur savoir-faire ; ce discours apparaît inévitablement comme une tentative de "récupération" de l'opinion. » (Strohl, 1990)

Si le développement de stockages géologiques permet aux générations futures d'éviter d'endosser indûment la responsabilité de charges de gestion à long terme des déchets radioactifs (NEA, 1995), encore faut-il justifier d'avoir des obligations vis-à-vis de ces générations, surtout au-delà du devoir évident de soin à l'égard de ses enfants et petits-enfants. Cette question est discutée dans la section suivante.

7.2 Ethique et générations du futur

« Tant que le futur restera moins cher que le présent, les hommes seront en danger de suicide collectif. » (Dominique Dron)¹⁷¹

7.2.1 Le double enracinement de l'éthique du futur de Jonas et l'approche déontologique

Nous avons précédemment souligné la formulation tacite d'un principe d'équité intergénérationnelle dans l'énoncé des principes de sûreté de l'AIEA (IAEA, 1995) dont le septième porte sur la protection des générations actuelles et futures (IAEA, 2007). En effet, la publication SF-111 va au-delà de la simple protection des générations futures puisqu'elle établit que celles-ci ne devraient pas payer un tribut supérieur à celui des générations actuelles

¹⁷¹ Dans (Dron, 1995).

(voir section 7.1)¹⁷². Il ne s'agit donc pas seulement d'une protection sur le plan sanitaire mais bien de veiller au bien-être de ces générations en refusant d'exiger d'elles davantage que des générations actuelles.

Nous avons eu également recours, au chapitre précédent, à l'éthique du futur de Jonas afin d'éclairer ce principe de l'AIEA. Le recours à Jonas permet de dépasser l'éthique traditionnelle caractérisée, selon Olivier Depré, par l'anthropocentrisme, la restriction à l'environnement immédiat de l'action et donc au présent, l'hypothèse d'une nature constante de l'homme qui ne pourrait être affectée par la *technè* et enfin, l'hypothèse que cette *technè* ne peut affecter la nature des choses (Depré, 2000, pp. 92-93).

Or, comme le souligne Jonas :

« La technique moderne a introduit des actions d'un ordre de grandeur tellement nouveau, avec des objets tellement inédits et des conséquences tellement inédites, que le cadre de l'éthique antérieure ne peut plus les contenir. » (Jonas, [1979] 1995, p. 30)

L'éthique de Jonas prend donc acte de « la vulnérabilité de la nature » par l'intervention technique de l'homme (Jonas, [1979] 1995, p. 31) et, par là

¹⁷² On pourra s'étonner que nous citions certaines publications de l'AIEA devenues aujourd'hui obsolètes, telles la publication SF-111 (IAEA, 1995). C'est parce que nous privilégions l'approche la plus complète possible tenant compte de l'évolution de pensée au sein de l'agence de Vienne. Ayant contribué à la révision de certains de ces documents (e.g. IAEA SSR-5 (IAEA, 2011b)), nous sommes en mesure d'établir les relations suivantes : la publication WS-R-4 (IAEA, 2006b) dédiée aux stockages géologiques s'appuie explicitement sur la publication SF-111 (IAEA, 1995). Alors que cette dernière allait être refondue dans les fondamentaux plus généraux, la publication SF-1 (IAEA, 2006a), la WS-R-4 allait être remplacée par deux publications distinctes, la SSR-5 plus générique et dédiée aux stockages de tous types et, la publication SSG-14 portant spécifiquement sur les stockages géologiques (IAEA, 2011a). Il ne s'agit pas d'un remplacement bijectif, ni au niveau du contenu ni au niveau de la hiérarchie des normes. Ainsi le WS-R-4 était un « *Safety Requirement* » alors que son homologue actuel, le SSG-14, n'est plus qu'un « *Specific Safety guide* », de grade inférieur. Seules certaines des dispositions du WS-R-4 ont été gardées au niveau du « *Safety Requirement* » et donc basculées vers le SSR-5. Il est permis de le regretter. Plus flagrant sans doute est la phagocytose du SF-111 par le SF-1 (IAEA, 2006a) – « *publication superseded by SF-1* » (<https://www.iaea.org/publications/5192/principles-of-radioactive-waste-management-safety-fundamentals> [Consulté le 15 février 2021]) alors que les fondamentaux de sûreté n'en couvrent le champ d'application que de façon très (trop) générale. Cette explication résultant de notre expérience n'est pas à proprement parler, documentée. Nous en avons fait bénéficier l'étude réalisée par Kermisch sur les conflits intergénérationnels (ONDRAF, 2020e), tout en assumant l'entière responsabilité de cette « lecture » de l'histoire.

même, d'une responsabilité à son égard. Il s'agit de répondre à l'appel muet de la nature :

« un appel muet qu'on préserve son intégrité semble émaner de la plénitude du monde de la vie, là où elle est menacée. » (Jonas, [1979] 1995, p. 35)

Cette responsabilité envers la nature vise, entre autres, la survie de l'espèce humaine parce que nous n'avons pas le droit de risquer d'oblitérer la mise au monde des générations futures (Jonas, [1979] 1995, p. 40). Cette éthique envisage indéniablement les conséquences de nos actions – se procurer une idée des effets lointains est une première obligation de l'éthique du futur (Jonas, [1979] 1995, p. 67) – et s'inscrit dès lors dans une perspective conséquentialiste. Il est cependant indéniable que Jonas est aussi largement influencé par Kant et qu'il formule d'ailleurs, à la manière d'impératifs kantiens, les maximes de son *Principe responsabilité* :

« Agis de façon que les effets de ton action soient compatibles avec la Permanence d'une vie authentiquement humaine sur terre. » (Jonas, [1979] 1995, p. 40)

Dans la lignée de Kant, l'éthique de Jonas ne tourne pas le dos aux « valeurs en soi » et relève donc également d'une perspective déontologique. Il y a un droit à la vie et une interdiction pour l'humanité de se suicider (Jonas, [1979] 1995, p. 83).

L'enracinement de la question éthique de préservation des générations futures, ainsi que plus particulièrement de son articulation à notre question d'étude sur le principe d'optimisation, est double : il est tant téléologique que déontologique. Tentons d'approfondir chacune de ces racines dans les limites qui puissent intéresser notre question de recherche et, en particulier, le cas de l'optimisation.

En ce qui concerne l'enracinement téléologique de l'éthique des générations futures, il ne pose pas seulement la question épineuse des conséquences de notre agir sur l'existence et le bien-être des générations futures car en constatant que l'homme est capable de détruire la nature et d'élever le suicide au niveau de l'Humanité elle-même, Jonas s'interroge sur le *pourquoi*

de l'existence humaine (cause finale) et ancre son éthique du futur dans la métaphysique, comme l'illustre l'extrait ci-dessous :

« Ce n'est pas comme si nous pouvions laisser à elle-même la question de notre responsabilité à l'égard de l'existence d'une humanité future et que nous pourrions nous tourner simplement vers les obligations à l'égard de celle qui existera, autrement dit vers la sollicitude pour leur être- tel. Au contraire, la première règle pour l'être-tel exigé peut uniquement être tirée de l'impératif de l'existence (...). » (Jonas, [1979] 1995, p. 94)

Comme le souligne Depré, Jonas pose la question de la légitimité de l'existence humaine sur terre ainsi que de sa permanence. L'obligation à l'égard de l'humanité future est une obligation à l'égard de l'existence elle-même (Depré, 2000, pp. 94-97).

Avec l'approche déontologique, il s'agit de reconnaître l'existence d'un devoir des générations actuelles vis-à-vis des générations futures simplement parce que celles-ci le méritent et qu'il semble donc juste de s'y plier. Si l'on écarte temporairement Jonas en raison de son éthique non strictement déontologique, nous pouvons considérer avec Buchanan N.H. (Buchanan N.H., 2009) que la reconnaissance d'une obligation envers les générations futures peut dériver directement de l'impératif kantien qui implique un minimum d'attention de la part de la génération précédant l'actuelle afin que celle-ci puisse exister :

« Agis comme si la maxime de ton action devait être érigée par la volonté en loi universelle de la nature. » (Kant [1785]¹⁷³ cité dans Depré, 2000, p. 81)

En réalité, il suffit que les gens prennent soin de leurs enfants, ce qui implique jusqu'aux droits de ceux-ci à devenir eux-mêmes parents, pour que la nécessité d'un partage de la notion de vie elle-même au travers les générations soit reconnue (Buchanan N.H., 2009, pp. 1252-1253).

¹⁷³ Kant [1785] 1980, *Fondements de la Métaphysique des mœurs*, Traduction nouvelle avec introduction et notes par V. Delbos. Paris, Delagarve, s.d., réimpr. 1980.

Notons que la *Déclaration universelle des Droits de l'Homme* (Nations Unies, 1948) est une autre source de l'enracinement déontologique. Elle se présente sous la forme d'un discours et ses articles 1 et 25, par exemple – en ce que ceux-ci ne contiennent pas de restriction temporelle – valent pour tout individu présent et à venir :

Art. 1 : « Tous les hommes naissent libres et égaux en dignité et en droits. (...) »

Art. 25 : « Toute personne a droit à un niveau de vie suffisant pour assurer sa santé, son bien-être et ceux de sa famille, notamment pour l'alimentation, l'habillement, le logement, les soins médicaux ainsi que pour les services sociaux nécessaires ; elle a droit à la sécurité en cas de chômage, de maladie, d'invalidité, de veuvage, de vieillesse ou dans les autres cas de perte de ses moyens de subsistance par suite de circonstances indépendantes de sa volonté. »

Ces articles établissent dès lors, sans grande ambiguïté, qu'il existe bel et bien une responsabilité mutuelle des humains, au travers des générations, pour servir une « famille humaine » (Cotton, 2005, p. 3). Ce constat est corroboré par la déclaration de l'UNESCO sur les droits humains des générations futures qui déclare qu'une vie digne d'être vécue sur Terre n'est une possibilité pérenne que si les personnes appartenant aux générations futures sont reconnues comme ayant dès à présent certains droits (UNESCO, 1994 cité dans Gosseries, 2008a). Outre la reconnaissance de responsabilité entre les générations, cette déclaration implique l'existence de certains droits alors que leurs porteurs ne sont pas encore venus à l'existence.

En outre, dans les actes de la Conférence générale des Nations Unies de 1997, on peut trouver un autre instrument explicite de déontologie en la *Déclaration sur les responsabilités des générations présentes envers les générations futures*. Cette déclaration qui se crédite d'instruments antérieurs de droit international telles la Charte des Nations Unies « préservant les générations futures du fléau de la guerre », la conférence de l'UNESCO de 1972 sur la protection du patrimoine mondial, culturel et naturel ou encore, la Déclaration de Rio de 1992 sur l'environnement, proclame les besoins et intérêts des générations futures. Elle établit, en son premier article, la responsabilité des générations présentes à garantir ces besoins et intérêts (ONU, 1997, p. 71).

En dépit de la morale kantienne, du discours des Nations Unies et des nombreuses occurrences de l'énonciation, dans différents fora, de la nécessité de protéger les générations futures¹⁷⁴, de nombreuses objections existent néanmoins (Buchanan N.H., 2009). Le fait que les droits des générations futures ne sont effectivement intégrés dans la Constitution de trois pays seulement : le Japon, la Norvège et la Bolivie en témoigne d'ailleurs (Gosseries, 2008a). La plus évidente des objections découle de l'argument de non-existence qui pointe l'impossibilité *a priori* d'établir un droit quelconque vis-à-vis d'individus n'existant pas (encore) et qui pourraient même ne jamais exister. Et quel sens même donner à ce droit ? (Partridge, 2001). Cet argument connaît des variantes et nous développons ces objections dans la section suivante.

7.2.2 Protéger les générations futures : évidence morale ou construction opportuniste ?

Discussion critique des principales objections à la préservation des générations futures¹⁷⁵

Reconnaître l'existence de droits vis-à-vis des générations futures soulève non seulement la question du non-être de ces générations (à moins bien entendu de limiter celles-ci à nos enfants mais s'ils sont déjà nés, n'appartiennent-ils pas déjà à la génération actuelle ?) mais aussi la question de la responsabilité (individuelle et/ou collective) à leur égard. En outre, quelle seraient la nature et le contenu de ces droits ? En effet, même s'il existait un devoir envers les générations futures, la question de la répartition du bien-être pose immédiatement problème. Jusqu'où faut-il grever les

¹⁷⁴ Bien que comme le dit Buchanan N.H. : « *It is possible, of course, that these and other invocations of the interests of future generations are more cynical than aspirational.* » (Buchanan N.H., 2009)

¹⁷⁵ Cette section s'inspire – surtout dans sa structure et dans la formulation des objections – des travaux de Céline Kermisch (ONDRAF, 2020e). Elle s'en écarte cependant dans le développement des idées que cette section vise à compléter, leur mise en perspective pour le propos de cette thèse ainsi que par le choix des auteurs consultés (en y ajoutant notamment Baier, Singer, Dupuis, Fallon, Parotte, ...). Cette section recourt également davantage aux travaux de Axel Gosseries.

ressources actuelles en vue d'assurer la prévention de risques futurs ?
Matthew Cotton résume ce point de vue en ces termes :

« we must question whether it is ethically correct to spend billions of pounds now to prevent a number of statistical fatalities, far in the future, when potentially more immediate benefit, in terms of lives saved, can be realized from spending the same money on more immediate risks to society (...) » (Cotton, 2005, p. 2)

Cette question éthique fait écho à celle, plus politique, des provisions nucléaires. La sécurité du financement à long terme d'un stockage géologique pour les déchets hautement radioactifs ou à vie longue est une préoccupation largement partagée par les citoyens qui, lors de l'enquête Delphi de 2019 réalisée en Belgique, souhaitaient une affectation unique des fonds de manière à rendre ceux-ci immédiatement disponibles au moment de leur utilisation (Parotte et Fallon, 2020, p. 70). Lorsque l'on sait que le provisionnement pour un tel projet se négocie entre 8 et 10.7 milliards d'euros (Parotte et Fallon, 2020, p. 107)¹⁷⁶ et que l'argent actuellement dépensé par l'Europe en vue du déploiement des vaccins contre la Covid-19 est de 6.2 milliards¹⁷⁷, on peut mesurer la portée pratique de la question. Il est évidemment impossible pour un état de débloquer instantanément une telle somme d'argent, ce qui justifie largement un provisionnement à long terme. Il est cependant tout aussi vrai que cette même somme pourrait être destinée à pallier un problème plus immédiat, qu'il soit d'ordre sanitaire, qu'il relève de la lutte contre la pauvreté, ou de toute autre cause qui relève de la justice sociale.

La question du droit des générations futures qui est l'envers de la question de la responsabilité des générations actuelles vis-à-vis desdites générations est problématique puisqu'il semble impossible d'affirmer que leur droit de ne pas subir de préjudice aurait été violé par le fait qu'un stockage géologique pourrait potentiellement affecter un grand nombre de gens. En effet, puisque les générations futures n'existent pas au moment de la

¹⁷⁶ A l'heure d'écrire ces lignes (décembre 2020), l'estimation réelle est de 11.2 milliards d'euros (ONDRAF, 2020a).

¹⁷⁷ Source : <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/press-room/20200914IPR87007/6-2-milliards-pour-combattre-la-crise-et-acceler-le-deploiement-de-vaccins> (Actualité du Parlement européen, [Consulté le 26 décembre 2020]).

fermeture du stockage, elles ne peuvent revendiquer de droit quelconque (Cotton, 2005, p. 3). Il y a en réalité un double problème ici. D'une part, celui du « risque potentiel » (i.e. relevant de la précaution) et du « risque avéré » (i.e. relevant de la prévention) et d'autre part, celui de revendiquer un droit lorsque l'on n'existe pas encore. Le premier problème des « risque potentiel » et « risque avéré » (au-delà des possibles pléonasmes et oxymores respectifs de ces expressions) est d'ordre épistémologique et a déjà été abordé¹⁷⁸, il ne nous intéresse plus ici ; le second relève de l'éthique et s'est déjà posé dans d'autres problématiques très contemporaines comme celle de l'avortement qui s'arc-boute également sur la notion de « vie humaine potentielle » (Singer [1993] 1997, pp. 141, 151-153)¹⁷⁹. Quoi qu'il en soit, cette absence de droit ou plus exactement l'impossibilité pour les générations futures de clamer elles-mêmes ce droit ne nous absout pas de la responsabilité de construire un stockage de déchets sûr mais, simplement, violer cette obligation morale n'impliquerait pas nécessairement de bafouer les droits de quelqu'un d'autre (Cotton, 2005).

D'autres penseurs envisagent le droit des générations futures comme une question symétrique à celle du droit des générations passées, des disparus, des défunts dont on respecte pourtant le testament s'ils ont exprimé des volontés ou pour lesquels un droit par défaut entre également en vigueur s'ils n'ont pas pu le faire. Bien sûr, il s'agit souvent de l'expression de volontés en lien avec les générations actuelles et contemporaines de l'exécuteur testamentaire. La vraie question soulevée ici, comme le précise Annette Baier, n'est non pas de savoir si les générations futures auront bien des droits

¹⁷⁸ Voir notamment section 6.2.

¹⁷⁹ Peter Singer est utilitariste mais nous ne discutons pas ici de son approche particulière des questions éthiques, nous nous référons seulement à la manière dont le problème de la vie potentielle est posé. En outre, nous n'ignorons pas qu'il y a une limite évidente à cette analogie. Dans la discussion sur la vie humaine potentielle de l'embryon ou du fœtus, il y a de l'existant. Pour ce qui relève de la question des générations futures dans le cadre du stockage géologique, il y a une conception plus abstraite de la vie potentielle puisque celle-ci se base sur la simple intention, sans préjuger de la mise en acte de cette potentialité. On pourra cependant rétorquer que c'est seulement une question de perspective puisque la discussion générale de la vie potentiellement humaine du fœtus ou de l'embryon ne s'éloigne pas formellement de celle sur la vie potentielle des futurs humains. Sans doute que l'argument de chaîne d'obligations – relatif à des devoirs envers des générations futures mais contemporaines (Howarth, 1992) – est plus immédiatement perceptible dans le cas de l'avortement.

mais bien si elles en ont déjà aujourd'hui, à cet instant et ce que cela implique (Baier, 1973). Notons, en effet, que le concept d'équité intragénérationnelle comprend également les devoirs des générations présentes à l'égard des générations disparues, comme par exemple, la gestion actuelle des émissions de dioxyde de carbone produites par le passé (Gosseries, 2008b), question l'on peut évidemment étendre à la question de la gestion des déchets radioactifs. L'argument de non-existence ne tient pas, selon Baier, si l'on reconnaît par ailleurs le droit de personnes n'existant plus mais ayant existé. Le fait de ne pas connaître les caractéristiques et les souhaits des générations futures ne peut pas non plus nous exempter d'obligations à leur rencontre. Si notre dépendance aux énergies fossiles nous distingue des générations passées et que cette dépendance ne peut ou ne doit pas être extrapolée aux générations futures, il existe des besoins, comme celui de disposer d'air respirable par exemple, qui ne changeront pas. Certes, concède Baier, l'incertitude relative au nombre d'individus dans le futur peut être une donnée pertinente en regard des obligations vis-à-vis des générations présentes, s'il y avait une nécessité d'arbitrage, mais l'ensemble des incertitudes qui entourent les générations futures ne changent en rien la réalité d'une obligation morale envers elles (Baier, 1973, p. 3).

Si la notion de droit peut poser un problème, ne serait-ce que dans la nécessité de disposer du pouvoir d'exercer ce droit, la notion d'intérêt peut être mobilisée à sa place, les intérêts des générations futures pouvant dépendre des actions entreprises par les générations présentes (Taebi, 2012, p. 301). Il faut cependant reconnaître que ces deux notions peuvent parfois être conflictuelles (Gosseries, 2008a).

Nous avons vu que l'argument de non-existence peut être lui-même contrecarré et s'il constitue bien une première objection à l'octroi d'un droit aux générations futures, celle-ci n'est pas létale.

Toutefois, cette objection dite de « non-existence » n'est pas l'unique à l'encontre de la protection des générations futures. Une autre objection particulièrement troublante est celle qui considère l'impact (perspective conséquentialiste) d'une politique qui serait initiée dans l'intérêt des générations futures et qui modifierait donc celles-ci en favorisant la naissance de certains individus plutôt que d'autres (Partridge, 2001). C'est le *problème de la non-identité* de Parfit qui souligne que nos choix, en raison du

pouvoir actuel de la « science »¹⁸⁰, peuvent tant influencer le nombre d'individus futurs que leur identité (Parfit, 1984). En effet, la naissance de tout individu est conditionnée par la rencontre de ses parents mais plus particulièrement par leur accouplement à un moment précis, ce qui est un phénomène hautement contingent. Mais nos choix vont bien au-delà de l'existence ou de la non-existence, ils touchent à l'identité même des individus, sans pour autant qu'on puisse en mesurer la portée, ce qui nous permet, nous dit Parfit, de moralement les ignorer :

« Very many of our choices will in fact have some effect on both the identities and the number of future people. But in most of these cases, because we cannot predict what the particular effects would be, these effects can be morally ignored. » (Parfit, 1984, §121)

Il n'en va pas de même de tous les choix que nous posons et Parfit en distingue trois catégories qu'il présente sous la forme d'un arbre de décision. Si nous comparons deux actes, quels qu'ils soient, la première question qui permet de les départager est la suivante : est-ce que toutes les mêmes personnes vivraient dans les deux cas ? Dans l'affirmative, les actes sont sans conséquence (option « *Same people choices* »). Dans la négative (option « *Different people choices* »), une autre question sert de critère de démarcation : Y aurait-il le même nombre de personnes vivant dans les deux cas (figure 7-1) ? Dans l'affirmative, le nombre de personnes vivantes ne varie pas d'une action à l'autre (option « *Same number choices* ») mais leur identité est modifiée. Dans la négative, non seulement le nombre de personnes vivantes a été affecté par le choix d'une action plutôt qu'une autre mais également leur identité (option « *Different number choices* »).

« Different number choices affect both the number and the identities of future people. Same number choices affect the identities of future people, but do not affect their number. Same people choices affect neither. » (Parfit, 1984, §120)

¹⁸⁰ Nous comprenons plutôt par « science », la société technologique au sens d'une société du risque de U. Beck (Beck, [1986] 2001).

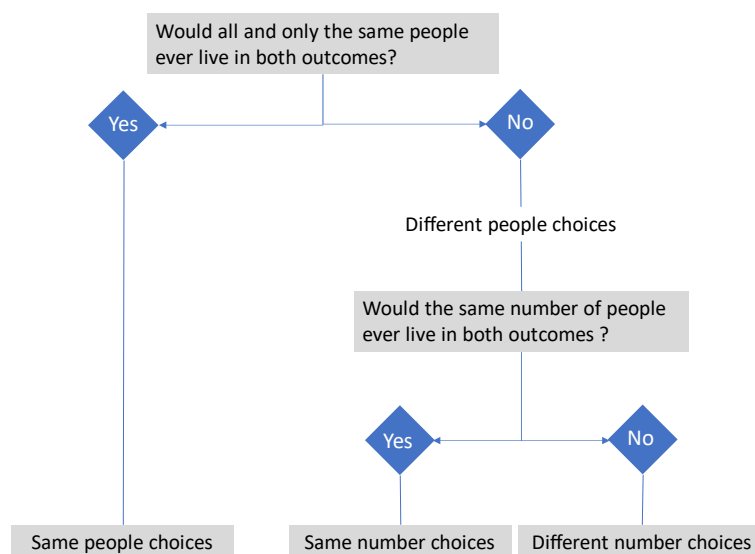


Figure 7-1 – Arbre de décisions dichotomique de Parfit, schématisant les trois résultats résultant des deux types de choix (d'après Parfit, 1984)

Le point de vue troublant de Parfit invite à se pencher sur la portée même insoupçonnée des actions posées. Peu d'entre elles répondent à l'option « *Same people choices* » et Parfit fournit l'exemple d'un morceau de verre que nous aurions maladroitement enterré dans un bois. Si un siècle plus tard, une fillette se blesse sur ce morceau de verre en jouant à cet endroit, dans quelle mesure en sommes-nous responsables ? Est-ce qu'il y a une différence morale liée au fait que cette fillette n'existait pas au moment où nous avons enterré le morceau de verre ni même au moment où nous, auteurs des faits, avons nous-mêmes disparu ? Or la plupart des principes moraux, nous dit Parfit, reposent sur l'idée de réciprocité. Par conséquent, si nous ne pouvons nous-mêmes subir de préjudice par cette fillette ni même récolter un quelconque bénéfice de ses actes, la blessure que nous lui infligeons néanmoins, à des années d'intervalle, n'aurait aucune conséquence morale... C'est ce principe moral fondé sur la réciprocité que Parfit conteste (Parfit, 1984). Nous constatons que cet argument de non-identité rend à ce point difficile l'adoption d'une politique particulière plutôt qu'une autre que l'intérêt porté aux générations futures se résume sans doute à un vœu pieux. Pour finir de s'en convaincre, examinons l'exemple sur le problème de non-identité, présenté par Gutwald et ses collègues : deux politiques énergétiques A et B sont à comparer. A entraîne l'épuisement des ressources

naturelles des générations futures alors que la politique B les préserve. Avant de conclure que l'option B est meilleure que l'option A, référons-nous à l'arbre de décision de Parfit. La politique A affecte l'existence et le nombre d'individus spécifiques futurs mais ceux-ci ne seraient pas venus au monde si cette politique n'avait pas été conduite. Pour peu que l'existence desdits individus ne soit pas complètement misérable et que l'on exclut l'idée selon laquelle l'existence constitue en elle-même un préjudice, il paraît difficile de considérer l'ensemble de ces individus comme victimes d'une politique sans laquelle ils n'auraient jamais vu le jour (Gutwald *et al.*, 2011). Ce raisonnement invite d'ailleurs à repenser certaines opinions populaires selon lesquelles « une telle génération aurait été sacrifiée sur l'autel de telle ou telle cause » si la politique attachée à ladite cause est celle-là même qui les a fait naître... Toutefois, ce raisonnement cache une faiblesse. Il n'y a pas *a priori* de raison de penser que les politiques A et B auraient engendré des populations entièrement différentes. Il paraît raisonnable de supposer qu'au moins certaines personnes seraient venues au monde de toute façon, indépendamment du choix d'une politique énergétique plutôt qu'une autre. Dans ce cas, il est bien possible de leur avoir porté préjudice en optant pour un choix plutôt qu'un autre, c'est en tout cas l'une des objections que formule Shrader-Frechette à l'encontre de l'argument de non-identité (Shrader-Frechette, 1994, p. 146).

Un autre argument usité afin de contester l'évidence d'un devoir envers les générations futures tient dans les relations ou plus exactement l'absence de relations que nous entretenons avec celles-ci. Selon MacLean, les relations effectives donnent lieu à des droits et des obligations mutuels en ce sens qu'elles créent des attentes ainsi qu'une compréhension implicite qui rend légitime des revendications à leur sujet (MacLean, 1984). Or de telles relations n'existent pas vis-à-vis des générations futures. Ces relations sont pour le moins déséquilibrées car unidirectionnelles et non réciproques (Partridge, 2001). Remarquons immédiatement que la réciprocité est ici envisagée de façon directe. En effet, dans ce cas de figure, les générations futures sont bien dans l'incapacité de rendre ce qui leur a été donné. En revanche, une notion de réciprocité indirecte peut être invoquée, mobilisant un tiers et créant ainsi une chaîne d'obligations. Selon cette réciprocité indirecte descendante, l'humanité obéit ainsi à deux maximes. La première justifie la transmission elle-même : la génération actuelle doit quelque chose

à la suivante parce qu'elle a elle-même reçu de la précédente. La deuxième est substantielle et délimite quantitativement la nature de ce qui doit être transmis : un capital au moins équivalent à celui reçu par la génération actuelle de la part de la génération antérieure (Gosseries, 2008b).

Dans la lignée des arguments touchant aux relations entretenues avec les générations futures, l'absence d'empathie et d'amour, élans qui supposent nécessairement un existant comme vis-à-vis¹⁸¹, pourrait justifier l'absence d'intérêt ou un intérêt décroissant vis-à-vis des générations futures. Comme le précise encore MacLean, si les gens ressentent spontanément un vif intérêt à l'égard de leurs enfants voire petits-enfants, celui-ci s'estompe rapidement à mesure que l'écart générationnel se creuse (MacLean, 1984). Même si nous ne souscrivons pas nécessairement à cette dernière observation, force est au moins de reconnaître que la postérité, qui renvoie dans l'imaginaire à un écart générationnel non nécessairement tangible, relève bien d'un concept abstrait qui regroupe un nombre de membres indifférenciés qu'il ne nous est pas possible d'appréhender en tant qu'individus. Or la théorie morale repose sur un principe de « respect des individus autonomes » (Partridge, 2001). Il y aurait donc moins d'inclination morale à l'égard d'un groupe d'humains inconnus qu'à l'encontre d'individus spécifiques. Remarquons que cette réflexion s'apparente à la distinction entre *autrui* - dont le premier visage est la vulnérabilité selon Lévinas - et *les autres* - en tant que collectif indifférencié, une distinction qui nourrit toute entreprise d'anthropologie philosophique (Dupuis, 2000). Remarquons qu'il s'agit bien d'une distinction et non d'une exclusion mutuelle : une éthique motivée par le souci des autres (e.g. éthique biomédicale) peut soutenir le soin à *autrui*, en tant que substantif concret fait de chair et d'os (de Unamuno, 1917). L'argument de défaut d'empathie ou d'amour pour justifier une indifférence à l'égard des générations futures, s'il est pertinent à l'échelle de l'individu, nous paraît bien faible dans une perspective relevant de la philosophie politique.

Dans une variante de la conception de la réciprocité évoquée précédemment, remarquons celle de l'avantage mutuel en tant que base

¹⁸¹ Nous écartons ici les inclinations spirituelles telles l'amour de Dieu, la dévotion, etc.

d'une théorie de la justice. Selon cette idée, chaque individu rationnel¹⁸² et qui agirait exclusivement dans son propre intérêt engagerait (néanmoins) une relation de coopération avec autrui et se plierait par conséquent aux règles sociales qui en découlent. Mais dans un contexte intergénérationnel, cette conception se heurte au problème de non-recouvrement des générations, c'est-à-dire leur absence d'*overlap*, même temporaire (Gosseries, 2008b). Le défi auquel cette conception se heurte est en réalité double : la mutualité entre générations n'est pas garantie et même si les bénéfices peuvent être bien réels, les contributeurs peuvent être très différents des bénéficiaires et il n'y aurait pas, dans ce cas, de règle commune de justice. En outre, il n'existerait aucune garantie que les conditions de coopération soient effectivement respectées de génération en génération, la menace de sanctions ascendantes ou descendantes paraissant peu crédible dans un tel contexte (Gosseries, 2008b, p. 65) à moins peut-être de s'appuyer sur des générations intermédiaires nous séparant des générations éloignées (Gosseries, 2008a, p. 447). Quoi qu'il en soit, cette difficulté peut être invoquée afin de nier ou renier tout engagement des générations actuelles envers les générations futures.

Enfin, mentionnons les critiques à l'encontre du devoir de protection des générations futures qui découlent de l'incertitude qui entoure celle-ci et qui, d'une certaine façon, sont une émanation de l'argument de non-existence par lequel nous avons débuté cette section. L'existence des dites générations constitue en effet la première des incertitudes, c'est donc un présupposé. Il en résulte, selon certains auteurs tels Callahan (1980) et Vetter (1970), que nos obligations à l'égard des générations futures seraient moindres que celles que nous avons à l'égard des générations présentes car les besoins des générations futures ne sont que conditionnels (Ouchene et Moroncini, 2016). Il ne s'agit non pas de nier toute obligation à l'égard des générations futures au prétexte de leur non-existence mais bien d'appliquer une sorte de rabais sur leurs droits comme ce que l'on désigne comme étant le *Social Discount Rate* (Parfit, 1984 ; Gosseries, 2008b), c'est-à-dire le taux d'actualisation social. Si l'on considère par exemple, une dévaluation du capital au fil du temps à raison de 5% annuel et que ce capital n'est autre que la vie humaine,

¹⁸² Bien que la rationalité ait largement retenu notre attention au cours de cette thèse, il ne nous a pas paru pertinent de la discuter dans ce contexte précis.

on obtient, en à peine trois siècles, une valeur de vie humaine qui ne vaut plus qu'un millionième de la vie humaine initiale. En d'autres termes, la vie humaine à l'instant t_0 est l'équivalent de 1 million de vies trois siècles plus tard, ce qui reviendrait à considérer les catastrophes futures comme moralement triviales¹⁸³. Pour Parfit, comme pour d'autres, cette conclusion (utilitariste) est inacceptable (Parfit, 1984), car nous ne pouvons généralement pas nous résoudre à appliquer une justice agrégative (comme l'utilitarisme) et que notre élan premier est celui d'une justice distributive (Gosseries, 2008b).

Nous venons de discuter quelques-unes des objections à la protection des générations futures en nous attardant sur la pertinence de protéger lesdites générations. Toutefois, l'objet de cette protection n'a pas été précisé : qu'entend-on finalement par générations futures et jusqu'où s'étend ce concept ? Cette question n'est pas triviale et elle n'est pas non plus sans conséquence dans la problématique à l'examen. Nous abordons la temporalité intrinsèque aux générations futures et ses enjeux dans la section suivante.

7.2.3 Générations futures proches et générations futures lointaines

Dans la discussion du droit des générations futures et plus particulièrement dans le lien ou l'absence de lien que ces dernières entretiennent avec les générations actuelles, une ambiguïté est apparue. Tantôt les auteurs envisagent une descendance directe (enfants, petits-enfants) pour illustrer un intérêt décroissant (MacLean, 1984), tantôt des générations très distantes pour interroger la moralité de nos actes à un horizon temporel inatteignable de notre vivant (Parfit, 1984). Il est d'ailleurs fort à parier que la large adhésion de la population à l'idée de préserver les générations futures s'explique en partie en raison de cette ambiguïté. Le devoir moral se ressentant à l'égard d'individus identifiables, il entraîne avec lui l'adhésion à un principe général de protection. A chaque citoyen du monde ressentant un lien de partage, d'empathie ou d'amour vis-à-vis de générations plus jeunes

¹⁸³ Cet exemple est inspiré de Parfit (Parfit, 1984) mais il est recalculé.

qui lui sont contemporaines, l'idée de prolonger cet élan dans le temps lui paraît sans doute naturel. Il faut cependant reconnaître que, personne ne se projetant ou projetant les conséquences de ses actes à plus d'un siècle, l'équité intergénérationnelle ressentie sur la base d'un sentiment du juste n'est que simplement extrapolée à un horizon plus lointain sans pour autant que la licéité de cette extrapolation ne soit remise en cause. La discussion critique autour de la protection des générations futures pourrait donc n'avoir qu'une portée académique si elle n'était pas, par ailleurs, directement au cœur de certaines décisions stratégiques et techniques. Dans la problématique de la gestion à long terme des déchets radioactifs et en particulier si ceux-ci sont à vie longue, la protection des générations futures est non seulement un principe de sûreté (IAEA, 2007) mais elle structure la stratégie de conception d'un stockage. Ainsi par exemple, la construction et l'exploitation (c'est-à-dire le remplissage) d'un stockage géologique s'étalent sur une période approximative de 80 à 100 ans (ONDRAF, 2017), ce qui recouvre trois à quatre générations¹⁸⁴ (De-Shalit, 1995, p. 138). Quant à la durée pertinente à considérer dans les évaluations de sûreté à long terme, elle est estimée à un million d'années (NEA, 2004a), ce qui recouvre entre 33 333 et 40 000 générations.

Pour mesurer l'enjeu plus concrètement, examinons la question de la récupération éventuelle des déchets une fois ceux-ci enfouis. En effet, la question de la récupérabilité¹⁸⁵ des déchets est très illustrative à cet égard. Bien que par définition, un stockage n'implique pas de récupération des déchets comme le rappelle la directive 2011/70/Euratom :

« Un dépôt de combustible usé ou de déchets radioactifs dans une installation, sans intention de retrait ultérieur. » (EC, 2011, art. 3 alinéa 3)

L'idée de pouvoir néanmoins récupérer les déchets pendant une période à définir a germé il y a vingtaine d'années déjà (IAEA, 2000 ; NEA, 2001 ; IAEA,

¹⁸⁴ Une génération pouvant s'estimer à environ 25 ans (Wikipédia : [https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9n%C3%A9ration_\(sciences_sociales\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9n%C3%A9ration_(sciences_sociales)) [Consulté le 18 janvier 2022] ; De-Shalit estime une génération à 30 ans (De-Shalit, 1995, p. 138).

¹⁸⁵ Il s'agit d'un terme consacré, distinct de la réversibilité (Depaus *et al.*, 2020).

2009c ; NEA, 2012b), au point que le législateur européen a dû l'envisager explicitement :

« A cette fin, la réversibilité et la récupérabilité en tant qu'éléments d'exploitation et de conception peuvent servir à orienter la mise au point technique d'un système de stockage. Toutefois, ces éléments ne pourraient remplacer une installation de stockage bien conçue et destinée à être fermée, le cas échéant. » (EC, 2011, préambule §23)

C'est de cette façon que les pays membres dont la Belgique ont été contraints de prendre position par rapport à cette modalité et à l'inscrire éventuellement¹⁸⁶ dans leur cadre législatif (M.B., 2014). La récupérabilité désigne la possibilité de récupération physique des déchets enfouis dans l'installation de stockage. Comme celle-ci est destinée à être totalement remblayée en fin de période opérationnelle et ensuite définitivement scellée afin de garantir la sûreté à long terme pour laquelle elle a été conçue, un compromis doit nécessairement être trouvé entre son but premier, la sûreté à long terme – qui implique une fermeture définitive aussi rapide que possible – et la capacité de retirer un ou plusieurs colis de déchets, pour diverses raisons¹⁸⁷, notamment en donnant suite à une volonté de recycler certaines matières déclarées initialement comme déchets mais que les progrès technologiques auraient éventuellement permis de réhabiliter en leur conférant une finalité plus noble. Dans ce cas de figure, il est impératif pour les concepteurs, les futurs gestionnaires et éventuellement les législateurs d'établir des conditions de validité pour le concept de

¹⁸⁶ Le « éventuellement » pourrait surprendre puisqu'il s'agit d'une directive européenne et que celle-ci doit être transposée en droit national. Remarquons simplement d'une part, le caractère conditionnel de la disposition européenne et d'autre part, le fait que celle-ci constitue un considérant de la directive et non un article. Si la non-transposition en droit national d'un article d'une directive européenne constitue une infraction, les considérants ne doivent pas nécessairement être transposés, ils précisent seulement l'esprit du législateur et reflètent en pratique, les réflexions des pays membres lors des réunions préparatoires.

¹⁸⁷ Nous excluons ici les raisons dites « de sûreté ». En effet, si un déchet doit être récupéré pour des raisons de sûreté pendant la phase opérationnelle, cela relève de la réversibilité opérationnelle, distincte de la récupérabilité bien que les acceptions de ces termes ne soient pas univoquement établies internationalement (Depaus *et al.*, 2020). Afin de ne pas compliquer la discussion, nous choisissons une récupération effectuée pour des raisons de changement de politique ou d'opinion au fil du temps et nous écartons les raisons impérieuses (pour lesquelles il n'y a pas de réelle polémique).

récupérabilité, en précisant, entre autres, une durée approximative au cours de laquelle la récupération des déchets sera envisageable¹⁸⁸.

Une autre question pratique permettant de prendre la mesure de l'enjeu d'un découpage temporel plus fin de la notion de « générations futures » réside dans le contrôle et la surveillance des installations de stockage (*monitoring*). Tant la récupérabilité que le monitoring sont prévus dans la loi belge du 3 juin 2014 transposant la directive 2011/70/Euratom (M.B., 2014) et celle-ci stipule que leurs modalités seront à préciser dans des politiques nationales.

L'élaboration de telles politiques ne peut faire l'économie d'une réflexion sur ce découpage temporel. Céline Kermisch a proposé une distinction entre générations futures proches et générations futures éloignées basée sur le concept de mémoire du stockage comme critère de démarcation (Kermisch, 2016b) en l'appliquant à trois options de gestion à long terme que nous avons par ailleurs préalablement investiguées et comparées : l'entreposage perpétuel, le stockage géologique non réversible et le stockage géologique réversible (Kermisch, 2016a ; Kermisch *et al.*, 2016).

« We define 'close future generations' as generations who still have memory of the waste and its location, and 'remote future generations' as generations who have lost its memory. Our concept of 'remote future generations' is thus distinguished from the concept of 'distant future', which sometimes refers to the 'the future with which people alive today will make no direct contact (...)' (Routley and Routley, 1978), even though these categories might be overlapping. » (Kermisch, 2016b)

L'introduction de cette distinction a permis de comparer les options de gestion à la lumière de la protection des générations futures et du respect de leur liberté de choix. Le maintien de la mémoire d'une installation de

¹⁸⁸ Notons qu'il est toujours possible de récupérer un déchet en sous-sol en recourant à l'excavation minière (*mining-out*). Mais il est d'usage de ne pas considérer cette option comme une solution de récupérabilité. Ainsi un exemple de disposition facilitant une récupération d'un déchet est l'utilisation d'un matériau de remblayage de galerie qui soit quelque peu friable de manière à pouvoir le retirer facilement à l'aide d'une machine à attaque ponctuelle, sans devoir recourir à des moyens d'excavation démesurés.

stockage, même s'il est hautement dépendant des choix politiques et des réglementations en vigueur, devrait être, semble-t-il, de minimum 500 ans (Kermisch, 2016b ; ASN, 2008)¹⁸⁹. Une fois cette distinction établie, l'étude conclut que les avantages habituellement avancés pour promouvoir le entreposage perpétuel ou le stockage géologique « réversible »¹⁹⁰ par opposition à un stockage « irréversible »¹⁹¹, y compris la possibilité de laisser aux générations futures une plus grande liberté de choisir d'autres options de gestion et la possibilité de procéder à un contrôle plus assidu de l'installation de stockage, ne valent en réalité que pour les générations futures proches. C'est un résultat essentiel sur lequel nous reviendrons lorsque les enjeux éthiques seront discutés autour de la question de l'optimisation du choix de la roche hôte, dans l'étude de cas (voir section 10.5).

7.3 Quelles notions de justice pour l'équité intergénérationnelle ?

Qu'il s'agisse des principes de sûreté ou des principes de la protection radiologique, il est apparu que le cadre moral d'interprétation de ceux-ci était construit autour de la protection des générations futures, ce qui a été exposé dans les sections précédentes. Mais l'AIEA et l'AEN ont très tôt dépassé la simple notion de « protection » en évoquant, dans leurs publications consacrées aux stockages géologiques, la question du respect de l'équité intergénérationnelle (IAEA, 1995 ; NEA, 1995). Nous y consacrons la présente section en parcourant les principales théories de la justice intergénérationnelle (Hansson, 2007 ; Gosseries, 2008c ; ONDRAF, 2020e) sans chercher à être exhaustifs :

¹⁸⁹ Les 500 ans constituent un minimum si des mesures pérennes de préservation de la mémoire sont adoptées lors de l'archivage et s'il existe une réglementation visant à préserver les documents institutionnels (ASN, 2008).

¹⁹⁰ « réversible » doit se comprendre ici par : possédant des dispositions techniques propices à la récupérabilité.

¹⁹¹ Un stockage ne disposant pas des dispositions de conception évoquées dans la note précédente.

- l'utilitarisme qui vise à maximiser l'utilité, classiquement considérée comme le bien-être collectif, faisant de cette théorie une approche agrégative ;
- la justice distributive dont il existe plusieurs modèles et qui, contrairement à l'utilitarisme, ne s'intéresse pas à la maximisation du bien-être agrégé mais à la juste répartition de celui-ci au sein de la société ;
- l'approche coopérative qui vise à ce que le bénéfice le plus grand revienne à celui qui a le plus contribué au bien social et ce, de façon proportionnelle à sa contribution.

7.3.1 L'utilitarisme comme approche agrégative

En tant que doctrine universaliste, l'utilitarisme s'intéresse aux préférences¹⁹² de tous les individus quel que soit leur âge, leur sexe, leur appartenance ethnique, etc. et s'étend au-delà des seules générations présentes. Nos actions peuvent influencer le sort, la taille et l'existence même des générations futures (Arnsperger et Van Parijs, 2003). Notons qu'il existe différentes formes d'utilitarisme (classique, moyen, à seuil, etc.) et que certaines d'entre elles se soucient indirectement de la distribution du bien social dès lors que celle-ci peut affecter le bien-être global. L'utilitarisme classique considère le bien-être collectif comme la somme des bien-être individuels dans une perspective transgénérationnelle. L'utilitarisme moyen interprète le bien-être collectif comme le niveau moyen de ce bien-être individuel. L'adoption de l'un ou l'autre de ces points de vue peut entraîner des conséquences très différentes. Si l'on suppose d'une part, une politique qui maintient le volume total de la population mondiale et son niveau moyen de bien-être et, d'autre part, une politique qui aura pour conséquence de tripler le volume de la population mondiale tout en réduisant le bien-être moyen par deux, l'utilitarisme classique choisira cette dernière option

¹⁹² La satisfaction de la somme totale des préférences est l'une des expressions modernes de l'utilité qui, à l'origine, était théorisée par Jérémy Bentham (1749-1832) et John Stuart Mill (1806-1873) comme la quantité totale de bonheur générée par les actions considérées (Hanson, 2007). L'objectif de l'utilitarisme étant de se soucier de poursuivre le plus grand bonheur du plus grand nombre (Arnsperger et Van Parijs, 2003).

puisque, l'un dans l'autre, le niveau agrégé de bien-être aura augmenté d'un facteur 1.5 par rapport à la première option. En revanche, l'utilitarisme moyen dont le bien-être individuel moyen est la boussole choisira la première option (Arnsperger et Van Parijs, 2003). Nous n'aborderons pas ici toutes les possibles nuances de l'utilitarisme bien qu'il nous faille être conscients que la perspective du seul utilitarisme classique risque de donner une vision incomplète de ce courant de pensée. Par exemple, avec l'utilitarisme classique, il suffit que le bénéfice net pour la société de l'emploi de l'énergie nucléaire soit positif en regard des charges engendrées par le démantèlement des centrales et la gestion des déchets pour que ce mode d'énergie ait été et soit toujours pleinement justifié. Dans le cas particulier de la gestion à long terme des déchets radioactifs, les évaluations de sûreté, de risques ainsi que les analyses coûts-bénéfices semblent avoir été conçues en réponse à une philosophie utilitariste (Cotton, 2005), même si de nombreuses critiques peuvent être formulées à son encontre. Nous aborderons d'ailleurs plus particulièrement la filiation utilitariste de la radioprotection à la section suivante (voir section 7.4). L'incertitude sur les conséquences constitue l'une des principales objections contre les décisions qui seraient prises au nom d'une évaluation coûts-bénéfices. Il est en effet hasardeux de spéculer sur les conséquences possibles de nos actions surtout lorsque celles-ci s'évaluent à l'échelle de plusieurs millénaires comme dans le cas de la gestion à long terme des déchets radioactifs. La deuxième objection de l'utilitarisme relevée par Cotton et que nous évoquions dans une section précédente (voir section 7.2.2) est le taux d'actualisation social (*Social Discount Rate*) qui valorise largement les générations actuelles par rapport aux hypothétiques générations futures. Selon Graham (1999), il s'agit d'un « crime statistique » impliquant intrinsèquement de considérer les vies futures comme ayant nécessairement moins de valeur que les nôtres (*in* Cotton, 2005). Toutefois, l'utilitarisme peut également être invoqué pour défendre la thèse inverse puisque sans le *social discount*, mais en gardant bien l'idée d'un capital pouvant fructifier avec le temps, il est tout à fait défendable de demander aux générations actuelles de ne pas consommer tout ce qu'elles ont hérité des générations précédentes afin de transmettre davantage aux générations futures. En effet, en donnant aux générations futures le capital que les générations présentes ont elles-mêmes constitué, augmenté d'une plus-value correspondant à ce qui a été épargné sur le capital hérité, le capital résultant est toujours croissant. Fidèle à sa vocation,

l'utilitarisme, en intégrant l'utilité – bonheur ou bien-être – sur l'ensemble des générations considérées, maximise celle-ci au fil du temps (Gosseries, 2008b ; Gosseries, 2008c). Nous remarquons cependant que ce raisonnement ne tient que s'il suppose que le futur n'est pas définitivement compromis et qu'il y aura suffisamment de générations futures pour valider a posteriori cette accumulation croissante de bien-être. Cette perspective d'utilité intégrée dans le temps ignore donc la perspective catastrophiste de Jonas ou Dupuy dont nous avons parlé précédemment (Jonas, [1979] 1995 ; Dupuy, 2002) qui, bien que projetant les conséquences de nos actes dans le futur, évalue en réalité ceux-ci à l'aune d'une préservation d'une vie authentiquement humaine sur terre (Jonas, [1979] 1995). C'est bien l'hypothèse implicite à laquelle l'utilitarisme devrait satisfaire et qui constitue l'objet d'analyse du catastrophisme. Cette hypothèse constituerait, dans cette perspective, une condition d'existence au raisonnement de l'utilité intégrée sur un futur infini¹⁹³.

Soulignons que le *social discount* ou rabais social¹⁹⁴ tant critiqué a précisément été introduit dans la perspective utilitariste afin d'éviter la dérive sacrificielle à laquelle la position que nous venons d'exposer pourrait mener si l'épargne de chaque génération n'était pas raisonnée (Gosseries, 2008b). En effet, si seule compte la quantité totale de bien-être, que la venue des générations futures tend à maximiser, les générations présentes auront tendance à se sacrifier. Ce sacrifice pourrait être d'autant plus important qu'interviennent d'autres facteurs indépendants comme l'altruisme intergénérationnel descendant (des parents vers les enfants) – altruisme asymétrique – qui vient renforcer, sur une base individuelle et volontaire, l'obligation utilitariste. Il s'agit en quelque sorte d'un catalyseur sacrificiel. Le sacrifice utilitariste pourrait frôler l'absurde si on lui applique un raisonnement de type « régression à l'infini ». En effet, chaque génération pouvant raisonner de façon similaire en se restreignant au bénéfice des générations suivantes. Dans l'hypothèse où les générations à venir sont en

¹⁹³ Futur que l'on supposerait volontiers infini dès lors que le raisonnement utilitariste d'intégration de l'utilité au fil du temps n'est pas *a priori* temporellement situé. Pour que ce raisonnement soit vrai à tout instant, nous pensons qu'il n'a pas de limites prédéfinies. Le temps s'écoule à l'infini et avec lui, la vie humaine. Or c'est bien cette hypothèse qui est remise en cause par le catastrophisme.

¹⁹⁴ Notre traduction.

nombre infini, il n'y aurait plus aucun bénéfice pour personne. C'est donc pour tenir compte de l'incertitude sur l'existence des générations futures, et dès lors éviter ce travers, que le *social discount* est utilisé¹⁹⁵.

En ce qui concerne ledit « rabais » opéré sur la valeur humaine au cours du temps, remarquons qu'il procède en fait du glissement que l'analyse économique opère ici à deux niveaux : d'une part, dans le cadre de la gestion à long terme des déchets radioactifs, l'extrapolation à des horizons temporels exagérés en regard des prémisses de cette analyse et, d'autre part, la correspondance argent-vie humaine, dont nous reparlerons plus spécifiquement et qui introduit la notion de *man-sievert* en protection radiologique (voir section 8.7). Toutefois, comme le précise Hansson, lorsque qu'un *social discount* est appliqué dans l'utilitarisme, il n'y a pas spéculation *directe* sur la valeur de la vie humaine. Il y a d'abord une correspondance établie entre la valeur d'une vie humaine aujourd'hui et la valeur de l'argent au même instant, ensuite un calcul de la dévaluation de l'argent au fil du temps, qu'on fait à nouveau correspondre, de façon biunivoque, à la valeur humaine au cours du même temps. Remarquons que le résultat porte évidemment sur la valeur d'une vie statistique dans le futur, à la suite de trois conversions, et non sur la valeur d'une vie humaine d'un individu identifié (Hansson, 2007). La première conversion, opérant la correspondance entre la vie humaine et une valeur monétaire, aussi choquante qu'elle soit au niveau individuel, est depuis toujours effectuée au niveau d'une politique collective dès lors qu'il s'agit d'évaluer si tel ou tel investissement destiné à « sauver des vies » est oui ou non rentable. Il s'agit d'un compromis entendu. La seconde conversion, visant à établir la correspondance entre la valeur de l'argent aujourd'hui et sa valeur à un instant *t* dans le futur, est une procédure économique standard. Bien que communément admise, cette opération possède une limite temporelle implicite bien en deçà de celle considérée par la radioprotection ou la gestion à long terme des déchets radioactifs. C'est le premier glissement, résultant de l'application d'un modèle au-delà des limites imposées par ses hypothèses, c'est-à-dire en

¹⁹⁵ Gosseries fait également remarquer que la décroissance de l'utilité marginale d'un bien – propriété selon laquelle l'augmentation d'utilité que procure une unité additionnelle de ce bien décroît (Van der Eycken et Capron, 1992) – contribue lui aussi à réduire la voilure sacrificielle de l'utilitarisme mais il ne s'agit là que d'un bémol (Gosseries, 2008b). Nous ne nous attardons pas sur ce point.

dehors de son domaine de validité ou domaine de confiance (Schmidt-Lainé et Pavé, 2008). Un tel glissement peut également résulter de la transposition du modèle à un domaine proche mais distinct du système originel pour lequel il a été développé, creusant ainsi l'écart entre propriétés réelles du système (et n'existant pas dans le modèle qui le représente) et propriétés formelles du modèle (qui n'existent pas dans le système qu'il représente) (Parocchia, 2000). En d'autres termes, ce glissement a lieu car il est supposé un isomorphisme entre le système et le modèle – établissant une correspondance d'un à un – alors qu'il n'y a en réalité qu'homomorphisme, modèle et système ne partageant qu'un ensemble de propriétés (Walliser, 1977 ; Moles, 1995). Le deuxième glissement vient de la troisième conversion, qui vise à (ré)établir une correspondance entre une vie future et la valeur calculée de l'argent au même instant. Il n'y a aucun fondement pour établir une telle correspondance car il n'y a aucun compromis socio-politique qui puisse le valider (Hansson, 2007). Comme le précise en outre Hansson, dans une perspective de développement durable, il n'y a aucune raison pour considérer un dommage environnemental futur différemment d'un dommage présent équivalent. Notons que le fait de ne pas considérer le futur différemment du présent est un point de vue partagé également par d'autres penseurs, non utilitaristes. Ainsi, John Rawls, s'inspirant de Sidgwick (Sidgwick, 1907), affirme qu'éviter une préférence intertemporelle est même une manifestation de la rationalité du sujet.

« Le simple fait pour quelque chose d'être situé différemment dans le temps (...) n'est pas en lui-même un motif pour lui accorder plus ou moins d'importance. » (Rawls, [1971] 2009, p. 333)

Il appert que ni l'éthique déontologique, fondée sur les droits fondamentaux individuels (Hansson, 2007), ni une éthique égalitaire ne sont conciliables avec l'utilitarisme, que ce dernier mobilise ou non le *social discount* (Cotton, 2005). En effet, il n'y aurait *a priori* pas plus de raison de dévaloriser la vie future que d'exiger des générations présentes qu'elles se serrent la ceinture au profit des générations futures.

7.3.2 L'approche libérale-égalitaire comme théorie de justice distributive

Dans la perspective d'une justice distributive libérale-égalitaire, dont John Rawls est la figure la plus emblématique, les deux principes de justice, celui d'égle liberté et celui d'égalité équitable des chances (comprenant le principe de différence) sont mis à rude épreuve pour appréhender les enjeux de la justice intergénérationnelle. Rawls stipule que l'application du principe de différence – visant à ce que les éventuelles inégalités sociales et économiques profitent aux plus désavantagés (Arnsperger et Van Parijs, 2003) – doit prendre en compte les perspectives des plus défavorisés jusqu'aux générations futures. Le minimum social atteint va dépendre de la manière dont la génération présente va se sentir liée aux revendications de ses successeurs. Chaque génération a le devoir de préserver les acquis de sa culture, de sa civilisation ainsi que les institutions justes qui ont été établies mais elle doit aussi mettre de côté une quantité suffisante de capital réel accumulé (Rawls, [1971] 2009, §44, p. 325). Avec cette épargne, on peut constituer ce minimum social vital, à condition que celle-ci soit engrangée selon un principe juste qui permette d'établir jusqu'où l'investissement doit monter sans grever les perspectives des plus désavantagés dans la génération actuelle. Les enjeux d'éthique intergénérationnelle sont donc traités par un modèle en deux phases, la première – assez courte – d'accumulation de ressources suivie immédiatement par une phase stationnaire ou *steady state* (Gosseries, 2008c). La phase d'accumulation pourrait s'apparenter à celle de la nécessaire (ou obligatoire) épargne dans l'approche utilitariste mais plutôt que de s'intéresser à la quantité agrégée de bien-être, celle-ci n'a pour seule ambition que de conférer la stabilité minimale nécessaire à la mise en place d'institutions justes. Toutefois, cette phase d'accumulation va à l'encontre de l'objectif égalitaire en ce qui concerne les plus démunis de la première génération qui sont pourtant, eux aussi, en dépit de leur indigence, contraints d'épargner (Gosseries, 2008b). Cette idée mettrait en échec le principe de différence que Rawls a établi comme principe d'équité intragénérationnelle et selon lequel le plus grand bénéfice devrait revenir aux plus désavantagés (ONDRAF, 2020e). Mais comme le rappelle Gosseries, Rawls est également *libéral*, dans un sens quelque peu différent de celui qu'on lui reconnaît aujourd'hui. Ainsi travailler

à l'amélioration de la situation des plus démunis ne peut se faire que dans le cadre d'une élaboration des *libertés* de base (l'intégrité physique, la liberté d'expression, etc.). L'objectif égalitaire est donc nié pendant un temps – le plus court possible – correspondant à la phase d'accumulation et ce, au nom de l'objectif *libéral* (Gosseries, 2008b).

Avant de poursuivre, nous souhaitons nuancer quelque peu cette explication en adoucissant l'opposition des positions libérale et égalitaire. Lorsque Rawls introduit la notion de voile d'ignorance, il est déjà bien conscient du problème soulevé par les générations futures, comme l'atteste l'extrait ci-dessous :

*« Comme les personnes placées dans la position originelle savent qu'elles sont contemporaines (...) elles peuvent favoriser leur propre génération en refusant tout sacrifice en faveur de leurs successeurs ; elles ne font que reconnaître le principe suivant lequel nul n'a le devoir d'économiser pour la postérité. Les générations précédentes ont économisé ou non, les partenaires actuels ne peuvent rien y faire maintenant. Ainsi dans ce cas, le voile d'ignorance ne réussit pas à garantir le résultat désiré. **C'est pourquoi pour traiter la question de la justice entre générations, je modifie l'hypothèse de la motivation et j'ajoute une contrainte supplémentaire** (§22). Grâce à ces modifications, aucune génération ne peut formuler des principes qui seraient délibérément conçus à son propre avantage et on peut en déduire des limitations importantes au principe de l'épargne (§44). Quelle que soit la position temporelle d'un individu, chacun est forcé de choisir pour tous. »* (Rawls, [1971] 2009, pp. 171-172, **nous soulignons**)

La contrainte supplémentaire que Rawls ajoute à l'hypothèse de la motivation s'explique de la façon suivante :

« La question se pose, cependant, de savoir si les personnes placées dans la position originelle ont des obligations et des devoirs vis-à-vis de tiers, par exemple de leurs descendants immédiats. L'affirmer serait une façon d'aborder et de traiter les questions de justice entre les générations. Cependant, le but de la théorie de la justice comme équité est d'essayer de déduire tous les devoirs et toutes les obligations de la justice à partir d'autres conditions raisonnables (...).

On peut aborder une hypothèse basée sur les motivations et supposer que les partenaires représentent une ligne continue de revendications (...). Par une combinaison adéquate de telles stipulations, je crois que la chaîne des générations, dans son ensemble, peut être unie et que toutes peuvent s'accorder sur des principes qui prennent en considération les intérêts de chacune. »
(Rawls, [1971] 2009, pp. 161-162, **nous soulignons**)

On voit que Rawls conteste l'idée selon laquelle le destin différent des générations est injuste puisqu'il résiderait une inégalité chronologique intrinsèque dans le fait que les successeurs profitent de l'héritage de leurs prédécesseurs. Selon Rawls, la question de la justice ne se pose pas en ces termes mais bien plutôt dans la manière dont les institutions réagissent aux limitations naturelles. Il faut que toutes les générations retirent un bénéfice et, pour ce faire, les partenaires doivent s'entendre sur un principe d'épargne juste. Ce principe de l'épargne juste doit se combiner, nous dit Rawls, avec les deux principes de justice¹⁹⁶. Le principe d'épargne doit être défini du point de vue des moins favorisés dans chaque génération. Le principe de différence s'en voit donc révisé par l'adjonction de la contrainte de la juste épargne :

« A cet effet, ils [les individus représentatifs du groupe le moins favorisé à travers les générations] soumettent à une contrainte l'application du principe de différence. A chaque génération, leurs attentes doivent être maximisées sous la contrainte que l'on a mis de côté l'épargne qui a été décidée. Ainsi l'énoncé du principe complet du principe de différence inclut comme contrainte le principe d'épargne. » (Rawls, [1971] 2009, p. 332)

L'épargne des moins favorisés ne consiste pas nécessairement de façon active au placement financier mais bien plutôt à « *l'approbation de l'organisation économique et sociale nécessaire à l'accumulation souhaitée* » (Rawls, [1971] 2009, p. 332). Nous ne voyons donc pas ici d'opposition réelle au sein de la doctrine rawlsienne entre les polarités libérale et égalitaire bien

¹⁹⁶ 1) Le principe d'égalité liberté 2a) le principe d'égalité équitable des chances et 2b) le principe de différence, en ordre lexical (Rawls, [1971] 2009, p. 157).

que nous reconnaissons le tour de force visant à maintenir la validité des principes de justice pendant la période d'accumulation.

Poursuivons. Dans la phase stationnaire qui suit la phase d'accumulation, Rawls défend l'idée qu'on ne peut transférer aux générations futures moins que ce qui a été hérité de la génération précédente, avec toutefois la possibilité de transférer davantage (Huteau et Larraufie, 2006 cité dans Kermisch, 2020). Gosseries fait cependant remarquer que transférer davantage devrait être tout autant prohibé dans une perspective égalitarienne (Gosseries, 2008c, p.173). En effet, transférer plus aux générations futures que ce qui a été hérité revient à priver la génération actuelle de richesses et, en particulier, les moins bien lotis d'une ressource qui servirait à améliorer leur condition. On pourrait penser qu'il s'agit ici d'opposer l'équité intragénérationnelle à l'équité intergénérationnelle mais Gosseries défend que ce soit uniquement au nom de cette dernière que cet argument peut et doit être justifié. En effet, si ce sont les plus désavantagés de chaque génération qui doivent bénéficier des meilleures conditions possibles, peu importe la génération à laquelle ils appartiennent (Gosseries, 2008b). Il en résulte la règle générale de ne transférer ni plus ni moins, aux générations futures, que ce qui a été hérité. On pourrait reconnaître certaines exceptions. En effet, si la dégradation de l'environnement fait craindre des jours très sombres aux générations futures, sans doute faudrait-il leur céder davantage de moyens afin qu'elles ne finissent pas plus désavantagées que nous ne le sommes. Comme le souligne Gosseries, même une perspective utilitariste permettrait d'envisager cette exception sur la base de l'utilité marginale décroissante d'un bien (Gosseries, 2008c)¹⁹⁷.

Il y a d'autres théories qui ne s'accommodent pas d'un surplus de transfert comme, par exemple, celles qui se fondent sur la réciprocité. Cet argument a déjà été abordé lors de l'analyse des objections aux devoirs envers les générations futures (voir section 7.2.2). Selon Gosseries, même l'argument de la réciprocité indirecte ne peut obliger les générations actuelles à transférer davantage aux générations futures que ce qu'elles ont hérité des

¹⁹⁷ Ce que nous comprenons du point de vue de Gosseries est que les unités additionnelles d'un même bien peuvent être transférées aux générations futures, en quantités suffisantes, sans grever les générations actuelles de ressources fondamentales.

générations précédentes (Gosseries, 2008c, p. 174). Rappelons que pour un égalitarien, les désavantages encourus par un groupe de gens en raison d'une infortune totalement indépendante de leurs choix ou de leurs actions doit être compensé par le reste de la société ou, plus encore, par ceux-là mêmes qui auraient posé des choix ayant engendré de telles conséquences. Dans une perspective intergénérationnelle, si nous étions capables de prévoir un terrible tremblement de terre qui n'affectera que les générations futures sans affecter les générations présentes, ces dernières devraient capitaliser dans leur épargne les moyens suffisants afin de permettre à leurs descendants de compenser les effets dévastateurs de cet événement (Gosseries, 2008b). Une telle générosité, nous dit Gosseries, ne pourrait pas se justifier selon l'argument de réciprocité indirecte et la théorie de la justice qui lui est associée même si, par nature comme nous le rappelle Kermisch, l'argument de réciprocité est égalitarien (ONDRAF, 2020e). En effet, la réciprocité implique une restitution ou l'octroi d'une compensation à celui qui a initialement donné (réciprocité directe) ou à l'intention d'un tiers (réciprocité indirecte)

« L'idée de réciprocité renvoie à la notion d'équivalence des prestations des parties à un échange. » (Gosseries, 2006)

L'argument de réciprocité se heurte donc à bon nombre d'objections. Tentons de les formaliser.

Dans un cadre intragénérationnel, la première d'entre elles pourrait être qu'il ne reflète pas toutes nos intuitions de justice. Si ce que nous devons à autrui dépend de ce qu'il peut directement ou indirectement nous donner en retour, il est fort probable que les égards et les soins que nous « devons » à des personnes polyhandicapées ne soient jamais « rétribués ». Faudrait-il en conclure que nous n'avons pas de devoirs à leur égard ? (Gosseries, 2006) Répondre par l'affirmative reviendrait à remettre en question le fondement même de nos institutions publiques qui veillent à l'application des droits premiers indépendamment de la capacité des bénéficiaires à contribuer ou non à la société. Ainsi, celui qui serait incapable de contribuer utilement au

« surplus » n'aurait pas droit ne serait-ce qu'aux droits sociaux les plus élémentaires même dans une société d'abondance (Buchanan A., 1990)¹⁹⁸.

L'autre objection est dans un cadre intergénérationnel cette fois. Elle réside dans le problème posé par la première génération. La maxime de justification de l'argument de réciprocité – selon laquelle la génération présente doit quelque chose à la suivante parce qu'elle a reçu de la précédente – se voit battue en brèche car elle est inapplicable à la génération originelle, à moins de reconnaître des obligations envers la mort ou le néant. Même sans orienter notre discours vers la métaphysique¹⁹⁹, le problème posé par la première génération est d'application à chaque fois qu'une génération invente ou découvre de nouveaux biens. La génération qui découvre ces nouveaux biens est « première » et n'a pas reçu d'équivalent de la génération précédente. Si l'on considère la maxime substantive de l'argument de réciprocité²⁰⁰ selon laquelle il faut laisser aux suivants un capital au moins équivalent à celui reçu de nos aïeux, d'autres difficultés pratiques se posent. La plus évidente d'entre elles est sans doute celle soulevée par la croissance démographique (Gosseries, 2006). Que signifie alors transmettre un capital au moins équivalent ? Cette question, nous pouvons nous la poser deux fois. D'abord dans le sens où l'entend sans doute Gosseries : avec une démographie croissante (et dont l'évaluation est incertaine), il nous faudrait appliquer un taux d'actualisation au capital à transférer en vue d'établir un héritage équivalent. De ce fait, ce qui devrait être déboursé pour une génération future plus peuplée risque fort d'être supérieur à ce que la génération actuelle débourserait pour une réplique d'elle-même. Gosseries le reconnaît lui-même, il ne préjuge pas de « la métrique à adopter » lorsqu'il entreprend l'analyse de la théorie de la

¹⁹⁸ Il nous faut toutefois nuancer ce propos. Certains auteurs défendent une théorie de justice distributive fondée sur les avantages mutuels en incluant les personnes lourdement handicapées, non pas en tant qu'exception à la théorie au nom de droits relatifs à la dignité humaine, mais bien en tant qu'élément de l'équation. Il s'agit notamment d'inclure de façon explicite les soignants qui se dévouent à cette cause et dont celle-ci leur procure un élément de stabilité dans leur existence (Becker, 2005).

¹⁹⁹ Ce qui rendrait le propos difficilement universalisable au point de vue de l'éthique.

²⁰⁰ Pour rappel, la réciprocité descendante indirecte peut se caractériser par deux maximes. La première est justificative : la génération actuelle doit quelque chose à la suivante parce qu'elle a reçu quelque chose de la précédente. La deuxième est une maxime substantive : la génération actuelle doit passer à la suivante un capital au moins équivalent à celui hérité de la génération précédente (Gosseries, 2008b).

réciprocité (Gosseries, 2006)²⁰¹. Ensuite, nous posons la question une deuxième fois en un sens qui nous est propre, ce qui nous permet de revenir sur la question que nous avons tantôt suspendue : en quoi la théorie de la réciprocité ne pourrait pas permettre de transférer plus aux générations futures ?

Si la maxime substantive de l'argument de réciprocité est de transmettre un capital « **au moins équivalent** » (Gosseries, 2008b), nous ne comprenons pas pourquoi *a priori* une « *vision basée sur la réciprocité serait totalement incapable de transférer **plus** que ce qui a été hérité*²⁰² » (Gosseries, 2008c, p. 174, **nous soulignons**). Nous y voyons une contradiction logique. Gosseries lui-même, par d'autres travaux, nous aide à lever cette contradiction (sans la nommer) en considérant le caractère « multilatéral et ouvert » du contexte intergénérationnel.

Regardons de plus près le premier aspect, celui de la multilatéralité. Dans une perspective bilatérale et intergénérationnelle, nul n'est censé être un contributeur net ou un bénéficiaire net. Il s'agit de l'équivalence des prestations effectuées par les parties à un échange dont il résulte l'absence de transfert net. Mais dans un contexte multilatéral, impliquant plusieurs individus, les relations ne doivent plus se considérer deux à deux et une génération peut avoir opéré un transfert net vers la suivante tout en ayant bénéficié d'un transfert net de la précédente.

L'autre aspect est celui d'ouverture vers le futur. Dans un contexte fermé, fût-il multilatéral, nul ne pourrait être un contributeur net sans forcer autrui à être un bénéficiaire net. Or l'ouverture vers le futur permet le report du bénéfice net sur la génération suivante. Ainsi :

²⁰¹ « Nous ne préjugeons pas ici de la métrique à adopter. Lorsque l'on parle de réciproquer l'équivalent, il faut se demander à chaque fois « l'équivalent en quels termes ? » (de valeur monétaire à un temps t, de bien-être dans le chef du bénéficiaire, de potentiel de bien-être,...). La réponse à cette question est laissée en suspens dans le présent travail. Il est évident néanmoins qu'elle est d'une importance cruciale, en particulier dans les cas de changements des préférences des personnes, d'une génération à l'autre » (Gosseries, 2006, p. 2).

²⁰² Nous traduisons et nous soulignons.

« La règle de réciprocité n'est pas incompatible avec l'idée de transférer plus que l'équivalent de ce que l'on a reçu de la génération précédente à la génération suivante. » (Gosseries, 2006, p. 3)

Nous pensons que la première conclusion de Gosseries (résultant pourtant de travaux postérieurs) résulte d'une lecture plus stricte de l'argument de réciprocité. En effet, dans une perspective intragénérationnelle, les plus nantis ne vont pas accepter de redistribuer leurs biens aux plus démunis. L'idéal de justice de la réciprocité ne comporte pas de *maximin*, à l'inverse de la théorie égalitariste. Si la perspective intergénérationnelle peut changer la donne, en faisant évoluer la théorie de la réciprocité vers une justice plus distributive, ce n'est pas seulement en raison d'un caractère multilatéral et ouvert de la perspective intergénérationnelle mais aussi en raison d'hypothèses de nature sociologique. L'une d'entre elles revient à considérer l'héritage dont nous gratifie la génération précédente non plus comme « *une source d'obligation, mais aussi comme une source d'inspiration, dans le cadre d'une recherche de repères sur ce que nous devons à la génération suivante, une génération qui (...) n'a rien fait pour nous* » (Gosseries, 2006).

En réalité, les différents modèles fondés sur la réciprocité intergénérationnelle (ascendante, descendante ou double) sont assez robustes à l'égard des objections qu'on peut *a priori* formuler à leur rencontre. Cependant, le modèle de la réciprocité descendante indirecte, qui intéresse au premier chef la question de la gestion des déchets radioactifs, n'est pas démo-sensible²⁰³. La croissance démographique peut conduire une génération à laisser la suivante dans une situation individuelle plus défavorable. En effet, ce modèle de réciprocité n'oblige aucunement un individu à doubler – par exemple – son panier de biens à transférer à la génération suivante au prétexte que celle-ci sera constituée du double d'individus. L'égalitarisme est, quant à lui, directement démo-sensible

²⁰³ Pour l'argumentation des autres modèles de réciprocité (ascendante et double), nous renvoyons à la lecture de l'analyse d'Axel Gosseries, « Dette générationnelle et conceptions de la réciprocité » (Gosseries, 2006). On y montre notamment la démo-sensibilité de la double réciprocité mais non sans que celle-ci pose des difficultés. Nous n'avons pas voulu traiter ces variantes de la réciprocité car elles servent assez peu notre question de recherche.

(Gosseries, 2006, p. 15), ce qui fait globalement préférer ce modèle de justice sociale dans un contexte intergénérationnel.

7.3.3 Quelques autres théories de justice distributive

Les autres théories de justice distributive ont pour point commun de s'appuyer sur les travaux de Rawls et sa *Théorie de la justice*, en remplaçant les « *biens premiers* » (Rawls, [1971]2009) par des capacités (Amartya Sen), par des opportunités que l'on veut égales (Brian Barry) ou encore par des besoins de base minimaux (suffisantisme²⁰⁴), etc. (Arnsperger et Van Parijs, 2003 ; Gosseries, 2008b ; Gosseries, 2008c ; ONDRAF, 2020e). Nous les abordons brièvement ici.

- Le prix Nobel d'économie Amartya Sen pense la justice comme égalité des capacités fondamentales. Il critique la notion de biens premiers avancée par Rawls car elle néglige la capacité de transformer ces biens en fonctionnement. Le cas des personnes souffrant de handicaps invite en effet à penser plutôt en termes d'ensembles de capacités (*capabilities*) constitués de la « *liste des degrés auxquels la personne est capable de réaliser les divers fonctionnements* » (Arnsperger et Van Parijs, 2003). Ce que Sen vise, ce n'est pas l'égalité de toutes les capacités entre les humains, ce serait absurde, mais bien de s'assurer que tous disposent de capacités fondamentales telles que se nourrir, se mouvoir, fonder une famille, etc. qui peuvent se réaliser selon des modalités très différentes en fonction des contextes socio-culturels. Dans une perspective intergénérationnelle, les générations précédentes se doivent d'agir de façon à ne pas hypothéquer la possibilité pour les suivantes de jouir d'un niveau de capacités équivalent aux leurs. Il en résulte une obligation de maintenir ces capacités pour un avenir indéfini et en dépit du fait que nous ignorons tout des préférences des générations futures. Mais lorsqu'il est question d'obligations de type environnemental, ces capacités²⁰⁵ doivent *in fine* être à nouveau

²⁰⁴ Cette traduction en français du « *sufficientarianism* » est notamment proposée par Axel Gosseries (Gosseries, 2011).

²⁰⁵ Traduction en français de *capabilities*.

traduites en termes de ressources, ce qui rapproche la vision de Sen de celle des biens premiers de Rawls (ONDRAF, 2020e).

- Brian Barry s'inspire également de Rawls mais développe une métrique naturellement orientée vers le futur et basée sur la durabilité (Kermisch et Taebi, 2017). Selon Barry, la caractéristique fondamentale de l'être humain est son habilité à concevoir sa propre vision de la vie bonne et ce qui doit donc être préservé, c'est l'opportunité pour les générations futures de vivre une vie bonne, selon leur propre conception. Dans une perspective intergénérationnelle, en dépit des incertitudes qui pèsent sur la détermination de ce qui serait une vie bonne dans le futur, il paraît évident que l'accès à l'eau potable, à une alimentation adéquate, aux soins de santé, au logement, etc. doivent être garantis. Barry les nomme « intérêts vitaux » et considère que ceux des générations futures ont une priorité égale à ceux des générations actuelles (Barry, 1997). Maintenir les opportunités de mener une vie bonne est une idée proche de celle de Sen qui défend le maintien des capacités des générations futures à mener une vie bonne sauf que ce sont aux générations futures à déterminer quelles seraient ces capacités (ONDRAF, 2020e). Barry définit également deux principes comme guides de pensée en termes de justice distributive, celui des intérêts vitaux et un principe de responsabilité, sans d'ailleurs établir une priorité *a priori* entre ceux-ci :

« I have not specified priority relations among the principles, and I do not think this can be done across the board. The principles are guides to thinking, not a piece of machinery that can be cranked to grind out conclusions. » (Barry, 1997)

Le principe de responsabilité, selon Barry, établit que :

« The obverse of the principle is that bad outcomes for which somebody is not responsible provide a prima-facie case for compensation. » (Barry, 1997)

Barry en déduit que les générations futures ne doivent pas être moins bien nanties que les générations actuelles et aucune génération ne devrait être tenue pour responsable de l'état de la planète dont elle hérite. Notons que la question de la croissance démographique préoccupe également Barry puisqu'il paraît périlleux de maintenir le

même niveau de X (entendu comme l'opportunité de vivre une vie bonne selon sa propre conception de la vie bonne) par individu si la population croît de façon exponentielle. Barry s'attaque en ces termes à ce qui constitue sans doute un tabou aujourd'hui, le contrôle des naissances :

« We must define intergenerational justice on the assumption that 'the increase of mankind shall be under the guidance of judicious foresight'. » (Barry, 1997)

Et il ajoute que la croissance démographique, si elle a lieu, doit être à la charge de la génération qui l'autorise :

« If future people choose to let population increase, or by default permit it to increase, that is to be at their own cost. There is no reason in justice for our having any obligation to accommodate their profligacy. » (Barry, 1997)

Mais la durabilité (*sustainability*) qui se définit comme la condition nécessaire de la justice intergénérationnelle implique que le maintien du X ne peut s'envisager qu'à taille égale de population :

« Sustainability requires at any point in time that the value of some X per head of population should be capable of being maintained into the indefinite future, on the assumption that the size of the future population is no greater than the size of the present population. » (Barry, 1997)

Le maintien de X doit donc être compris comme une notion d'égale opportunité (égalité des chances) à maintenir au fil des générations. Sur le plan de la gestion des ressources naturelles, il s'agit de compenser ce qui aura été épuisé (Taebi, 2011)

- Pour le suffisantisme, ce n'est pas tant la distribution égale des biens entre tous qui constitue le point d'orgue mais bien le fait de s'assurer que chacun dispose du minimum suffisant pour couvrir ses besoins de base.

Savoir ce qui constitue ce qui est « suffisant » et savoir si ce qui est suffisant est assez (*« is sufficiency enough? »*) sont les questions inévitables auxquels les différents courants du suffisantisme (i.e. Pinchot, 1910 ; Brundtland, 1987 ; WCED, 1987 ; Daly, 1996 ; Nussbaum,

2006 ; Nussbaum, 2007) – auquel on rattache parfois (Amartya Sen, 2014) – tentent de répondre (Gosseries, 2016 ; ONDRAF, 2020e).

Notons d'emblée que dans une perspective intergénérationnelle, le suffisantisme est peut-être la seule théorie de justice sociale non cléronomique²⁰⁶ puisqu'elle ne définit pas le seuil de biens des générations futures en fonction de ce que les générations présentes leur doivent mais bien de façon absolue, indépendamment de tout héritage. Le rapport Brundtland retient notre attention pour avoir défini la notion de développement durable (*sustainability*) comme une articulation entre les générations et leurs besoins :

« Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs. » (WCED, 1987: 41)

Les besoins y sont définis en particulier, comme les besoins essentiels (« *essential needs* ») ou encore besoins de base (« *basic needs* »). Le lien avec le suffisantisme est éloquent (Gosseries, 2005 ; Kermisch, 2020). Comme le fait remarquer Gosseries, le suffisantisme du rapport Brundtland permet à la génération actuelle de transférer moins que ce dont elle a hérité à condition que la génération future soit capable de couvrir ses besoins de base ou, à l'inverse, transférer plus, mais à condition de ne pas mettre en péril sa propre capacité à couvrir ses besoins de base (Gosseries, 2008c)²⁰⁷.

La notion de développement durable siège au cœur de la mission d'intérêt public de l'ONDRAF²⁰⁸, nous y reviendrons.

²⁰⁶ « Cléronomique » signifie « Régulé par héritage » en grec (Gosseries, 2016)

²⁰⁷ Il s'agit d'une position que cet auteur a abondamment critiquée par ailleurs en avançant des arguments « anti-croissance » (Gosseries, 2005 ; Gosseries, 2008b)

²⁰⁸ Tel qu'il le définit dans sa Charte : <https://www.ondraf.be/declaration-strategique> (ONDRAF, 2020d).

7.3.4 L'approche coopérative (ou commutative)

Contrairement aux théories de justice distributive précédemment évoquées, selon lesquelles la rétribution par la société est indépendante de la contribution individuelle de chacun, l'approche coopérative défend une position selon laquelle le bénéfice reçu de la coopération sociale est proportionnel et au moins égal à notre contribution. Dans cette perspective, il n'y a pas de possibilité de corriger les inégalités frappant initialement les différents contributeurs pas plus qu'il n'y a moyen de procéder à des transferts positifs nets au bénéfice des autres (Gosseries, 2008c).

Dans la perspective de justice intergénérationnelle qui nous intéresse ici, cette théorie s'apparente à l'argument de réciprocité indirecte selon lequel l'obligation de devoir quelque chose aux générations futures ne vient pas du souci de s'assurer que celles-ci ne seront pas moins avantagées que ne l'a été la génération actuelle mais repose sur le fait d'avoir une dette vis-à-vis de la génération précédente. Ne pouvant restituer ce qui est dû à la génération qui l'en a gratifié, la génération actuelle est contrainte de payer cette dette à la suivante (Gosseries, 2008b ; Gosseries, 2008c).

7.4 Fondements éthiques des trois principes de la protection radiologique²⁰⁹

Les trois principes de radioprotection ont lentement évolué vers leur forme actuelle, reflétant au fil du temps les changements sous-jacents sur le plan éthique. En outre, ils peuvent être interprétés, au moins depuis 1998, dans le cadre défini par la CIPR-81 concernant la protection des générations futures :

« Individuals and populations in the future should be afforded at least the same level of protection as the current generation. » (ICRP, 1998)

Ce cadre est conforme à la Convention commune (IAEA, 1997) et repose clairement sur le principe de la justice distributive qui, comme nous l'avons

²⁰⁹ Cette section s'inspire de nos précédents travaux (ONDRAF, 2017a), les enrichit et les replace dans la perspective de notre question de recherche.

vu dans la section précédente, sous-tend le principe de la durabilité. La protection radiologique, en particulier lorsqu'il s'agit de déchets radioactifs, s'inscrit donc dans un contexte de justice et de développement durable, dans lequel les besoins et les possibilités des générations futures sont pleinement reconnus.

Après avoir discuté les fondements éthiques de la protection des générations futures et avoir passé en revue les principales théories de justice sociale pertinentes pour l'équité intergénérationnelle, nous pouvons à présent nous intéresser plus particulièrement aux fondements éthiques de chacun de ces trois principes. C'est le propos de la présente section.

7.4.1 Optimisation, limites de doses et principe ALARA

Les fondements éthiques et philosophiques du principe d'optimisation remontent au concept le plus emblématique de la radioprotection : le principe ALARA. Selon ce principe, l'ampleur des doses ou des risques individuels et le nombre de personnes exposées aux rayonnements doivent être maintenus au niveau le plus bas qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre, compte tenu des facteurs sociaux et économiques (Wikman-Svahn, 2008 ; ICRP, 2018). Conformément au principe ALARA, les améliorations apportées à un concept de stockage géologique doivent être fondées sur des évaluations de doses ou de risques, qui peuvent être utilisées pour étayer une analyse coûts-avantages.

Le principe ALARA, qui se réfère à la protection radiologique, est parfois considéré, dans le contexte du stockage géologique, comme un des aspects du principe d'optimisation entendu en un sens plus large et qui engloberait de nombreux autres types de protection (par exemple, contre les risques chimiques, les risques opérationnels, etc.). En revanche, selon la formulation utilisée par la CIPR en 1977, le principe ALARA et le principe d'optimisation sont essentiellement synonymes, l'optimisation consistant à appliquer le principe ALARA en dessous des contraintes de dose :

« The principle of optimisation is defined by the Commission as the source related process to keep the magnitude of individual doses, the

number of people exposed, and the likelihood of potential exposure as low as reasonably achievable below the appropriate doses constraints, with economic and social factors being taken into account. » (ICRP, 2006)

Cette définition du principe d'optimisation est très inclusive puisqu'elle incorpore à la fois le principe ALARA et le principe de limites de doses, bien que l'optimisation et les limites de dose constituent des principes distincts. En réalité, il s'agit de définir le domaine d'application de l'optimisation et le principe des limites de doses en donne l'une des frontières.

7.4.2 Du groupe critique à la personne représentative

L'origine et l'interprétation du principe ALARA méritent également d'être discutées.

L'origine du principe ALARA peut être attribuée à l'éthique utilitariste qui tend à maximiser le bonheur ou le bien-être total d'un groupe (ICRP, 2018, A10 ; Wikman-Svahn, 2008 ; Hansson, 2007). Il en résulte que dans le contexte de la gestion des déchets, la modification d'un système de stockage qui aurait pour effet d'augmenter l'exposition de quelques personnes, mais de réduire la dose collective totale pour l'ensemble de la population, serait considérée comme une amélioration et donc une étape vers l'optimisation. Cette pondération collective s'oppose à une approche centrée sur l'individu qui relèverait, elle, davantage de l'éthique déontologique (Hansson, 2007). Toutefois, depuis quelques années, certaines nuances ont été introduites dans l'application coûts-bénéfices de l'utilitarisme en radioprotection.

Les premières applications du principe ALARA utilisaient le concept de groupe critique, défini comme un groupe représentatif des individus d'une population qui reçoivent les doses les plus élevées. Lors de l'application de la notion de groupe critique, l'attention se concentrait normalement sur un membre moyen de ce groupe. Comme l'indiquait la CIPR:

« The critical group was introduced into waste management to allow individual doses delivered by a source to be assessed without the implied need to identify each individual separately. » (ICRP, 1997)

Le concept de groupe critique, et de membre moyen au sein de ce groupe, était en cohérence avec la perspective utilitariste puisqu'il mettait l'accent sur le bien-être collectif plutôt que sur le bien-être des individus les plus exposés.

Des applications plus récentes du principe ALARA, en revanche, ont introduit le concept de « personne représentative », remplaçant la notion de membre moyen du groupe critique. La « personne représentative » est en effet définie comme :

« An individual receiving a dose that is representative of the more highly exposed individuals in the population. » (ICRP, 2007)

L'attention se concentre donc plus qu'auparavant sur les individus les plus vulnérables et les plus exposés d'une population, plutôt que sur le bien-être collectif d'un groupe d'individus. La nuance est subtile et demande un peu de réflexion. Nous l'explicitons. Lorsqu'il est question de groupe critique, ce groupe est choisi comme celui qui serait exposé aux doses les plus élevées. Ce choix de vulnérabilité collective n'a rien à voir avec la recherche d'un *maximin* rawlsien, il résulte d'une approche conservatrice basée sur le choix de la cible la plus sensible. Il vise donc à regarder le maillon faible, l'élément le plus critique. Dans l'approche utilisant la personne représentative au sein d'une population, c'est bien la personne représentant les personnes les plus exposées qui guide l'application du principe ALARA. Plutôt que se fonder sur des moyennes, l'approche de la personne représentative se fonde sur des valeurs issues de distributions statistiques (Ferreira *et al.*, 2013). En d'autres termes, le groupe critique doit être représentatif de la population recevant la plus haute dose dans une situation donnée. Cependant, ce groupe se doit d'être homogène en âge, en régime alimentaire et en habitudes de vie. Il n'est donc pas constitué d'individus qui seraient les plus exposés en raison

d'habitudes de vie extrêmes par exemple²¹⁰. La dose reçue par le groupe critique est une valeur unique fondée sur des données conservatives et moyennes. En revanche, dans le cas de la personne représentative, les habitudes de vie extrêmes sont considérées ainsi que les possibilités de changements futurs. Les données utilisées pour établir la ou les doses reçues par la personne représentative ne sont pas des moyennes mais se présentent sous la forme de distributions. Ces données peuvent être analysées par une méthode déterministe ou par une méthode probabiliste. Dans le cas d'une analyse déterministe, une valeur unique de dose est fournie. Pour une analyse probabiliste, les données sont utilisées sous la forme de distributions de probabilités et le résultat est une distribution qui représente un intervalle de doses assorti d'une probabilité d'occurrence (ICRP, 2006 ; Ferreira *et al.*, 2013).

En pratique, l'usage de la méthode de la personne représentative préconisée par la publication 101 de la CIPR (ICRP, 2006) se montre plus exigeant que l'ancienne méthode du groupe critique car elle requiert des informations *détaillées* sur les habitudes de *tous* les individus appartenant à *tous* les groupes possibles exposés plutôt que la connaissance des habitudes *moyennes* d'un groupe potentiellement plus exposé (Ferreira *et al.*, 2013)²¹¹.

Il y a donc eu un changement de raisonnement éthique, davantage axé sur les droits des individus et l'éthique déontologique – un changement reconnu par la CIPR elle-même (ICRP, 2018, A7, A11). Ce changement reflète une volonté de mieux se conformer aux principes de justice et de dignité, valeurs

²¹⁰ Les habitudes des individus jouent un rôle primordial dans l'évaluation de la dose totale reçue. Dans le cas d'une contamination, un individu vivant en autarcie au voisinage du panache contaminant et buvant l'eau de son puits, mangeant les fruits de son jardin, buvant le lait de ses vaches et mangeant les œufs de ses poules sera potentiellement plus contaminé qu'un individu de même âge et de même sexe n'ayant ingéré que des légumes contaminés par exemple.

²¹¹ L'étude de Ferreira montre d'ailleurs qu'en appliquant une méthode déterministe d'analyse à l'approche de la personne représentative, on obtient une dose plus élevée d'un facteur oscillant entre 1.5 et 1.9 (selon les groupes d'âge) par rapport à l'approche du groupe critique (Ferreira *et al.*, 2013). Notons cependant que l'analyse probabiliste permet de relativiser ce constat et tend en général à gommer les excès ou accumulations de conservatisme qui pénalisent parfois les méthodes déterministes. Quoi qu'il en soit, ce qui nous intéresse ici n'est pas tant l'efficacité ou la précision d'une méthode sur l'autre mais bien le cheminement d'ordre éthique qui est à l'origine de ce changement.

reconnues par la CIPR comme valeurs fondamentales dans le système de radioprotection (ICRP, 2018). Notons que ce mouvement correcteur entrepris par la CIPR afin de corriger la prédominance de l'analyse coût-bénéfices et l'éthique utilitariste s'est faite au prix d'autres erreurs et difficultés (Shrader-Frechette et Persson, 2002) comme nous le montrons ci-après.

7.4.3 Origine et critique du principe des limites de doses

7.4.3.1 *Effets stochastiques des rayonnements et origine du principe de limites de doses*

Rappelons que ce que l'on désigne par les effets stochastiques des rayonnements sont les effets délétères non déterministes de l'exposition radiologique sur le corps humain. Leur découverte remonte aux années 1940. Avant cela, seuls les effets déterministes avaient pu être observés. A la différence des effets stochastiques, les effets déterministes se produisent toujours et se présentent par exemple, sous la forme d'érythème, de nécrose tissulaire ou encore de cataracte à des hautes expositions aux rayonnements. Ces effets engagent bien souvent le pronostic vital du sujet exposé dès que l'exposition de celui-ci atteint quelques grays²¹² (voir section 2.2.1). Les expositions à des faibles doses sont plus insidieuses et il n'a jamais vraiment été possible de définir un seuil de dangerosité. Les effets sur l'homme, de même que sur toute espèce vivante, étant une altération possible du code génétique, peuvent être très différents en nature. Ils peuvent aussi ne pas se produire du tout. Les conséquences sur l'organisme dépendront en réalité de la capacité de l'ADN exposé à se « réparer » et surtout de la qualité de cette réparation. Les effets stochastiques sont ceux pour lesquels la probabilité d'apparition, mais pas leur gravité, est fonction de la dose reçue.

²¹² Si les rayonnements, électromagnétiques ou particuliers, cèdent totalement ou partiellement, leur énergie à la matière traversée, celle-ci subit des modifications. La dose absorbée est définie comme la quantité d'énergie absorbée par unité de masse de matière irradiée. Cette grandeur s'exprime en gray (Gy) où $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ (Joule par kilo). Pour info, $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$. Le débit de dose est la dose délivrée par unité de temps, elle est exprimée en Gy/s.

En d'autres termes, il existe une relation de corrélation entre les effets stochastiques et l'intensité de la dose reçue. On peut dire que le risque (qui est une fonction de la probabilité d'occurrence et de l'ampleur des effets délétères) augmente avec la dose puisque l'une des composantes du risque, la probabilité, est directement liée à la dose. Il n'existe cependant pas de relation établie entre la sévérité de ces effets et la dose reçue.

Pour rappel, le potentiel carcinogène de l'exposition est proportionnel à la dose, selon le modèle LNT²¹³ utilisé en radioprotection dans l'évaluation des risques de cancers (Hansson, 2011) (voir section 2.2.3). Ce modèle est une bonne approximation, elle garantit une approche conservative du point de vue de la sûreté. Toutefois, la relation réelle est inconnue et plusieurs modèles descriptifs plus réalistes sont souvent proposés²¹⁴. Ceci est dû au fait que les effets des rayonnements sur l'homme et par extension sur d'autres espèces (souvent ramenées à l'homme ou dérivées de celui-ci) relèvent de l'épidémiologie. L'épidémiologie est une science de l'observation, il ne s'agit pas à proprement parler d'une science expérimentale permettant de générer des données sous des conditions contrôlées. On ne peut pas prendre *rendez-vous* avec les phénomènes d'intérêt en vue de les étudier sous différentes conditions (Stengers [1997] 2002, p. 45). L'épidémiologiste tente de démêler ce qui se donne à lui, le plus souvent les variations de résultats sont livrées avec des variations de plusieurs conditions en même temps. Il lui est rarement possible de pouvoir appliquer une méthodologie expérimentale *ceteris paribus* car les choses ne sont jamais égales. Une randomisation n'est pas possible en épidémiologie des radiations (IRPS, 2018b). En effet, et c'est heureux, les cohortes humaines irradiées ne sont pas légion. Les épidémiologistes du 21^e siècle décortiquent encore les données des expositions aux rayonnements ionisants suite à l'explosion des bombes Hiroshima et Nagasaki²¹⁵ !

²¹³ Linear non-threshold model.

²¹⁴ Y compris des modèles tenant compte de l'hormèse, un effet positif observé sur le corps humain dans certaines conditions, lorsque celui-ci est exposé à de faibles radiations !

²¹⁵ Si les données relatives aux expositions aux rayonnements ionisants lors de l'explosion des deux bombes sont toujours étudiées, elles ne constituent pas pour autant la seule source d'information, bien entendu. Les expositions médicales par exemple, fournissent également beaucoup de données.

La découverte des effets stochastiques a entraîné un changement dans l'approche du calcul des effets des faibles doses et a également modifié ce que Stephen Gardiner appelle la philosophie de la « phase de seuil » en vigueur jusque dans les années 1950 (Gardiner, 2008). En effet, alors qu'il n'existait historiquement que des valeurs indiquant comment se prémunir des effets déterministes (i.e. les réactions tissulaires²¹⁶) – les *seuils*²¹⁷ – le respect de certaines *limites* a ensuite été préconisé lorsque les effets stochastiques ont été découverts. Ces limites ont été établies pour les expositions planifiées, d'abord pour les travailleurs et ensuite pour le public (IRPS, 2018d). On estime qu'après la première phase de seuil (à l'origine du principe des limites de doses), le système CIPR est entré dans une deuxième phase, celle de l'« optimisation », avant d'en connaître une troisième, dès 1977, appelée phase de « justification » (Gardiner, 2008) (voir section 7.4.6) Chacune de ces phases s'est donc déroulée sous l'influence prépondérante d'un principe de radioprotection²¹⁸.

7.4.3.2 Fondement éthique du principe de limites de doses et relation au principe ALARA. Egalitarisme et prioritarisme

Le principe des limites de doses, tout comme le principe d'optimisation, se réfère avant tout à la valeur éthique de la prudence mais plus encore, comme le reconnaît la CIPR, à un principe de justice distributive visant à répartir le risque de façon équitable entre les individus (ICRP, 2018, §85). Sans que l'on puisse pour autant prétendre que chaque principe de la protection radiologique relève strictement d'un courant éthique particulier, le principe

²¹⁶ La CIPR préconise l'emploi du vocable « réactions tissulaires » en lieu et place de l'expression « effets déterministes » dans la mesure où les effets peuvent être modifiés après l'irradiation et ne sont donc plus uniquement déterminés au moment même de l'irradiation (ICRP, 2012, p. 11).

²¹⁷ En 1934, la CIPR recommandait 500 mSv comme seuil maximum d'exposition et suite aux effets des bombes Hiroshima et Nagasaki, a « revu » ses recommandations à 15 mSv... (IRPS, 2018d).

²¹⁸ Nous ne souhaitons pas nous appesantir sur cet historique mais il nous faut néanmoins remarquer que l'histoire ne s'est pas arrêtée là. D'une part, l'omniprésence du principe d'optimisation aujourd'hui est une réalité (et suggère que le principe d'optimisation est à nouveau revenu en force). D'autre part, une autre phase a suivi celle de la justification, ce qui a été reconnu par Roger Clarke, alors président de la CIPR, en 2003 : la phase de contrainte. C'est cette phase qui a été abondamment critiquée par Shrader-Frechette, Persson, Wikman-Svahn, ... avec notamment la notion de *de minimis* que nous commentons dans cette section.

des limites de doses est classiquement associé à l'éthique déontologique qui discute un ensemble de règles valables pour tous les individus d'une société donnée (ICRP, 2018, A11 ; Hansson, 2007, p. 149).

On l'oppose dès lors, souvent, au principe d'optimisation mais il faut rester circonspect dans ces comparaisons. Comme nous l'indiquons précédemment au sujet du principe ALARA, bien que celui-ci relève principalement de l'utilitarisme, l'introduction de la personne représentative y a apporté quelques nuances à connotation déontologique. Il en va de même de la méthode de pondération, typiquement associée à l'utilitarisme, qui peut jouer également un rôle dans l'éthique déontologique. Il est cependant vrai qu'elle sera appliquée à l'échelle individuelle et non plus collective, contrairement à l'utilitarisme. La Pareto-optimalité²¹⁹ a d'ailleurs introduit cette idée en économie (Hansson, 2007 ; Arnsperger et Van Parijs, 2003). En éthique biomédicale également, domaine qui fait prévaloir le droit des individus, une évaluation coût-bénéfices est souvent utilisée mais elle se fait à l'échelle du patient. Par contraste, une approche strictement utilitariste permettrait, par exemple, qu'un essai clinique soit défavorable au patient si cela pouvait être compensé par un plus grand bénéfice pour la collectivité. En réalité, ce sont des approches mixtes qui sont le plus souvent utilisées en radioprotection, selon les situations.

Ces précautions étant prises, la tension existant entre le principe de limites de doses et le principe d'optimisation a souvent été discutée (Wikman-Svahn, 2008 ; Hansson, 2007 ; Feinhals, 2008) mais, alors que les éthiciens ont tendance à opposer leurs théories morales, les radioprotectionnistes cherchent plutôt à concilier leurs principes (Hansson, 2007, p. 149). C'est ainsi qu'un ordre (lexicographique²²⁰) est normalement d'application entre les principes de la radioprotection. Veiller au respect des limites de doses

²¹⁹ Un état de l'économie est Pareto-optimale si et seulement s'il n'existe aucun autre état qui soit meilleur pour un individu sans être pire pour au moins un autre individu (Hansson, 2007). En d'autres termes, « une situation A est Pareto-optimale s'il n'existe aucune autre situation possible B telle que d'une part, un individu préfère au moins B à A, tandis que d'autre part, aucun individu ne préfère A à B » (Arnsperger et Van Parijs, 2003, p. 21).

²²⁰ L'ordre lexicographique entre deux principes établit la priorité absolue d'un principe sur l'autre comme par exemple entre le principe d'égalité équitable des chances et le principe de différence chez Rawls (Rawls, [1971] 2009).

individuelles passe avant la diminution de la dose collective par le principe d'optimisation de la protection²²¹ (Hansson, 2007, p. 152).

La CIPR justifie le principe des limites de doses par la répartition équitable du risque entre les individus. Hansson suggère donc d'analyser le principe d'application des limites de doses à l'aune de théories de la justice comme d'une part, l'égalitarisme et d'autre part, une théorie « agrégativo-distributive » à mi-chemin entre l'égalitarisme et l'utilitarisme, telle que le prioritarisme²²² (Gosseries, 2008c). Si le prioritarien est insensible à la manière dont les doses sont réparties dans un groupe d'individus pour peu que ces doses soient sous les limites réglementaires, l'égalitarien veillera à ce que ces doses, fussent-elles déjà sous les limites réglementaires, soient également équitablement réparties entre tous les individus.

Dans une perspective prioritarienne, les doses excédant les limites sont plus durement pondérées dans le calcul de la dose collective reçue par un groupe que les doses plus faibles reçues par ce même groupe. Il s'agit donc d'une sorte de facteur pénalisant qui serait appliqué en tant que facteur multiplicatif à l'excès de dose. Cette manière d'appliquer le principe des limites de doses adoucit la stricte règle lexicographique (Hansson, 2007) en introduisant une pénalité mais sans rigoureusement proscrire le dépassement. Nous attestons de la pertinence de cette analyse dans le cas des applications sur le très long terme comme dans le cas des stockages géologiques. Les contraintes (et limites) de dose ne pouvant plus être de stricte application, des valeurs de référence les remplacent à titre indicatif. Leur dépassement est éventuellement permis mais doit se justifier. Des efforts doivent alors être déployés pour diminuer ces doses le plus possible, la priorité étant donnée à la situation d'exposition ou aux circonstances qui entraînent une exposition excédentaire. Cette dernière pénalise (plus que proportionnellement) la sûreté d'ensemble. Cet exemple illustre

²²¹ Hansson développe un exemple extrême qui met en échec l'application strict de l'ordre lexicographique mais il reconnaît qu'il ne reflète pas la pratique des radioprotectionnistes pas plus que leurs opinions en matière de protection radiologique. Pour plus de détails, voir (Hansson, 2007).

²²² Courant qui soutient que la qualité d'un résultat est une fonction du bien-être général de tous les individus (tout comme l'utilitarisme) mais avec un poids supplémentaire accordé aux individus les plus mal lotis. Il s'agit donc d'une théorie intermédiaire entre l'utilitarisme et l'égalitarisme (Gosseries, 2008c, p. 171).

l'application du principe ALARA même au-delà des limites de doses et donc la dérogation à l'ordre lexicographique des principes. Hansson soutient que c'est plutôt l'approche prioritarienne que l'approche strictement égalitarienne qui peut justifier les distributions de doses qui sont d'application en protection radiologique.

Le principe de limites de doses ne relève donc pas d'une théorie de la justice proprement égalitarienne. L'éthique sous-jacente au principe de limites de doses est plutôt à mi-chemin entre l'utilitarisme et l'égalitarisme, le prioritarisme (Hansson, 2007). Il en résulte que l'ordre lexicographique entre les principes qui confère une préséance au principe de limites de doses n'est pas toujours respecté.

7.4.3.3 Le concept de minimis : quand le principe de limites de doses – en mode inverse – prend sa revanche sur le principe ALARA. L'éthique déontologique de la CIPR battue en brèche

Le principe de limites de doses se crédite d'une éthique déontologique (ICRP, 2018, A11). Per Wikman-Svahn en a sérieusement critiqué l'application et, avec elle, la tentative de la CIPR de se mouvoir, dans son ensemble, d'une éthique utilitariste vers une éthique basée sur les droits individuels (Wikman-Svahn, 2008 ; ICRP, 2018, A7, A11). Wikman-Svahn discute le problème d'établir des limites en s'attaquant au problème inverse auquel le principe de limites de doses s'applique habituellement. Plutôt que de critiquer les limites de doses à ne pas dépasser, Wikman-Svahn commente les limites de doses qui donneraient lieu à une exemption c'est-à-dire un seuil en deçà duquel plus aucun effort d'optimisation ne devrait être entrepris (concept *de minimis*). Cette notion, selon Wikman-Svahn, contreviendrait à l'intention de la CIPR d'opérer une évolution vers une éthique plus déontologique.

La limite d'exposition annuelle reconnaît que la probabilité d'un dommage pour un individu dû à de très faibles doses peut être non nulle mais, si la dose est inférieure à la limite, la probabilité est néanmoins suffisamment faible pour être considérée comme triviale. Il s'agit du concept de dose *de minimis* (et son risque correspondant) qui correspond au centième de la moyenne globale du rayonnement naturel soit 0.01 mSv (Wikman-Svahn, 2003), ce qui correspondrait à un risque de 10^{-6} de contracter un cancer fatal. Ce niveau de risque est généralement considéré comme insignifiant ou négligeable

dans les évaluations des risques qui pourraient entraîner des pertes de vies humaines²²³.

Cette notion de risque trivial peut être dévoyée selon Wikman-Svahn. En effet, si le respect de la limite d'exposition en dessous de laquelle le risque de dommage pour l'individu peut être considéré comme trivial est démontré, aucune autre amélioration de la protection ne semble plus nécessaire, puisque les individus sont déjà suffisamment protégés. Wikman-Svahn soutient que cette idée aurait cependant été fortement critiquée et qu'elle ne serait d'ailleurs plus approuvée par la CIPR (Wikman-Svahn, 2008, p. 85). Nous ne pouvons que partiellement souscrire à ce constat car des seuils de dose extrêmement bas sont bel et bien utilisés pour décider de l'exclusion (ICRP, 2007), l'exemption (ONDRAF, 2011a) et la libération (IAEA, 2016) de certaines matières (Telleria *et al.*, 2015). En revanche, nous le rejoignons pour dire que le principe d'optimisation de la dose « *as low as reasonably achievable* » (i.e. ALARA) n'est pas *a priori* limité et qu'il n'existe pas de seuil en deçà duquel l'optimisation devrait s'arrêter. Le concept *de minimis* tente d'exploiter pleinement le concept de la limite de doses et s'oppose en cela au principe ALARA (Feinhals, 2008, p. 1).

En outre, l'utilisation d'une limite d'exposition pourrait être considérée comme favorisant une stratégie de dilution et de dispersion et est donc contraire à la stratégie communément admise d'isolement et de confinement (ou de concentration et d'isolation), telle que préconisée par des organismes officiels tels que la CIPR, l'AIEA et l'AEN. La dilution et la dispersion permettraient de réduire les expositions en dessous de la limite, bien qu'une plus grande population soit potentiellement exposée. Wikman-Svahn rappelle qu'il n'existe pas de dose seuil démontrée en dessous de laquelle le risque de dommage lié à l'exposition aux rayonnements ionisants disparaît, même si la probabilité de dommage peut être prudemment considérée comme proportionnelle à la dose. Il s'ensuit que, si les contaminants sont dispersés sur une grande surface (dispersion spatiale), un grand nombre de personnes peuvent être exposées, même si les probabilités de dommages sont très faibles. Il est alors probable qu'un petit nombre de

²²³ A titre de comparaison, la contrainte de dose relative à l'exposition normale annuelle imputable au stockage est fixée par l'AFCN à 0.1 mSv/an (AFCN, 2011b). Il s'agit ici d'une borne supérieure à ne pas dépasser. Rappelons que Wikman-Svahn interroge ici la légitimité d'établir une borne inférieure.

personnes sera assurément lésé, même si le risque pour une seule personne est faible^{224, 225}. Il en va de même si les contaminants sont libérés très progressivement sur une longue période (dispersion temporelle), ignorant l'impact sur les générations futures (Shrader-Frechette et Persson, 2002). Cette situation peut être considérée comme incompatible avec un point de vue éthique fondé sur les droits des individus alors que le principe de limites de doses se crédite pourtant d'une éthique déontologique. De plus, il y aurait éventuellement une mise en danger des individus qui n'ont pas bénéficié de l'activité à l'origine du risque (par exemple, l'énergie nucléaire) et n'ont pas donné leur consentement (Shrader-Frechette et Persson, 2002). Exposer un individu à un risque de dommage, même s'il est très faible en termes de probabilité, sans aucun bénéfice personnel pour cet individu, est en effet très discutable (Wikman-Svahn, 2008). Nous avons d'ailleurs déjà abordé cette problématique au sujet de l'équité intergénérationnelle (voir section 7.3).

Notons immédiatement que le fait que les gens soient constamment exposés à des risques qu'ils trouvent acceptables (par exemple, conduire une voiture, prendre l'avion, etc.) ne résout pas ce dilemme éthique. « Un risque insignifiant ou négligeable n'est pas nécessairement acceptable et un risque acceptable n'est pas nécessairement négligeable ». En outre, décider de ce qui est acceptable implique des jugements de valeur comme, par exemple : « acceptable pour qui ? » (Lindell, 1988 cité dans Wykman-Svahn, 2008 ; IRPS, 2018a). Les risques sont acceptés non seulement si la probabilité de subir un préjudice est perçue comme faible, mais aussi s'ils sont en pratique inévitables ou associés à des activités que les individus jugent bénéfiques, les avantages l'emportant sur les risques. C'est donc également en recourant au principe de justification que l'acceptation du risque se construit (voir section 7.4.6).

Enfin, le principe de la limite de dose *de minimis* fait également l'objet d'une autre critique. Comme indiqué ci-dessus, la limite d'exposition annuelle a été précédemment fixée à une valeur qui représente une petite fraction (1/100e) du rayonnement naturel moyen. Une comparaison avec le fond naturel ne

²²⁴ Cf. la problématique de la vaccination contre la Covid-19. L'existence d'un risque faible d'effets secondaires sévères lors de l'inoculation d'un vaccin conduit assurément à un certain nombre de complications en raison du grand nombre de personnes concernées (potentiellement la population mondiale).

²²⁵ Rappelons que sur une grande population, le nombre d'individus hypersensibles augmente également (Shrader-Frechette et Persson, 2002).

devrait pas être utilisée *a priori* pour fixer les limites. En effet, la fixation d'une limite ou d'une contrainte de dose implique inévitablement un choix arbitraire. Wykman-Svahn considère qu'un tel choix revient, en fait, à tirer des conclusions morales (sur la façon dont les choses devraient être) sur la base de circonstances factuelles (comment sont les choses), ce qui équivaut à un « sophisme naturaliste » (Shrader-Frechette et Persson, 2002 cité dans Wikman-Svahn, 2008). En effet, les prémisses pour l'acceptation d'une telle limite ne sont plus exposées (ni discutées) au prétexte que celle-ci est considérée comme naturelle.

7.4.3.4 Une clarification utile : le concept de *minimis* et le stockage géologique

Dans les évaluations de sûreté des stockages géologiques, le concept de *minimis* n'est généralement pas d'application. C'est en partie pour cette raison que le principe d'optimisation, dès lors qu'il ne connaît pas de limite prédéfinie, peut être si ardu à appliquer et plus particulièrement si une comparaison de sites ou de roches hôtes doit se faire sur sa base.

Il y a cependant une exception notable au sein de l'Europe. La Suisse considère en effet que plus aucun effort d'optimisation ne doit être entrepris en deçà de la dose de *minimis*. En deçà de ce seuil, tous les sites potentiels de stockages sont considérés comme équivalents, en termes de sûreté. Dans l'extrait ci-dessous, nous voyons clairement le rôle joué par les deux bornes, supérieure (0.1 mSv/a) et inférieure (0.01 mSv/a), dans la sélection des sites d'enfouissement :

« For the comparison of sites, the results of the numerical calculations are included and evaluated using two radiological criteria. The first criterion is the objective of 0.1 mSv/a defined in HSK R-21 and the second is the value of 0.01 mSv/a derived from the Radiation Protection Ordinance, below which all sites are considered to be equivalent in terms of safety, irrespective of the calculated dose maxima. The definition of a lower threshold value for potential annual individual dose is permissible in terms of the Swiss radiation protection legislation. According to the Radiation Protection Ordinance, there is no further optimisation in terms of radiation

protection if persons accumulate an effective dose of less than 0.01 mSv/a. » (SFOE, 2008, Appendix III, p. 70)

7.4.3.5 Un équilibre complexe

Même s'il est démontré qu'un projet profite à la société dans son ensemble, des effets préjudiciables à certains individus pourraient être acceptés dans une perspective purement utilitariste. C'est pour cette raison que les limites de doses individuelles ont été introduites pour construire un cadre plus égalitaire que par la seule application du principe d'optimisation. Par rapport au principe ALARA, le principe des limites de dose garantit que personne ne doit être exposé à un risque inacceptable (éthique déontologique). Pour qu'il y ait acceptabilité du risque, celui-ci ne doit pas nécessairement être négligeable, mais il se doit d'être associé à des pratiques jugées bénéfiques ou bien encore relever de l'inexorable. C'est le principe de justification qui intervient dans l'évaluation de ce bénéfice.

Avant de poursuivre avec le troisième principe – le principe de justification – qui se distingue plus nettement des deux précédents et dont nous venons de rappeler l'importance en matière d'acceptabilité du risque, nous souhaitons compléter, dans les prochaines sous-sections, la présentation du principe d'optimisation afin de souligner les liens particuliers qu'il entretient avec les principes de sûreté. Le principe d'optimisation est en effet le seul principe du système de la CIPR à connaître un prolongement (sans transformation²²⁶) en dehors du domaine de la protection radiologique. Cette présentation est nécessaire afin d'identifier correctement la portée de l'optimisation et avant de procéder à son analyse approfondie en lien avec la sûreté (voir chapitre 8).

²²⁶ A la section 3.2.2.4, nous avons parlé d'un mimétisme entre la sûreté et la protection radiologique mais le principe d'optimisation est celui qui, en apparence, subit le moins de transformation et donc semble « se prolonger ».

7.4.4 Présentation du principe d'optimisation en lien avec le principe BAT(NEEC)

Depuis sa création, le principe d'optimisation a été progressivement élargi pour répondre à plusieurs problématiques dont, entre autres, les longues durées propres au stockage définitif des déchets radioactifs. Un premier examen critique et une première interprétation du principe d'optimisation dans le contexte du stockage géologique en Belgique ont été réalisés par l'ONDRAF en 2010 (Depaus, 2010). De cet examen, il est apparu qu'une fertilisation croisée entre l'optimisation au sens d'ALARA et le concept des meilleures techniques disponibles (sans coûts excessifs) [BAT(NEEC)] (EC, 1996) avait probablement construit le principe d'optimisation de la sûreté. Le principe BAT²²⁷ confère une approche plus globale de la protection, incluant l'ensemble du stockage et abordant tous les aspects liés à la sûreté sans se limiter aux seuls aspects radiologiques. Ce point de vue a également été défendu par l'AEN (NEA, 2010) qui formule, en outre, plusieurs critiques à l'encontre du principe d'optimisation radiologique : le recours au principe d'optimisation en tant que principe directeur de la période après fermeture de l'installation de stockage ne rend pas justice aux risques non radiologiques ; il surestime les concepts de dose et de risque sur de très longues échelles de temps ainsi que leur importance relative dans les évaluations de sûreté et ce, au détriment d'autres indicateurs. Nous reproduisons ci-dessous la formulation élocuente de l'AEN :

« There is a need for further consideration of whether the term or concept 'optimisation of radiological protection' is needed as a separate, leading concept for the post-closure phase of geological disposal. The presents study suggests there are good reasons for incorporating this concept in the broader concept of, for example, BAT or application of 'best practice'; these include:

- *Emphasis on radiological exposures may mask risks from non-radiological causes. [...]*

²²⁷ Nous rappelons que BAT et BAT(NEEC) sont ici synonymes et désignent le même principe (voir à ce sujet, les notes 103 et 121).

- [...] *Placing an emphasis on optimisation of radiological protection over long timescales can mean an emphasis on estimation of doses or risks, which might give a false impression that actual detriments to people's health are being estimated [...]*
- *Focus on optimisation analyses of radiological protection can relegate to second rank analyses that utilise indicators other than dose and risk and that are meant to assess the robustness of the system. These analyses are typically those that would underscore a statement of application of best available technique or best practice[...]*

The way the term 'optimisation' is used in radiation protection is not standard usage in the scientific literature and may cause confusion [...] » (NEA, 2010)

Dans le cas particulier des stockages géologiques, la CIPR a tenté de clarifier, en 2013, ce qu'elle entendait et escomptait du principe d'optimisation en cherchant à le définir de la façon la plus inclusive possible :

« Optimisation has to be understood in the broadest sense as an iterative, systematic, and transparent evaluation of protective option, including Best Available Techniques, for enhancing the protective capabilities of the system and reducing its potential impacts (radiological and others). » (ICRP, 2013)

La CIPR reconnaît également que les indicateurs que sont le risque et la dose sur de longues échelles de temps servent plutôt à la comparaison d'options plutôt qu'à l'évaluation réelle du préjudice causé sur la santé du récepteur :

« In the very long term, dose and risk criteria should be used for the comparison of options rather than a means of assessing health detriment [...] » (ICRP, 2013)

Dans certains cas, ces indicateurs perdent totalement leur pertinence :

« For severe natural disruptive events not taken into account in the design-basis evolution and inadvertent human intrusion, application of the risk or dose constraint does not apply. » (ICRP, 2013)

Il ressort de ces quelques extraits que garantir la sûreté d'une installation géologique, c'est-à-dire la protection de l'homme et de l'environnement vis-à-vis de cette installation, requiert une approche qui dépasse la protection radiologique et ses indicateurs usuels. C'est à cette fin que le principe BAT vient renforcer le principe d'optimisation radiologique et que la CIPR lui consacre une section dédiée dans sa publication 122 relative aux stockages géologiques (ICRP, 2013, section 4.8). Malgré ces tentatives de clarifications de la CIPR, le principe d'optimisation demeure la bouteille à encre des concepteurs de stockages comme nous allons abondamment l'illustrer dans les prochains chapitres. Il nous faut cependant encore ajouter quelques mots sur le lien que le principe d'optimisation entretient avec le principe de robustesse et faire le point sur les relations entre les principes entrevus jusqu'ici, qu'ils relèvent de la sûreté nucléaire ou de la sûreté de fonctionnement.

7.4.5 Relation entre le principe d'optimisation et le principe de robustesse

Le lien entre l'optimisation et la robustesse est également explicité par la CIPR, dans le cas particulier des stockages géologiques²²⁸. Sur le très long terme, la contribution de chaque composant à la sûreté globale du système est primordiale et anticiper la manière dont ces composants peuvent résister à des événements adverses fait partie de l'évaluation de sûreté. Comme le répète la CIPR, les indicateurs que sont la dose et le risque ne sont plus fiables sur de telles temporalités et le principe d'optimisation doit donc reposer sur d'autres facteurs :

« Assessment of the robustness of the disposal system can contribute to system optimisation because it provides insight, quantitative or qualitative, into the performance of the disposal system and its components, (...) Therefore, the value of such an assessment for the optimisation process is mainly through the insights it provides on the relative contributions of the various components to the overall system objectives of containment and isolation, and how these contributions can be affected by disturbing events and processes or by remaining uncertainties. The uncertain nature of calculated effective dose and risk that is estimated to arise in the very distant future reduces their usefulness for the optimisation process. » (ICRP, 2013, §86)

²²⁸ l'AEN distingue deux catégories de robustesse (NEA, 2004a) :

- La robustesse technique : les dispositions de conception intentionnelles qui fournissent une assurance supplémentaire de la performance et de la sécurité du système de stockage, soit pour compenser des phénomènes connus et des incertitudes, soit pour se prémunir contre les conséquences possibles de phénomènes inattendus (par exemple, le conditionnement des déchets dans des matrices hautement durables, le surdimensionnement de certaines barrières techniques).
- Robustesse intrinsèque : les dispositions intentionnelles relatives au choix du site qui évitent ou réduisent les effets de phénomènes potentiellement préjudiciables et les sources d'incertitude (par exemple, le choix d'un site éloigné des ressources naturelles telles que le pétrole, le gaz, les minéraux, etc.)

Ces catégories de robustesse contribuent toutes deux à la robustesse globale de l'installation.

7.4.6 Ethique du principe de justification

Le principe de justification est probablement le principe le moins discuté dans le système de la CIPR bien qu'on lui inféode souvent les deux autres principes : le principe des limites de doses et le principe d'optimisation. Selon Stephen Gardiner, ce serait en raison du fait que ce principe fait appel à d'autres facteurs (e.g. politiques) en plus de ceux spécifiques aux rayonnements (Gardiner, 2008). C'est ce qu'a également noté le groupe d'experts sur l'évolution du système de radioprotection (EGRP) et qui a déclaré :

« In the case of decisions regarding justification, scientific input from radiological protection specialists is an important contributor, but will most likely not form the most significant part of the basis for decision. » (NEA, 2002a)

Le principe de justification est aussi souvent intégré dans le régime d'autorisation des régulateurs. Une pratique est justifiée lorsqu'elle est autorisée et inversement (Sonck, 2008, p. 71).

Néanmoins, étant par ailleurs reconnu comme la « pierre angulaire » (Gardiner, 2008, p. 99) de la philosophie du système de la CIPR et parce qu'il a été en partie introduit afin de clarifier l'interprétation du principe d'optimisation et que nous avons vu son rôle dans l'acceptabilité du risque, nous présentons ci-après le principe de justification en lien avec son fondement éthique.

7.4.6.1 Justification, bienfaisance et utilitarisme

Le principe de justification est étroitement lié au principe de bienfaisance qui consiste à promouvoir le bien, tout en évitant de causer du tort (non-malfaisance) (ICRP, 2018, A9). En effet, le principe de justification pourrait être énoncé simplement comme suit : aucun projet ne doit être approuvé ou aucune pratique adoptée qui n'adhère pas au principe de bienfaisance. En dépit de certaines déclarations de la CIPR :

« The principles of justification and optimisation aim at doing more good than harm and at maximizing the margin of good over harm for society as a whole. They therefore satisfy the utilitarian principle of

ethics, whereby the actions are judged by their overall consequences [...] » (Clarke, 2003 cité dans Gardiner, 2008)

L'interprétation du principe de justification comme un résultat de l'application de l'éthique utilitariste est intenable, selon Gardiner. En effet, dans la formulation du principe de justification, il n'est pas fait mention de la maximisation du bénéfice, mais simplement du fait qu'il doit y avoir un bénéfice net positif (Gardiner, 2008).

Le principe de justification serait donc l'héritier d'une éthique de la vertu liée à la nature humaine profonde qui choisit de préférer faire le bien et d'éviter de causer de la souffrance (ICRP, 2018, A9).

7.4.6.2 Rôle décisionnel du principe de justification

L'adhésion au principe de justification peut être considérée comme une condition nécessaire plutôt que comme une condition suffisante pour décider de poursuivre ou non un projet. Un projet ne peut être approuvé si le principe de justification est violé, mais, même si le principe est respecté, la décision finale d'aller de l'avant ou non dépendra d'autres facteurs. Strictement parlant, pour adhérer au principe de justification, le projet doit générer un niveau positif de bénéfice économique/social et pas plus. Dans la pratique, cependant, il semble raisonnable d'interpréter l'adhésion au principe de justification comme le fait que le projet apporte un gain positif par rapport aux pratiques qui prévalaient avant que le projet ne soit entrepris. Dans cette interprétation, le bénéfice net est mesuré par rapport au cas où le projet n'est pas entrepris et où les pratiques dominantes se poursuivent.

Il découle de cette interprétation du principe de justification, combinée aux deux autres principes (optimisation et limites de doses), que l'éventail des projets adhérant à ce principe peut être beaucoup plus large et plus permissif qu'un éventail basé sur un optimum utilitariste. Une fois encore, cela montre qu'il est difficile de lier le principe de justification à l'utilitarisme (Ponthière, 2008).

7.4.7 Principe de justification et optimisation

Enfin, une relation entre le principe de justification et le principe d'optimisation est identifiée dans les dispositions suivantes de la CIPR et concerne plus particulièrement la question des déchets radioactifs :

« [...] *If the management of waste was not considered in the justification of a practice that is no longer into operation, the Commission recommends to optimize the protection of humans and the environment independently of considering the justification of such practice.* » (ICRP, 2013, §44)

En d'autres termes, il peut y avoir des pratiques passées ayant engendré des déchets et qui n'ont pas été justifiées ou des pratiques dont la justification ne s'est pas faite en tenant compte de la génération desdits déchets. Ces déchets doivent alors être gérés d'une manière qui respecte le principe d'optimisation. Il résulte de cet extrait un fait important : la gestion à long terme des déchets n'est pas une pratique qui nécessite elle-même une justification. Elle est d'emblée supposée légitime.

7.5 Liens entre l'optimisation radiologique et les principes de sûreté

Résumons ici les liens qui se sont dessinés entre les principes de sûreté et de radioprotection jusqu'à présent.

Dans l'étude de la sûreté de fonctionnement, nous avons mis en évidence l'importance de la fiabilité et rapproché le facteur de simplicité de conception du principe robustesse (voir section 6.2). Nous verrons à la section 10.4.2 que la robustesse participe au principe de sûreté « Défense en profondeur » (Bernier *et al.*, 2017) et nous avons évoqué l'importance de ce dernier pour la fiabilité. La robustesse intervient dans le processus d'optimisation comme nous venons de le voir (ICRP, 2013) et l'optimisation est étroitement liée au principe BAT dans les stockages géologiques. Nous pouvons donc représenter ces interactions d'après le graphe ci-dessous (figure 7-2), ce qui permet de comprendre la place centrale occupée par le

principe d'optimisation radiologique ainsi que les liens entre la sûreté nucléaire et la sûreté de fonctionnement :

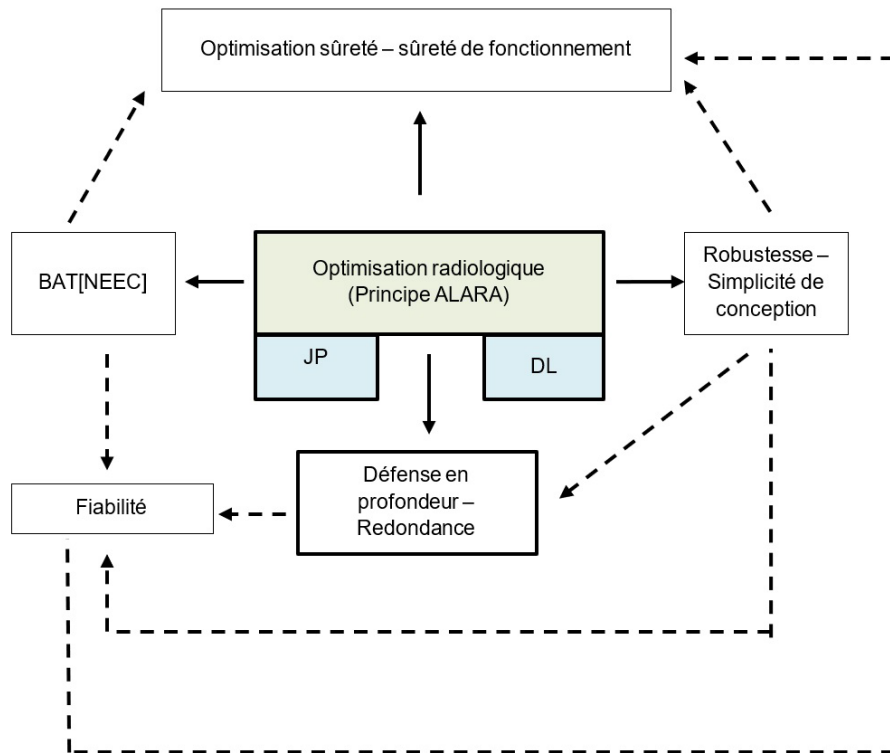


Figure 7-2 – Les liens entre l'optimisation radiologique et les principes de sûreté nucléaire sont représentés par les flèches pleines et, par les flèches en pointillés, sont représentés les liens existant entre les principes du point de vue de la sûreté de fonctionnement. Les cadres au fond bleuté désignent les principes de la protection radiologique. Les cadres au fond blanc représentent des principes de sûreté nucléaire ou des facteurs de la sûreté de fonctionnement. Les « – » séparent les appellations des principes de sûreté nucléaires de leurs équivalents en sûreté de fonctionnement des systèmes classiques. Les abréviations JP et DL désignent les principes radiologiques de justification des pratiques et de limites de doses respectivement. Leur rôle n'est ici représenté qu'en soutien au principe ALARA de la radioprotection.

7.6 Conclusions du chapitre 7

Le chapitre 7 décrit le système de protection radiologique de la CIPR et accorde une place prépondérante au principe d'optimisation dans son analyse. La section 7.1 rappelle l'énoncé des trois principes de la radioprotection tout en discutant le cadre moral de protection des générations futures qui a accompagné leur formalisation.

La protection des générations futures relève d'une exigence à la fois normative et empirique mais les textes légaux et de doctrine, tant de l'EC que de l'AIEA et de l'AEN, en postulent plus le principe qu'ils ne le défendent. Ils semblent ainsi se contenter de solliciter notre intuition première de justice pour le valider. C'est pourquoi nous avons décidé, avant toute chose, de questionner les fondements de cette intuition à la section 7.2. Nous avons ainsi prolongé la lecture du *Principe Responsabilité* de Jonas, entamée au premier chapitre, dans une perspective double : déontologique et conséquentialiste. Nous y avons également précisé la distinction entre les générations futures proches et les générations futures éloignées, une distinction doublement pertinente, à la fois du point de vue éthique général mais aussi du point de vue pratique pour la question des stockages géologiques.

L'objectif de protéger les générations futures dépasse en réalité la simple idée de protection et englobe également le souci d'assurer l'équité intergénérationnelle. La section 7.3 a passé en revue les principales théories de justice qui permettent d'appréhender cet enjeu : l'utilitarisme, l'éthique libérale-égalitaire de Rawls ainsi que d'autres approches qui en sont dérivées comme, entre autres, les capacités de Sen, la durabilité de Barry ou le suffisantisme du rapport Brundtland. Cette section nous a permis de préparer le terrain pour l'analyse à la fois technique et éthique de chaque principe de la protection radiologique du système de la CIPR. C'est ce qui a été entrepris à la section 7.4. Nous avons vu l'intrication complexe des principes d'optimisation et de limites de doses, l'un ne pouvant s'entendre sans l'autre et ce, malgré des origines historiques distinctes. L'origine utilitariste du principe d'optimisation a également été nuancée avec notamment l'introduction du concept de personne représentative remplaçant celui de groupe critique dans les évaluations de protection. Cette

évolution témoigne d'une volonté de la CIPR de tendre vers une éthique plus déontologique, éthique que le principe de limites des doses est d'ailleurs censé incarner. Bien que celui-ci se veut garantir une répartition équitable du risque entre les individus, il est apparu que la théorie de justice distributive qui s'appliquait le mieux au principe de limites de doses n'était pas rigoureusement égalitarienne mais plutôt prioritarienne. Cette nuance a permis de comprendre comment, dans certaines situations, l'ordre lexicographique des principes des limites de doses et d'optimisation pouvait s'inverser.

La définition de limites ne se pose pas uniquement lorsqu'il s'agit de fixer des bornes supérieures aux doses admissibles mais également lorsqu'il s'agit d'établir une borne inférieure qui permettrait de s'affranchir de toute optimisation subséquente. Ce concept de *de minimis* a été analysé et critiqué par rapport à l'éthique déontologique dont la CIPR tente de se créditer. Enfin, les liens qu'entretient le principe d'optimisation radiologique avec les principes de sûreté que sont les principes BAT et de robustesse déjà évoqués au premier chapitre ont révélé que le principe d'optimisation radiologique seul ne suffisait pas à appréhender la complexité de la sûreté.

Le principe de justification, troisième et dernier principe de protection radiologique ainsi que pierre angulaire du système de la CIPR, a été discuté à la section 7.4.6 en tant que principe décisionnel non utilitariste. Il établit les conditions nécessaires mais non suffisantes que toute pratique doit satisfaire avant d'être autorisée. Il puise son fondement moral dans une éthique de la vertu qui place le souci de bienfaisance au cœur des décisions.

Une cartographie (provisoire) des liens existant d'une part, entre les principes de sûreté nucléaire entre eux et d'autre part, entre les principes nucléaires et les attributs de la sûreté de fonctionnement a mis en évidence la place centrale de l'optimisation dans la construction de la sûreté. Elle a en outre révélé la complexité du réseau de concepts concourant à la sûreté nucléaire et à la sûreté de fonctionnement.

Les chapitres 6 et 7 de ce manuscrit ont donc fourni une analyse épistémologique et éthique générale de la sûreté et de la protection radiologique en mettant l'accent sur le principe d'optimisation qui relie ces

deux domaines. C'est la nature et la légitimité de ce lien que nous analysons à présent au chapitre suivant.

Chapitre 8 Le principe d'optimisation : du principe opérationnel au principe de gouvernance

Le présent chapitre se concentre sur le principe d'optimisation. Son évolution au fil du temps est présentée de façon critique. En particulier, nous relevons dans cette évolution un changement de statut, le principe d'optimisation passant de l'état d'un principe de radioprotection à celui d'un principe de sûreté. Si dans le langage et l'usage communs, cette différence pourrait sembler insignifiante, elle relève, selon nous, d'un glissement sémantique et épistémologique non nécessairement justifié. Un principe de sûreté à la portée plus globale ne peut être extrapolé, sans justification, au départ d'un principe de protection radiologique.

La sûreté étant la préoccupation première des systèmes de stockages de déchets radioactifs, elle préside à leur développement, de leur conception jusqu'à leur fermeture tout en passant par toutes les phases de leur exploitation. Engendrant sa propre culture, la sûreté est omniprésente. Le changement de statut du principe d'optimisation, s'il existe bel et bien – et c'est ce que nous tentons de montrer ici – pourrait être indu. Ce changement trop vite concédé soulève des questions pratiques, parfois insolubles, comme nous le montrera l'étude de cas.

Le passage de la protection radiologique à la sûreté constitue la principale investigation de ce chapitre, tant sur le plan théorique, par l'examen de certaines publications de la CIPR article par article, que sur le plan pratique,

par l'analyse critique des outils d'aide à la décision dans la mise en pratique du principe d'optimisation.

8.1 Protection radiologique et sûreté : vrais faux amis

Il n'y a pas synonymie entre sûreté et protection radiologique mais il y a bien une proximité qui, dans le domaine nucléaire, crée quelque confusion.

Rappelons ce que nous dit l'AIEA au sujet de la sûreté :

*« 'sûreté' s'entend de la protection des personnes et de l'environnement contre les **risques radiologiques**, et de la sûreté des installations et des activités donnant lieu à des **risques radiologiques**. (...) »*

*Obtention de conditions d'exploitation correctes, (...) avec pour **résultat** la **protection** des travailleurs, du public et de l'environnement contre des **risques radiologiques** indus. » (IAEA, 2007a, pp. 169-170, nous soulignons)*

De ces extraits, il apparaît que la *protection radiologique*, c'est-à-dire la protection des humains et de l'environnement contre les risques radiologiques, est bien un *résultat* de la sûreté. Par ailleurs la sûreté couvre un large éventail d'activités puisqu'elle englobe la *sûreté* des installations nucléaires, la *sûreté* de la gestion des déchets, etc. :

*« Le terme 'sûreté' tel qu'employé ici et dans les normes de sûreté de l'AIEA comprend la sûreté des installations nucléaires, la sûreté radiologique, la sûreté de la gestion des déchets radioactifs (...), **mais exclut les aspects non radiologiques** de la sûreté. » (IAEA, 2007a, p. 169, nous soulignons)*

Toutefois, un stockage géologique de déchets radioactifs est une installation souterraine qui pose des défis en termes de protection radiologique mais aussi en termes de sûreté non radiologique alors que la disposition ci-dessus, fournie par l'AIEA, ne l'envisage pas. La sûreté d'un stockage géologique apparaît donc comme un objet situé à l'intersection de la sûreté nucléaire

pour ce qui relève des risques radiologiques et de la sûreté de fonctionnement pour ce qui relève de tous les autres risques (e.g. miniers). Dans cette perspective, nous observons deux différences fondamentales :

- La première est une différence d'échelle, la protection radiologique apparaissant comme un sous-ensemble de la sûreté. Passer de la protection radiologique à la sûreté procède en quelque sorte d'un passage d'un niveau local – au départ d'un principe de protection radiologique – à un niveau global c'est-à-dire vers un principe de sûreté.
- La deuxième consiste en un changement d'objet : la protection radiologique s'adresse au récepteur du danger potentiel alors que la sûreté s'adresse à la source de celui-ci. Les mesures de protection sont établies en fonction de l'homme et l'environnement à protéger (vision *outside-in*) tandis que la sûreté porte sur les sources ionisantes qu'il s'agit de contrôler et les conditions d'exploitation de l'installation qu'il s'agit de maîtriser (vision *inside-out*). Dans la perspective des stockages géologiques, l'accent est mis sur l'évolution des déchets qui sont l'émetteur du danger changeant au fil du temps, pour un récepteur supposé constant (l'humanité et son environnement²²⁹).

Face à l'évolution du terme source (les déchets), les mesures de protection radiologique du récepteur évoluent elles aussi et deviennent partie intégrante de la sûreté vue à l'échelle du système de stockage, en tant que sous-ensemble de celle-ci.

On pourrait se demander d'où peut provenir l'ambiguïté et même si celle-ci existe bel et bien. La protection radiologique a pour objet les effets des radiations sur la santé (IRPS, 2018a) et la CIPR définit les principes de protection comme un ensemble de principes s'appliquant à toutes les « *situations d'exposition contrôlables* » et les énonce : *le principe de justification, le principe d'optimisation de la protection et le principe d'application des limites de doses pour les situations planifiées* (ICRP, 2007, p. 29). La sûreté y est également définie comme « *l'obtention de conditions*

²²⁹ Il s'agit bien entendu d'une constance dans le principe. Les modèles de biosphère en aval des évaluations de sûreté tentent de prendre en compte différents changements possibles d'environnement et d'habitudes de vie, le plus souvent sous la forme de stylisations afin d'échapper aux pièges de la prédiction.

d'exploitation correctes, la prévention des accidents et l'atténuation de leurs conséquences », en adéquation avec la définition de l'AIEA (ICRP, 2007, p. 32). C'est donc bien l'objectif de la sûreté que de s'assurer que les situations d'expositions radiologiques auxquelles se réfèrent les principes de radioprotection soient bien *contrôlées*. Même si ce détail aurait sans doute mérité d'être explicité dans les glossaires de ces publications, il n'y aurait sans doute pas eu d'ambiguïté si le principe d'optimisation précédemment cité dans les principes de protection radiologique n'était pas énoncé comme principe d'optimisation de la protection... et de la sûreté !

« Optimisation of protection (and safety): The process of determining what level of protection and safety makes exposures, and the probability and magnitude of potential exposures, as low as reasonably achievable, economic and societal factors being taken into account. » (ICRP, 2007, p. 28)

Nous reviendrons sur cette ambiguïté plus largement dans la suite de ce chapitre. Dans la section suivante, nous nous intéressons à l'évolution du principe d'optimisation et à l'élargissement de sa portée.

8.2 Interprétation évolutive du principe d'optimisation²³⁰

Le principe d'optimisation est sans doute le plus difficile à appréhender dans le contexte précis du stockage géologique des déchets radioactifs puisqu'il s'agit d'abord d'un principe de radioprotection qui a gagné progressivement en importance (IRPS, 2018a ; ICRP, 2007 ; ICRP, 2013)²³¹, ensuite d'un principe de sûreté (IAEA, 2006a) et du principal moteur de l'approche globale

²³⁰ Le début de cette section s'inspire fortement de précédents travaux (ONDRAF, 2020f) mais que nous complétons ici avec la recherche historique du moment du changement de la portée du principe d'optimisation entre 2007 et 2012 et l'influence du principe BAT.

²³¹ Et ce en dépit de la tendance début des années 2000, notamment avec le retour en force du concept de *de minimis*, du principe des limites de doses. Face à la totipotence de l'optimisation, l'AEN a organisé en janvier 2020 un workshop « *Optimisation : Rethinking the Art of Reasonable* » (Depaus, 2020b).

de la sûreté fonctionnant comme un méta-processus tel que requis par l'AFCN :

« le système de stockage résulte de la mise en œuvre du principe d'optimisation de la protection contre les rayonnements ionisants. »
(AFCN, 2014b, p. 40)

Les fondements éthiques du principe d'optimisation de la radioprotection ont été discutées dans les sections précédentes. Il a été également mentionné que le principe d'optimisation était lié au principe de sûreté de la robustesse et ce lien a été consacrée par la CIPR elle-même dans sa publication 122, soulignant en même temps le statut hybride du principe d'optimisation (voir section 7.4.5.). Nous avons vu que si la radioprotection pouvait être vue comme faisant partie de la sûreté (perspective d'échelle locale-globale), la sûreté est évidemment plus vaste que la radioprotection seule. Par ailleurs, si le principe d'optimisation est considéré comme un principe de sûreté, pourquoi les deux autres principes de radioprotection, à savoir le principe de justification et l'application des limites de dose, ne sont-ils pas considérés comme principes de sûreté et sont limités à la radioprotection ? Cette particularité atteste de la relation complexe que la radioprotection entretient avec la sûreté, dedans et dehors, en fonction des perspectives.

8.2.1 Au fil de la CIPR

Comme nous l'avons déjà dit (voir section 7.1), le principe d'optimisation a été énoncé dans sa « forme » actuelle par la CIPR en 1977 mais son origine est bien plus ancienne et remonte à la découverte des effets stochastiques. C'est en raison du fait que l'utilisation d'une limite inférieure de dose ne peut garantir l'absence de risque que le principe d'optimisation prendra naissance. En 1955, l'ancêtre du principe ALARA s'énonce (ICRP, 2006) :

« To reduce exposures to the lowest possible level »

Il évolue quelque peu jusqu'en 1959 où il est consigné dans la première publication de la CIPR, sous la formulation :

« To keep exposures as low as practicable » (ICRP, 1959)

En 1966, la publication 9 de la CIPR fait entrer des considérations socio-économiques et stipule que :

*« As any exposure may involve some degree of risk, the Commission recommends that any unnecessary exposure be avoided, and that all doses be kept as low as is **readily** achievable, **economic and social considerations** being taken into account. »* (ICRP, 1966, §52, nous soulignons)

Les considérations socio-économiques ont ensuite été précisées quelques années plus tard dans la publication 22 de la CIPR :

*« It is possible to define the point at which it can be said that a dose is as low as is **readily** achievable, **economic and social considerations** taken into account, by choosing the dose at which the economic and social gains of further reducing the dose are equal to the economic and social costs of achieving that reduction. »* (ICRP, 1973, §11, nous soulignons)

Pour ensuite devenir des facteurs socio-économiques en 1977 dans la publication 26 :

*« The limitation of stochastic effects is achieved by keeping all justifiable exposures as low as is **reasonably** achievable, **economic and social factors** being taken into account, subject always to the boundary condition that the appropriate dose-equivalent limits shall not be exceeded (see paragraphs 103-128). »* (ICRP, 1977, §10, nous soulignons)

L'évolution la plus marquante est évidemment le passage de « *readily achievable* » (facilement réalisable) à « *reasonably achievable* » (raisonnablement réalisable), ce qui laisse entendre que des efforts importants peuvent être consentis s'ils demeurent dans les limites du raisonnable. Mais raisonnable par rapport à quoi ?

Bien que la publication 22 (ICRP, 1973) associe déjà une valeur monétaire à un possible préjudice, c'est la publication 26 (ICRP, 1977) qui élabore

l'approche coûts-bénéfices à laquelle l'optimisation (et également la justification) se relie(nt), comme les extraits ci-dessous en attestent :

« (11) *Most decisions about human activities are based on an implicit form of balancing of costs and benefits leading to the conclusion that the conduct of a chosen practice is 'worthwhile'. Less generally, it is also recognized that **the conduct of the chosen practice should be adjusted to maximize the benefit to the individual or to society.***

(70) *In cost-benefit analysis the benefits are taken to include all the **benefits accruing to society**, and not just those that will be received by particular groups or individuals.*

(71) *It may thus be necessary to make subjective **value judgments** in order to compare the relative importance of the costs imposed on human health by radiation exposure with other economic and social factors. » (ICRP, 1977, **nous soulignons**)*

Ces extraits attestent sans ambiguïté de la filiation du principe d'optimisation avec l'utilitarisme. Il s'agit bien de maximiser le bénéfice (bien-être) à l'échelle collective de la société et cette évaluation peut reposer sur des jugements de valeurs.

En dépit de sa formalisation acquise depuis 1977, le principe d'optimisation est continuellement élargi dans son interprétation. En 2001, la Commission principale de la CIPR a approuvé la formation d'un nouveau groupe de travail C4 pour développer des directives sur le principe et l'application de l'optimisation de la protection radiologique. Ce travail aboutira à la publication 101 partie 2 : *The Optimisation of Radiological Protection : Broadening the Process* publié en 2006 (ICRP, 2006), un an avant la publication 103 (ICRP, 2007) qui s'en est trouvée influencée (IRPS, 2018a). Ces deux publications quasi concomitantes méritent une analyse croisée par rapport à l'optimisation.

8.2.2 La publication 101 de la CIPR

La publication 101 de la CIPR retrace la genèse du principe d'optimisation jusqu'à son application opérationnelle. Le champ d'application est la protection radiologique en général, la spécificité des stockages de déchets n'y est pas traitée. La publication expose le cheminement de pensée qui a conduit aux changements de formulation du principe et surtout aux changements dans son application. Il n'est pas fait mystère du fait que le principe a changé de statut au fil du temps, comme le montre l'extrait ci-dessous :

« The optimisation of protection has been one of the fundamental principles of the system of radiological protection since the 1970s (ICRP, 1973, 1977). While the definition of this principle has remained relatively unchanged over time, its application has evolved with feedback of its practical implementation. Initially focused on quantitative techniques, mainly cost–benefit comparisons of protective options, the optimisation process incorporated progressively operational procedures, good practices, and qualitative approaches to become a more judgmental decision-making process. » (ICRP, 2006, Executive summary)

Il est dit que le principe, tout d'abord purement quantitatif, a bénéficié des retours d'expériences lui permettant de progressivement devenir un outil d'aide à la décision. Nous verrons que cette aide à la décision s'applique en fait au domaine de la sûreté et celle-ci guide, dans notre cas, le développement des systèmes de stockages.

La publication 101 de la CIPR stipule que le principe d'optimisation est un processus qui siège au cœur d'un programme radiologique réussi et les attributs pertinents relatifs à la situation d'exposition doivent être clairement identifiés :

« (23) Implementation of the optimisation principle of protection is a process that is at the heart of a successful radiological programme. It must be framed carefully to take into account the relevant attributes of the exposure situation. Furthermore, it should include, as appropriate to the exposure situation, the involvement of the relevant stakeholders. These two features, which were introduced in

Publication 82 (ICRP, 1999), are considered by the Commission as important components of the optimization process. » (ICRP, 2006)

Remarquons que les dangers non radiologiques figurent parmi les exemples d'attributs que propose la publication 101 de la CIPR (ICRP, 101, p. 83).

La publication 101 de la CIPR établit un lien entre l'optimisation et la culture de sûreté en se créditant notamment de l'AIEA :

« (33) Optimisation is a frame of mind. The effective implementation of the process entails that all stakeholders involved know and agree with the basic assumptions of radiological protection [...]. The acknowledgement that any level of exposure can induce a risk should be the incentive to ensure that all those involved in the optimisation process are accountable for its effective implementation. Furthermore, they should adhere to an active safety culture, the key attributes of which are 'personal dedication, safety thinking and an inherently questioning attitude (...) » (ICRP, 2006, §33)

Le principe d'optimisation apparaît comme un état ou une disposition d'esprit. Toutes les parties prenantes au processus sont invitées à s'accorder sur les hypothèses de base de la radioprotection. Mais quelles sont-elles ? Est-il d'ailleurs permis de les contester ? La suite du texte nous éclaire et laisse entendre que parmi ces hypothèses, il y a les effets stochastiques aux faibles doses. Il est également question d'épouser une culture de sûreté qui suppose une manière de raisonner orientée vers la sûreté et même un dévouement personnel.

La sûreté s'invite donc explicitement dans la protection radiologique. La CIPR précise que l'exécution mécanique des bonnes pratiques ne suffit pas au développement de la culture de sûreté, comme l'atteste encore la suite du texte :

« "(33) [...] Good practices in themselves, while an essential component of safety culture, are not sufficient if applied mechanically. There is a requirement to go beyond the strict implementation of good practices so that all duties important to safety are carried out correctly with alertness, due thought and full

knowledge, sound judgment and proper sense of accountability.”
(IAEA, 1991)²³² » (ICRP, 2006, §33).

L'utilisation du vocable « sûreté » dans ces extraits de la publication 101 de la CIPR n'est pas anodine et ne résulte pas d'un abus de langage. Elle est forte de toute la connotation que lui donne l'AIEA, comme l'atteste d'ailleurs la référence explicite à l'agence de Vienne.

S'ensuivent des recommandations incluant l'application du principe BATNEEC (i.e., BAT) comme complément au principe d'optimisation avec pour particularité cependant que celui-ci n'est évoqué que pour le contrôle des effluents radioactifs :

« (35) For the control of radioactive emissions to the environment, the BATNEEC principle may be used. The principles of optimisation and BATNEEC complement each other (...) » (ICRP, 2006, §35)

La publication 101 de la CIPR confirme l'absence de seuil pour l'optimisation :

*« (7) Introduction of the concept of optimisation in the recommendations of ICRP was a direct consequence of the recognition, during the 1940s, of the so-called 'stochastic effects', coupled with **the impossibility of demonstrating the existence or nonexistence of a threshold** for this type of irreversible effects. »*
(ICRP, 2006, §7, **nous soulignons**)

*« Thus, a collective dose of one man sievert resulting from ten individual doses of 100 mSv and the same collective dose resulting from 1 000 doses of 1 mSv will not be assessed in the same way a regards monetary value, even though the potential health risk is identical from a collective point of view, given that the **hypothesis of a linear no-threshold dose–effect relationship has been adopted.** »*
(ICRP, 2006, A11, **nous soulignons**)

La meilleure option est toujours spécifique à la situation d'exposition et représente le meilleur niveau de protection qui peut être atteint compte tenu des circonstances. Il n'est donc pas pertinent de déterminer, *a priori*, un

²³² IAEA, 1991. Safety Culture. INSAG 4. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.

niveau de dose en dessous duquel le processus d'optimisation devrait s'arrêter (ICRP, 2006, p. 73).

Notons que cette absence de limite prédéfinie (l'équivalent d'un *de minimis*), bien que tout à fait justifiable dans le cadre restreint de la radioprotection, est étendue au-delà de ce contexte si le principe d'optimisation devient le moteur de la sûreté. La caractéristique de non-seuil se commue en un principe « sans fin ».

Si nous résumons les principales caractéristiques de la publication 101 de la CIPR, nous avons :

- Le principe d'optimisation est lié à la culture de sûreté.
- L'implication des parties prenantes est considérée comme une contribution importante au processus d'optimisation.
- L'utilisation du principe BAT(NEEC) est un complément au principe d'optimisation.
- Il n'y a pas de seuil prédéfini à l'optimisation.

8.2.3 La publication 103 de la CIPR

Dans la publication 103 de la CIPR, le principe d'optimisation occupe une place prépondérante, comme l'annonce d'emblée l'éditorial :

« Specifically, the principles of justification and optimisation apply universally. ICRP is of the opinion that by focusing more on optimisation, the implementation of protection for what has until now been categorised as interventions could be enhanced. » (ICRP, 2007)

Il s'agit bien d'un « renforcement » du principe d'optimisation bien que la CIPR (ICRP, 2007, p. 37), qui avait décidé d'accorder davantage d'attention aux expositions individuelles, ait tenté de revenir, début des années 2000, à une phase « de limites de doses » (Gardiner, 2008, p. 99 ; Wikman-Svahn, 2008, p. 83)

Un glissement de sens et/ou de la portée de l'optimisation de la radioprotection vers un principe de sûreté est opéré, sans explication, dans

la publication 103. Comme nous l'évoquions dans la précédente section, le principe d'optimisation se définit par rapport à la protection (radiologique) mais aussi par rapport à la sûreté :

« **Optimisation of protection (and safety)** - *The process of determining what level of protection and safety makes exposures, and the probability and magnitude of potential exposures, as low as reasonably achievable, economic and societal factors being taken into account.* » (ICRP, 2007, glossary)

Cependant, le corps du texte de la même publication redéfinit le principe d'optimisation en omettant la sûreté, de la façon suivante :

« **The Principle of Optimisation of Protection:** *The likelihood of incurring exposure, the number of people exposed, and the magnitude of their individual doses should all be kept as low as reasonably achievable, taking into account economic and societal factors.* » (ICRP, 2007, p. 89)

La même année, l'AIEA publie ses principes fondamentaux de sûreté et définit l'optimisation de la protection par rapport à l'atteinte d'un haut niveau de sûreté :

« Principle 5: 'Optimization of protection': *Protection must be optimized to provide the highest level of safety that can reasonably be achieved.* » (IAEA, 2006a)

On pourrait éventuellement objecter que ce changement semble n'être que sémantique, puisque le 5^e principe, certes de sûreté, est appelé « optimisation de la protection ». Cependant, cette optimisation n'est pas exclusivement liée aux aspects radiologiques et a d'ailleurs été clairement énoncée dans des publications ultérieures, c'est le deuxième glissement. Ce deuxième glissement (i.e. en dehors de la sphère radiologique) entérine le premier qui agrégeait protection et sûreté. Ainsi, la publication SSG-23 de l'AIEA indique, dans une section traitant de « l'impact environnemental non radiologique », que bien que les impacts non radiologiques sortent du champ d'application de la publication, les méthodes d'évaluations qui y sont

décrites peuvent s'appliquer à tout type danger (y compris les dangers non radiologiques) :

« The assessment of non-radiological impacts arising from the disposal facility will be required and governed by environmental protection legislation. This lies outside the scope of this Safety Guide. Nevertheless, the approaches to assessment described in this Safety Guide may also be of use in the assessment of hazards posed by non-radioactive waste and in optimization of protection and safety against all potential hazards. » (IAEA, 2012)

Il est donc reconnu que l'optimisation et la sûreté (de manière non agrégée) sont applicables à tous les dangers potentiels, y compris les dangers non radiologiques, comme le laissait déjà pressentir la publication 101 de la CIPR.

L'extension du champ d'application du principe d'optimisation est confirmée plus loin dans la publication SSG-23 puisqu'il s'agit d'appliquer les bonnes solutions techniques afin d'assurer la qualité de toutes les tâches liées à la sûreté tout au long du processus de développement du stockage jusqu'à sa fermeture :

*« The optimization of protection for a disposal facility is a judgmental process that is applied to the decisions made in the development of the facility design. Good engineering and **technical solutions** should be adopted, and good management principles should be applied **to ensure the quality of all safety related work** throughout the development, construction, operation and closure of the disposal facility. » (IAEA, 2012, §4.66, nous soulignons)*

Ce qui semble effectivement en adéquation avec ce que la CIPR annonçait dans sa publication 122 dédiée aux stockages (voir section 7.4.4).

8.2.4 L'observation de l'AEN

L'IGSC²³³, groupe de travail au sein de l'AEN réunissant opérateurs et régulateurs autour de la question du stockage géologique, a récemment pris officiellement acte de l'élargissement du principe d'optimisation radiologique vers la sûreté. Ce constat concède implicitement la qualité sans doute approximative du concept qui en résulte mais l'AEN en simplifie l'histoire (d'ailleurs plus ancienne qu'une dizaine d'années) et a tendance à occulter les évolutions de la réflexion dans des domaines qui n'ont jamais été totalement hermétiques l'un à l'autre :

« Optimisation of protection, as defined by the International Commission on Radiological Protection (ICRP), is regarded as a process to keep the magnitude of individual doses, the number of people exposed, and the likelihood of potential exposure as low as reasonably achievable with economic and social factors being taken into account (ICRP, 2000)²³⁴. In the past 10 years, however, there has been a trend towards a broader view of optimisation as discussed in the more recent ICRP report on radiological protection in geological disposal (ICRP, 2013). This trend was also apparent at the joint RF/IGSC workshop in 2012 (NEA, 2012d)²³⁵, where it was noted that optimisation is a way of increasing the technical quality and robustness of the whole waste management process, such that not only long-term safety requirements are met, but other factors, such as operational safety, engineering feasibility and the efficient use of resources are taken into account. » (NEA, 2020)

Une des questions posées par le présent travail de recherche consiste précisément à interroger cette « *broader view of optimisation* » dont le résultat net est effectivement celui décrit par l'AEN mais qui ne peut s'entendre par un simple élargissement de vues sans rendre des comptes à la pensée.

²³³ *Integration Group for the Safety Case.*

²³⁴ Voir (ICRP, 1998) dans les références bibliographiques de cette thèse.

²³⁵ Voir (NEA, 2012a) dans les références bibliographiques de cette thèse.

8.2.5 Regards croisés AIEA/CIPR sur l'élargissement de l'optimisation

Cet élargissement de la portée du principe d'optimisation pourrait éventuellement être interprété comme une conséquence de l'élargissement de l'expression « évaluation de la sûreté ». En effet, l'AIEA a reconnu que, dans les publications antérieures, l'expression « évaluation de la sûreté » était utilisée pour décrire une évaluation axée sur les impacts radiologiques de l'installation, alors que dans le guide SSG-23, « l'évaluation de la sûreté » va au-delà de l'évaluation quantitative des risques radiologiques et englobe la sûreté opérationnelle et le système de gestion. Le guide SSG-23 stipule que:

« This broadening of the term “safety assessment” is a logical consequence of the adoption of the broader concept of safety case as a basis for this Safety Guide. » (IAEA, 2012)

Nous pensons cependant que cette explication indirecte n'est pas entièrement satisfaisante car elle semble mélanger causes et conséquences. Le *safety case* est le produit final d'un mode de raisonnement et la compilation d'une série d'éléments dont l'évaluation de sûreté fait partie. Il peut peut-être initier de nouveaux concepts mais non sans veiller à ce que les principes sur lesquels les précédentes moutures reposaient n'aient pas été revus en conséquence. Or, c'est ce travail de réflexion conceptuelle que nous recherchons.

On pourrait donc être tenté de trouver la consignation de cette évolution (ou détournement) de la portée du principe d'optimisation quelque part entre 2007 et 2012, dans les publications de l'AIEA. Nous observons que la publication SSR-5 relative aux stockages de déchets radioactifs (IAEA, 2011b), antérieure à la publication SSG-23, entérine déjà ce glissement :

« 2.18 Optimization under constraints is the central approach adopted to ensure the safety of a waste disposal facility [6]. In this context, the optimization of protection is a judgmental process, social and economic factors being taken into account. The optimization is conducted in a structured but essentially qualitative manner, supported by quantitative analysis. » (IAEA, 2011b)

Alors que l'optimisation de la protection est rigoureusement définie dans cette même publication comme un principe radiologique, nous comprenons de cet extrait que ce serait la place centrale qu'elle occupe dans la conception d'une installation de stockage qui l'élèverait au rang d'un principe de gestion. Ce principe se structure essentiellement qualitativement et est renforcé par des analyses quantitatives. Cette dimension gestionnaire du principe d'optimisation n'est pas ce qui surprend le plus puisqu'il faut reconnaître que, même formulé en tant que principe radiologique, le principe d'optimisation taillait déjà la part belle aux facteurs socio-économiques, ceux-ci jouant un rôle dans l'évaluation des doses les plus basses qu'il est raisonnablement possible d'atteindre (ALARA).

Le principe ouvrant dès lors la porte à une appréciation d'ordre économique et sociologique laisse d'autant plus de prise à un élargissement de sa portée que la sûreté elle-même, naturellement cousine de la « protection », n'est pas univoquement définie. La référence [6] dont se crédite la publication SSR-5 de l'AIEA n'est autre qu'une publication de la CIPR, la publication 81 (ICRP, 1998), quelque peu oubliée des spécialistes tant de la radioprotection que des déchets nucléaires, au profit de la récente publication 122.

Mais avant d'aborder l'analyse de la publication 81, une autre explication indirecte de cet élargissement peut être tentée, en recourant à la définition du principe BAT(NEEC).

En effet, à la section 7.4.4, la référence au principe BAT(NEEC) dans le principe d'optimisation a été décrite comme faisant aujourd'hui partie intégrante du système de la CIPR puisque la publication 122 s'y réfère explicitement, prolongeant d'ailleurs l'idée avancée par la publication 101 de la CIPR. Dans de précédents travaux (Depaus, 2012 ; Minon et Depaus, 2013), nous avons déjà eu l'occasion d'étudier l'imbrication des deux principes et

leur rôle clé dans le développement de la capacité de sûreté/protection d'un stockage²³⁶.

Le principe BAT est défini par la directive européenne dite IPPC (*Integrated Pollution Prevention and Control*)²³⁷ comme suit :

« 'Best Available Techniques' shall mean the most effective and advanced stage in the development of activities and their methods of operation which indicate the practical suitability of particular techniques for providing in principle the basis for emission limit values designed to prevent and, where that is not practicable, generally to reduce emissions and the impact on the environment as a whole:

- 'techniques' shall include both the technology used and the way in which the installation is designed, built, maintained, operated and decommissioned*
- 'available techniques' shall mean those developed on a scale which allows implementation in the relevant industrial sector, under economically and technically viable conditions, taking into consideration the costs and advantages, whether or not the techniques are used or produced inside the Member State in question, as long as they are reasonably accessible to the operator,*
- 'best' shall mean most effective in achieving a high general level of protection of the environment as a whole. » (EC, 1996, article 2)*

²³⁶ Nous écrivions notamment : « Le principe d'optimisation devient dès lors le principe-clé de l'application de la protection aux systèmes de stockage de déchets. Cependant, il doit être compris au sens le plus large (CIPR-122, §70) [Ndla : ICRP, 2013] afin d'envisager à la fois les impacts radiologiques et non radiologiques. L'optimisation doit suivre une approche intégrée couvrant tous les composants du système, gérant tant la protection des travailleurs que celle du public et de l'environnement, maintenant et dans le futur, en se reposant essentiellement sur le fonctionnement passif du système (CIPR-122, §71, §72) [Ndla : ICRP, 2013]. Le principe BATNEEC ainsi que les bonnes pratiques en matière d'ingénierie et de gestion jouent un rôle majeur dans cet effort d'optimisation, constituant ainsi une approche plurielle sans progression définie *a priori* et ce, afin de demeurer suffisamment flexible pour impliquer les différentes parties prenantes et tenir compte des contraintes socio-économiques » (Minon et Depaus, 2013).

²³⁷ Rappelons que la directive européenne de 1996 officialise l'apocope BAT du principe BATNEEC.

Le haut niveau de protection général de l'environnement considéré comme un tout est au cœur de ce principe, c'est le sens du « *best* »²³⁸. Son adjonction au principe d'optimisation ne pouvait qu'influencer la portée de ce dernier, dans un sens plus holistique que celui qui avait présidé à son élaboration. Il semblerait que le principe BAT issu du droit environnemental, dont la pénétrance dans le droit nucléaire a été très progressive, ait longuement cheminé dans les fora d'experts, construisant au fil du temps une doctrine de pensée de plus en plus commune à la CIPR, l'AIEA et l'IPPC jusqu'à affleurer dans les publications de la CIPR. Ce cheminement nous amène finalement, sans grande surprise, à la publication 81 de la CIPR qui stipule :

*« Disposal system development activities should be based on **sound engineering principles and practices** which are proven by testing and experience to the extent feasible, considering the need for research and innovation to improve safety. »* (ICRP, 1998, §67)

C'est bien le principe BAT qu'il faut entendre dans « *sound engineering principles and practices which are proven by [...]* » et la CIPR considère alors que le principe BAT est plus proche du concept de « *sound technical and managerial principles* » (*best practice*) que du principe d'optimisation de la protection en tant que tel (NEA, 2010, p. 11). C'est d'ailleurs cet aspect de « principes techniques solides » (*sound technical principles*) qui nous a fait soutenir que la disponibilité des techniques dont il est question dans le principe BAT est également à rapprocher de la disponibilité au sens de la sûreté de fonctionnement (voir section 6.2.3). Comme le fait remarquer l'AEN, le principe BAT s'appliquant à l'environnement dans son ensemble, il s'éloigne d'un processus d'évaluation de l'exposition radiologique par rapport à une contrainte donnée.

Le principe BAT sera ainsi abondamment commenté sous différentes formulations, comme nous le fîmes remarquer dans de précédents travaux :

« Selon la revue de la littérature, l'acronyme [Ndla : BAT] peut faire référence à :

“Best Available Techniques”;

²³⁸ Nous avons déjà discuté le sens de la disponibilité « *available* » à la section 6.2.3.

“Best Available Techniques or technology”;
“Best Available Techniques and (well-founded) technology”;
“Best Available Techniques Not Entailing Excessive Costs”
(BATNEEC);
“Best practice” (“sound and technical managerial principles”)
... »
(Depaus, 2010)

Sans compter les concepts similaires auxquels il est associé et qui lui confèrent une large base d’interprétation tels que :

« Best Available Control Technology (BACT), Best Conventional Pollutant Control Technology (BCT), Best Environmental Management Practice (BEMP), Best Environmental Practice (BEP), Best Practicable Environmental Option (BPEO), Best Practicable Means (BPM), Best Practicable Control Technology Currently Available (BPT), Reasonably Available Control Technology (RACT). »
(IOMS, 2017, p. 11)

Il semble difficilement contestable que l’élaboration de la publication 81 de la CIPR ait bénéficié de l’apport de la réflexion menée dans le cadre de l’IPPC. La publication 81 de la CIPR n’est cependant pas la seule à rebondir sur le concept BAT de l’IPPC et bien qu’elle ne cherche pas encore à (totalement) l’intégrer à l’optimisation, cette publication reconnaît que l’usage du principe BAT²³⁹ peut se révéler avantageux à des fins spécifiques comme la réduction des doses reçues par l’environnement naturel (ICRP, 1998, p. 12). Avant la publication 81 et dès la parution de la directive, la publication 77 de la CIPR mentionne également le principe BAT et son origine issue de la directive européenne, mais la publication ne lui reconnaît pas encore un statut à la hauteur de l’optimisation de la protection :

« There has been increasing pressure for the adoption of policies described by labels such as best available technology or best available technology not entailing excessive cost. The term best

²³⁹ Soulignons que la CIPR établit explicitement (ICRP, 1998) le lien entre l’appellation BAT de la directive IPPC (EC, 1996) et l’appellation BATNEEC de la directive plus ancienne (EC, 1984).

available has usually implied best from the environmental view-point, regardless of cost. The addition of not entailing excessive cost brings the concept closer to the Commission's recommendation to keep doses as low as reasonably achievable, but involves costs only when they are becoming excessive. These policies fall short of achieving the optimisation of protection. » (ICRP, 1997, §7)

Depuis les premières années qui ont suivi l'introduction du principe BAT (EC, 1996), nous ne pouvons que constater l'évolution au sein du système de la CIPR, depuis la réticence originelle à son encontre jusqu'à l'adoption *in fine* de celui-ci en tant que partie intégrante de l'optimisation. Nous observons que ce qui éloignait précisément le principe BAT du principe d'optimisation de la protection selon la publication 77 et, dans une moindre mesure, la publication 81 de la CIPR (ICRP, 1997 ; ICRP, 1998) est ce qui a finalement élargi la portée de ce dernier une fois que le principe BAT y a été intégré, c'est-à-dire à partir de la publication 101 (ICRP, 2006) et jusqu'à la publication 122 (ICRP, 2013).

Les investigations menées jusqu'ici nous ont donc conduit aux publications de la CIPR parues entre 1996 et 1998, période où semble se cristalliser un changement de pensée au sein de la CIPR. Ce changement procède de la réunion de mondes différents, celui de la radioprotection et celui de la sûreté entourant la gestion des déchets radioactifs, plus que probablement sous l'impulsion de la réglementation environnementale de plus en plus présente. Cependant, cette revue historique et critique des textes ne nous donne toujours pas un fondement épistémologique irréfutable à cet élargissement de sens qui caractérise le principe d'optimisation et qui justifierait son élévation au rang d'un principe de sûreté plus englobant. Il reste donc à comprendre ce qui, conceptuellement, organise ce changement de pensée. C'est ce que nous analysons dans la prochaine section.

8.3 De la protection radiologique à la sûreté

Qu'est-ce qui distingue fondamentalement la protection radiologique de la sûreté ? Cette dernière, bien qu'apparaissant avec une portée plus large que la première, semble s'y substituer presque naturellement dans les textes, tant de la CIPR que de l'AIEA, comme si elles réalisaient une parfaite synonymie.

Stoiber, Baer, Pelzer et Tonhauser, juristes de droit nucléaire international, fournissent un élément de réponse, en énonçant trois objectifs distincts de la législation de sûreté des installations nucléaires :

« *The legislation should focus on the following three objectives:*

- *The general nuclear safety objective. It should ensure that individuals, society and the environment be protected from harm by providing for the establishment of effective defences against radiological hazards, and for monitoring (i.e. it should prevent accidents).*
- *The radiation protection objective (...). It should ensure that, during normal operations, radiation exposure due to the facility be kept below prescribed limits, and ALARA, and that the consequences of any accident be mitigated.*
- *The technical safety objective. It should ensure that all reasonably practicable measures be taken to prevent accidents, and to mitigate the consequences of any accidents that may occur and ensure that measures be taken to make the likelihood of serious accidents very low. » (IAEA,2003a)*

La sûreté comporte donc un élément contextuel englobant les conditions d'apparition (et donc de prévention) des nuisances ou préjudices dont il faut se prémunir. La protection radiologique, elle, se restreint aux moyens déployés afin d'assurer cette protection.

Il apparaît donc que la sûreté a pour champ d'application les conditions d'existence des accidents ou dommages et que la protection peut s'interpréter comme le résultat du déploiement des mesures de sûreté. Toutefois, la protection peut également désigner les moyens mis en œuvre

face à l'exposition des radiations mais sans chercher à agir sur leurs conditions d'apparition. Dans cette acception, la protection radiologique est incluse dans la sûreté alors que, dans le premier cas, elle en est un élément résultant. Nous avons déjà relevé cette ambiguïté « dehors et dedans » à la section précédente.

Un principe de sûreté est donc un principe d'action (ou de gouvernance) agissant tant sur l'occurrence des événements que sur la prévention de leurs conséquences.

Mais si, comme nous l'avons vu, le principe d'optimisation de la protection radiologique est également considéré comme un principe de sûreté et vise tant les aspects radiologiques que non radiologiques dans le cadre du développement de stockages de déchets radioactifs (IAEA, 2011b) (IAEA, 2012), alors on fait face à un double glissement :

- Celui d'un principe qui passe du contrôle des moyens (protection) à l'action sur les conditions d'apparition des phénomènes, à savoir les expositions indues aux rayonnements (sûreté),
- Celui de déborder de la sphère radiologique sur la sphère non radiologique.

Ce double glissement doit vraisemblablement puiser sa source dans la puissance d'action du principe d'optimisation que la CIPR qualifie à maintes reprises de processus de jugement au rôle central dans l'acceptabilité radiologique d'un stockage de déchets. Ainsi, la publication 81 énonce :

« It addresses the main protection issue: exposure that may or may not occur in the far future, and regards constrained optimisation as the central approach to evaluating radiological acceptability of a waste disposal system. In this context, optimisation is a judgmental process with social and economic factors being taken into account and should be conducted in a structured essentially qualitative way. [...] » (ICRP, 1998, abstract)

Elle reconnaît la portée heuristique du principe d'optimisation qui crée un « état d'esprit » ou « mode de pensée », en précisant que :

« [...] the basic role of the concept of optimisation of protection is to engender a state of thinking in everyone responsible for control of radiation exposures such that they are continually asking themselves the question 'Have I done all that reasonably can to reduce these radiation doses?' » (ICRP, 1998, § 32)

Le premier glissement – celui de la protection vers la sûreté – semble donc s'opérer naturellement à mesure que le principe d'optimisation entend déployer tout ce qui est possible pour réduire les doses. Le principe d'optimisation doit sortir du simple champ de la protection dans son sens passif pour épouser l'ambition d'action du principe de sûreté.

Le deuxième glissement a déjà été abordé dans la précédente section et vient, quant à lui, de l'adjonction du principe BAT, d'origine externe à la protection radiologique et lui-même mobilisé en raison, pense-t-on, de la complexité de l'objet à l'étude (i.e. les stockages de déchets radioactifs). Mais est-ce uniquement pour cette raison ?

On est spectateur d'un mouvement oscillant du principe d'optimisation radiologique à un principe d'optimisation de la sûreté. La sûreté s'arc-boute sur l'état d'esprit qui accompagne le principe d'optimisation radiologique, en s'associant au principe BAT, principe indispensable pour optimiser, entre autres²⁴⁰, les aspects *non radiologiques*.

Mais est-ce la seule complexité des stockages des déchets qui justifierait ce « saut » du principe d'optimisation vers la sûreté ? Autrement dit, serait-ce en raison des stockages de déchets dont il faut assurer la sûreté que le principe d'optimisation radiologique serait « étiré » en dehors de son champ d'application premier ? En effet, le stockage de déchets ne peut se réduire à l'exposition radiologique planifiée ou potentielle, il est davantage qu'une source de rayonnements. Il n'est pas qu'un « déjà là » qui constituerait un objet de la protection radiologique seule mais bien un ouvrage d'art à

²⁴⁰ La publication 81 de la CIPR considère le principe BATNEEC utile pour une réduction des doses radiologiques dans l'environnement naturel quand il n'existe pas de méthode permettant de calculer le préjudice (*detriment*) (ICRP, 1998, p. 12).

construire avec tous les défis de sûreté qui l'accompagnent. Ce serait une explication plausible mais nous ne le pensons pas. Rappelons que ce « saut » résulte de deux glissements : de la protection radiologique vers la sûreté et de la sphère radiologique vers la sphère non radiologique. L'inclusion du principe BAT au principe d'optimisation est consignée dans des publications de la CIPR à caractère général (e.g. publication 101) et non spécifiquement liées aux stockages de déchets (ICRP, 2007). Il en va de même de l'intégration de la sûreté au principe d'optimisation (e.g. publication 103). Voilà pour le *premier glissement*, celui de la protection vers la sûreté. Certes, il serait encore possible de penser que la sûreté dont il est question, celle visée par le premier glissement, serait restreinte à la sûreté nucléaire puisque ce ne sont *que* les publications de l'AIEA *spécifiques aux stockages* qui étendent explicitement l'optimisation à des aspects non radiologiques (IAEA, 2011b ; IAEA, 2012). Le *deuxième glissement*, celui opérant la transition des aspects radiologiques vers les aspects non radiologiques pourrait donc, quant à lui, être lié à la spécificité de l'objet « stockage ». Mais l'analyse plus approfondie du principe BAT, à la prochaine section, nous conforte dans l'idée que le « saut » vers la sûreté ne résulte pas que d'un « étirement » des concepts pour appréhender la question particulière des stockages. Nous pensons qu'il s'agit d'un glissement conceptuel plus substantiel. En particulier, nous appuyons notre opinion sur l'étude du lien que le principe BAT entretient avec cet autre principe de la protection de l'environnement : le *principe de précaution*.

8.4 Consanguinité des principes : BAT, précaution et optimisation

Dans la section 6.4, nous procédions à une brève incursion dans le champ du principe de précaution car le débat qui entoure sa naissance pouvait probablement contenir en germe la notion de sûreté telle que nous la concevons aujourd'hui, le risque en constituant le trait d'union.

Même si notre propos n'était pas de débattre du principe de précaution en cherchant à définir la sûreté, celui-ci réapparaît néanmoins au détour du principe BAT, puisque, historiquement, ce dernier doit sa légitimité au *principe de prévoyance*, *das Vorsorgeprinzip*, né en Allemagne dans les

années 1970 (Lannoy, 2008, p. 77). Le principe de prévoyance combinait les idées de planification et d'engagement dans la lutte contre la pollution sans disposer nécessairement de tous les fondements scientifiques quant à un possible dommage à l'environnement (Godard *et al.*, 2002). Le principe de prévoyance qui préfigurait le principe de précaution exhortait les industries à utiliser les meilleures technologies disponibles (*Best Available Technologies* ou BAT).

En juin 1972 se tient à Stockholm la célèbre conférence des Nations Unies sur l'environnement. Le premier principe de la déclaration de Stockholm affirme le droit de chacun à vivre dans un environnement sain, garant du respect de la dignité et du bien-être (Lannoy, 2008). Le principe de précaution en est encore absent mais il apparaîtra comme le 15^e principe dans la déclaration de Rio en 1992 :

« Pour protéger l'environnement, des **mesures de précaution** doivent être largement appliquées par les États selon leurs capacités. En cas de risque de dommages graves ou irréversibles, l'absence de certitude scientifique absolue ne doit pas servir de prétexte pour remettre à plus tard l'adoption de mesures effectives visant à prévenir la dégradation de l'environnement. » (Handl, 2013 ; De Sadeleer, 2000, **nous soulignons**)

Le principe BAT, consacré et formalisé en droit européen par la directive IPPC (EC, 1996), fait déjà son apparition en 1992 dans la Convention d’Ospar (EC, 1998)²⁴¹ à la même époque que le principe de précaution.

Or, le principe de précaution est aussi contenu en germe dans le principe d’optimisation, et ce depuis sa formulation initiale ALARA. Comme le souligne Sam Emmerechts, une approche de précaution se reflète dans l’application du principe ALARA dans le fait de maintenir l’exposition suffisamment basse pour maintenir la probabilité statistique des cancers (i.e. effets stochastiques) en dessous d’un niveau acceptable (Emmerechts,

²⁴¹ « 1. The use of the Best Available Techniques shall emphasise the use of non-waste technology, if available.

2. The term "Best Available Techniques" means the latest stage of development (state of the art) of processes, of facilities or of methods of operation which indicate the practical suitability of a particular measure for limiting discharges, emissions and waste. In determining whether a set of processes, facilities and methods of operation constitute the Best Available Techniques in general or individual cases, special consideration shall be given to:

(a) comparable processes, facilities or methods of operation which have recently been successfully tried out;

(b) technological advances and changes in scientific knowledge and understanding;

(c) the economic feasibility of such techniques;

(d) time limits for installation in both new and existing plants;

(e) the nature and volume of the discharges and emissions concerned.

3. It therefore follows that what is "Best Available Techniques" for a particular process will change with time in the light of technological advances, economic and social factors, as well as changes in scientific knowledge and understanding.

4. If the reduction of discharges and emissions resulting from the use of Best Available Techniques does not lead to environmentally acceptable results, additional measures have to be applied.

5. "Techniques" include both the technology used and the way in which the installation is designed, built, maintained, operated and dismantled (EC, 1998, article 2, alinéa 3, b, i + annexe 1). » (EC, 1998)

2010)²⁴². Si l'esprit de précaution ne guidait pas la protection radiologique, rien ne serait entrepris en dessous des doses déterministes²⁴³ !

Précaution, BAT et optimisation partagent donc tant des rapprochements historiques que conceptuels. Plutôt que de voir le rapprochement du principe d'optimisation radiologique avec la sûreté de façon contingente, à la faveur des stockages géologiques, nous préférons considérer que cette proximité entre l'optimisation radiologique et la sûreté a toujours existé. En témoignent le terreau conceptuel commun identifié au chapitre 6 entre la sûreté et la précaution ainsi que le lien entre la précaution et le BAT, le lien entre l'optimisation et le BAT et le lien entre l'optimisation et la précaution.

Il nous paraît devoir encore approfondir un peu le lien entre BAT et optimisation afin de comprendre si les deux glissements identifiés précédemment – de la protection à la sûreté et de la sphère radiologique à la sphère non radiologique – ne partent pas d'un même élan. Est-ce que le moteur de ce changement siège dans le principe BAT ? Le *principe de précaution* est un principe d'action qui a historiquement posé le critère BAT en vue de déployer ses effets. A mesure que le principe d'optimisation doit déborder du champ strictement radiologique en vue de s'attaquer à toutes les causes qui permettront *in fine* de réduire la dose, il s'impose non plus comme un simple principe opérationnel mais comme un véritable principe de gouvernance auquel on peut faire correspondre la portée d'un principe de sûreté. Comme signalé à la section 7.4.4, la publication 122 de la CIPR consacre une section entière au principe BAT (ICRP, 2013, section 4.8) dont l'analyse peut révéler l'osmose entre les principes BAT et d'optimisation, le critère d'action de l'un déteignant sans doute sur la nature et la portée de

²⁴² En effet, pour rappel, les effets stochastiques n'ont pas de dose seuil identifiée. Seule la probabilité (et non la sévérité) des effets augmente avec la dose. En outre, les effets stochastiques sur la santé induits par les radiations ne peuvent être distingués des mêmes effets éventuellement provoqués par une cause différente. Ce « flou » qui semble entourer les effets des radiations sur les êtres vivants et l'environnement, en dessous des doses déterministes (i.e. doses provoquant inmanquablement un spectre de symptômes s'échelonnant de la rougeur de la peau au syndrome d'irradiation aiguë entraînant la mort) est inhérent à la nature même du dommage provoqué à l'ADN des sujets irradiés. Celui-ci peut se réparer complètement ou seulement partiellement et conduire ensuite à des mutations lors de la reproduction cellulaire.

²⁴³ Heureusement, l'adage « *Absence of evidence is not evidence of absence* » est bien au cœur de l'approche de la CIPR...

l'autre. En d'autres termes, est-ce le principe BAT qui confère au principe d'optimisation sa nature de sûreté ? Cette question fait l'objet de la prochaine section.

8.5 Influence du BAT sur le principe d'optimisation : le souffle de l'action

L'analyse de la publication 122 de la CIPR donne un survol éclairant de l'évolution conceptuelle du principe d'optimisation. Une analyse paragraphe par paragraphe de cette publication est proposée ci-dessous, afin de rendre compte de cette évolution ainsi que de la progressive imbrication du principe BAT. Sans remonter aux origines du principe d'optimisation, la publication 122 de la CIPR prend pour point de départ sa portée strictement opérationnelle :

« (69) The principle of optimisation is defined by the Commission (ICRP, 2006, 2007) as the source-related process to keep the likelihood of incurring exposures (where these are not certain to be received), the number of people exposed, and the magnitude of individual doses as low as reasonably achievable, taking economic and societal factors into account. The general recommendations for the optimization process are described in Publication 101 (ICRP, 2006). » (ICRP, 2013, §69)

Une portée strictement opérationnelle donc, liée à la manipulation des sources radioactives (*source-related process*) dans différents environnements (médical, industriel), qui se voit étendue dès lors que le principe s'applique au cas des stockages :

« (70) The ICRP principle of optimisation of radiological protection when applied to the development and implementation of a geological disposal system has to be understood in the broadest sense as an iterative, systematic, and transparent evaluation of options for enhancing the protective capabilities of the system and for reducing impacts (radiological and others). » (ICRP, 2013, §70)

Ainsi le principe d'optimisation déborde de son champ d'application et s'assortit d'une méthodologie qui contribue à le définir : systématique, itératif et transparent. Mais la CIPR ne s'arrête pas là et relie son principe à l'objectif de sûreté tel que défini par l'AIEA :

« The fundamental safety objective is to protect people and the environment from harmful effects of ionizing radiation. » (IAEA, 2006)

Ainsi, il apparaît explicitement dans l'extrait suivant de la publication 122 de la CIPR :

« (71) Optimisation of protection has to deal with the main aim of disposal systems, i.e. to protect humans and the environment, now and in the future, by containing the radioactive substances in the waste to the largest extent possible and by isolating the waste from man, the environment and the biosphere. Optimisation of protection has to deal with the protection of workers, the public and the environment during the time of operation, as well as with the protection of future generations including possible periods of no oversight. In the long term and particularly, in the latter period, safety has to be ensured by the legacy of a passively functioning disposal system. » (ICRP, 2013, §71)

Il est remarquable de constater que le principe d'optimisation reprend non seulement à son compte l'objectif fondamental de sûreté mais qu'il lui confère également, de façon explicite, une portée temporelle très large. Cette visée future à laquelle la sûreté semble presque subordonnée, *« In the long term and particularly, in the latter period, safety has to be ensured [...] »* englobe un principe de sûreté particulier qui est fondamental pour les stockages, celui de la sûreté passive...

La juxtaposition de ces trois paragraphes de la publication 122 de la CIPR nous met donc en face d'un principe opérationnel à visée future, auquel on subordonne la sûreté et dans lequel on introduit un autre principe de sûreté, celui de la sûreté passive, qui lui sert de modalité d'application.

« (72) The stepwise decision process for geological disposal system development and implementation constitutes the framework for the optimisation process. As a central component, optimisation and the

application of Best Available Techniques have to cover all elements of the disposal system in an integrative approach [i.e. site (including host rock formation), facility design, waste package design, waste characteristics] as well as all relevant time periods. » (ICRP, 2013, §72)

Le principe d'optimisation est érigé au centre du processus de décision étagé du stockage géologique, position centrale qu'il partage avec le principe BAT afin de déployer une approche intégrée (intégrative) censée couvrir tous les éléments de développement du système. Ce paragraphe de la publication 122 de la CIPR consacre les deux principes comme le cœur du développement du système de stockage, aucun élément de celui-ci n'échappant à l'application de ce duo de principes fondateurs. Difficile, à la lecture de ces recommandations de la CIPR, de contester la vision prônée par l'AFCN et illustrée figure 8-1 qui fait du principe d'optimisation le moteur de l'approche de sûreté. Sur ce schéma, l'optimisation apparaît dans la stratégie de gestion (*management strategy*) mais aussi en tant que processus de mise en œuvre de la stratégie de sûreté. En effet, la flèche « *optimization process* » relie la stratégie de sûreté à son implémentation. Sur la base des résultats de celle-ci, on évalue s'il y a ou non nécessité d'améliorer la stratégie de sûreté. Dans l'affirmative, une itération supplémentaire a lieu. Pour aboutir au stockage final, il faut deux conditions : 1) que les résultats de l'implémentation de la stratégie de sûreté fournissent des arguments et des preuves de sûreté jugés satisfaisants 2) que la stratégie de sûreté, dont les choix stratégiques évoluent avec le temps du projet, soit en adéquation avec ces résultats. Il est remarquable d'observer que le principe d'optimisation figure à la fois au sein de la stratégie de sûreté (cadre bleu) par le biais de la stratégie de gestion, dans les conditions de bord telles que « radiation safety » qui englobe implicitement l'optimisation en tant que principe radiologique, et comme processus moteur de l'approche de sûreté gouvernant les itérations de la stratégie de sûreté et de sa mise en œuvre

L'optimisation, selon l'AFCN, est ubiquiste : l'optimisation est un principe radiologique contraignant la stratégie de sûreté, elle est aussi un principe de gestion au sein de la stratégie de sûreté et constitue enfin un méta-principe gouvernant les itérations successives de la stratégie de sûreté jusqu'à l'obtention du stockage final.

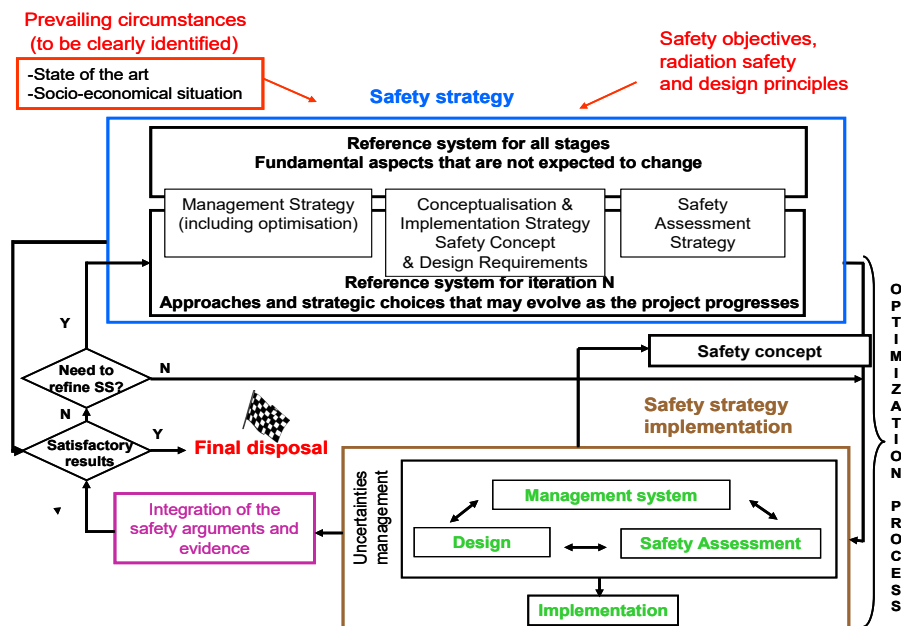


Figure 8-1 – Représentation de la stratégie de sûreté soulignant l'importance du principe d'optimisation comme moteur de l'approche globale de la sûreté, selon l'AFCN (réunion du 22/03/2011), (AFCN, 2011e). Y et N désignent respectivement « yes » et « no » aux niveaux des boîtes interrogatives. SS désigne la Safety Strategy.

Poursuivons :

« (73) Optimisation of protection is the responsibility of the developer, and involves liaison with safety and environmental protection authorities, local communities, and other stakeholders; multiple decisions have to be taken. Therefore, it is not possible to define, a priori, the path for a sound optimisation process for a geological disposal system, or the success criteria for the end result of an optimisation process.

(74) Socio-economic factors (including policy decisions and societal acceptance issues) can bound the optimisation process to various extents, such as by limiting the available options (e.g. siting) and/or by defining additional conditions (e.g. retrievability). It is important that these considerations are identified in a manner transparent to all involved stakeholders, and that their safety implications are

generally and broadly understood (OECD/NEA, 2011). » (ICRP, 2013, §73, §74)

Les paragraphes 73 et 74 de la publication 122 de la CIPR élaborent le principe d'optimisation sur l'évidence que celui-ci est un principe moteur du développement du système. S'il devient aujourd'hui impossible de baliser *a priori* l'optimisation du système et que celle-ci est également contrainte par des facteurs socio-économiques, tout en s'appliquant au choix du site et à des considérations telles que la récupérabilité, nous constatons clairement que le principe d'optimisation est définitivement sorti de sa sphère opérationnelle stricte qui l'avait vu naître dans le champ de la protection radiologique. Pour s'en convaincre, la CIPR précise encore que cette optimisation sera différente selon les phases du projet de développement du stockage (phases pré-opérationnelle, opérationnelle ou post-opérationnelle) tel que l'illustre encore le paragraphe suivant :

« (76) The process of optimisation is considerably different for the pre-operational, operational, and postoperational phases [...] » (ICRP, 2013, §76)

Même si le principe d'optimisation s'essouffle en phase post-opérationnelle c'est-à-dire lors de la fermeture du stockage, il reste néanmoins applicable et les améliorations suggérées par la CIPR font directement allusion au principe BAT comme l'explicite le paragraphe suivant :

*« (77) Nearly all aspects of optimisation for the postoperational phase must occur prior to waste emplacement, largely in the siting and design phase, with the plans to close the facility being part of the design phase. Some further optimisation of the protection that will be provided during the postoperational phase is still possible during the operational phase; for example, **new materials or techniques may become available**. Experience gained during the closure of parts of the facility (e.g., sealing of disposal rooms) can lead to improvements in planning for the closure of the overall facility. » (ICRP, 2013, §77, nous soulignons)*

Lorsque le système glisse progressivement en phase de sûreté passive, l'optimisation reste toujours d'application et, bien qu'elle porte *a priori* sur toutes les composantes et toutes activités au sein du stockage, elle se restreint aux seuls surveillance et monitoring.

« (78) During the post-operational phase, there is no active operation of the disposal system. The waste is emplaced and the protection of humans and the environment is mainly based on the passive isolation and containment capabilities of the disposal system. Hence, decisions on optimisation in the post-operational phase can only relate to provisions of indirect oversight of the closed disposal system. » (ICRP, 2013, §78)

Le principe d'optimisation devient donc, avant toute chose, un état d'esprit à cultiver dans le chef du bâtisseur et de l'exploitant du stockage géologique. Le paragraphe (79) de la publication 122 de la CIPR parachève cette pensée en tempérant la pertinence de la dose (radiologique) dans les évaluations d'impact si celles-ci portent sur le très long terme :

*« (79) Geological disposal facilities are sited, designed, and implemented to provide for robust long-term isolation and containment, resulting in potential impacts on humans and the environment only in the very distant future. Consequently, as explained earlier, **the assessment of post-closure radiological impacts through the estimation of effective dose or risk to a reference person, given the increasing uncertainties with time and the cautious assumptions to be made, can only provide an indication** or illustration of the robustness of the system, rather than predictions of future radiological consequences. Thus, when considering the distant future, dose and risk values lose their intrinsic meaning and only retain a value as relative comparators of potential radiological impact. » (ICRP, 2013, §79, nous soulignons)*

La CIPR réaffirme ici une pensée qui constitue un tournant remarquable. Le concept de dose, qui suppose des voies de contamination définies pour être correctement évaluée, ne peut s'appliquer compte tenu de l'incertitude du très long terme. Les biosphères du futur étant spéculatives tout autant que le seront d'ailleurs les récepteurs, le concept de dose perd toute sa pertinence. Or, initialement, c'est bien à la dose que le principe

d'optimisation est étroitement chevillé. Ce principe qui puisait sa légitimité dans l'abaissement de la dose alors qu'il n'était encore que le principe ALARA se voit, par les développements successifs que nous venons d'exposer, élevé au rang de méta-principe régissant le développement d'un système dans tous ses aspects et par là même, détaché du concept de dose radiologique qui en constituait pourtant l'essence.

Cette observation mérite qu'on s'y attarde quelque peu. Que le concept de dose soit inopérant sur le très long terme est une évidence scientifique, la conclusion s'imposant par l'explosion des incertitudes sur les très longues échelles de temps. Que cette dose demeure néanmoins un des principaux indicateurs dans les analyses de sûreté est en soi l'objet de débats mais il est, selon nous, plus remarquable encore que cette concession n'ait pas mené à remettre en question les fondements mêmes du principe. Plus exactement, les fondements du principe d'optimisation ont certes été revisités puisque celui-ci, en devenant un méta-principe de gestion ou une règle de gouvernance, a gagné une valeur holistique qui ne lui était pas initialement reconnue, mais ces changements ont toujours contribué à un élargissement de portée et, dirons-nous, ont accentué le glissement de sens. Il fallait certainement sortir de l'étroitesse de la seule protection radiologique quand il s'agissait d'envisager des objets comme les systèmes de stockage, mais pourquoi l'idée même d'optimiser ne pouvait-elle pas, à son tour, être questionnée ? L'agrandissement de la portée du principe procède d'un changement de paradigme qui n'a jamais été justifié par la CIPR si ce n'est par le souci implicite de garantir la sûreté au nom du « mieux faire ». Cette sûreté qui, comme nous le montrent le rapport de nos différentes investigations, n'est jamais introduite comme prémisse rigoureuse mais seulement comme un lieu commun ou une *habitude intellectuelle* (Bachelard, 1999).

Quand on songe à sa genèse, le principe d'optimisation peut conduire à d'apparents paradoxes :

*« It should be noted that a fully optimized system may result in a distribution of doses where some are above the reference level. »*²⁴⁴

Il s'agit ici d'une question d'échelle. Le principe ALARA appliqué à un système peut présenter une distribution de doses dont certaines dépasseront les niveaux de référence. Si la conclusion supra semblera s'imposer naturellement à l'esprit scientifique – l'optimisation du tout n'équivalant pas à l'optimisation des parties –, le parcours de pensée qui mène à cet élargissement de la portée du principe est, selon nous, contestable et ne sera pas sans conséquence. Concéder que la dose ne sera plus qu'un indicateur parmi d'autres dans l'évaluation de la sûreté à long terme des stockages semble, outre son évidence intellectuelle, procéder d'un certain pragmatisme laissant une ouverture à d'autres arguments de sûreté. Toutefois, maintenir l'idée de pouvoir optimiser un système, en rendant, par définition, toutes ses dimensions commensurables, c'est-à-dire en reflétant celles-ci dans une même fonction d'utilité^{245, 246} comme le ferait un économiste et ce, sans avoir analysé les difficultés d'une montée en échelle conceptuelle, sous-tend un mode de pensée qui pourrait s'opposer au pragmatisme évoqué. Cette tension au sein du principe d'optimisation est au cœur des textes de la CIPR et est relayée par ceux de l'AIEA. En d'autres termes, alors que le principe d'optimisation se voit progressivement vidé de sa substance par rapport à la protection radiologique qui l'a mis sur pieds, son cadre de réflexion s'élargit, conduisant à un mode de pensée holistique par rapport au système de stockage mais sans pour autant avoir été légitimé

²⁴⁴ Au moment d'écrire ces lignes, ce nouvel opus de la CIPR, consacré aux stockages de surface, n'est pas encore publié. Participant aux travaux liés à son élaboration, il nous est néanmoins possible d'en rapporter le cœur des discussions. Sa référence provisoire est TG-97.

²⁴⁵ L'utilité se définit comme la satisfaction des besoins (Marcus Vitruvius Pollio cité dans Lannoy, 2008), par le bien-être ou *welfare* selon des philosophes utilitaristes comme Jérémy Bentham ou John Stuart Mill (Arnsperger et Van Parijs, 2003). En économie, on définit l'utilité d'un bien par l'aptitude à satisfaire un besoin (Vander Eycken et Capron, 1992). La demande d'un bien (les quantités demandées de ce bien) sont fonction du prix de ce bien, du revenu des consommateurs, de l'utilité reconnue du bien et les prix de ses différents substituts. Ladite fonction est appelée fonction d'utilité.

²⁴⁶ Voir aussi section 7.4.2, définissant l'utilité comme un concept collectif à l'origine du principe ALARA.

intellectuellement. Cette montée en puissance du principe d'optimisation a laissé en creux une aporie qui, nous le soutiendrons, est le germe d'un conflit de rationalités (voir section 8.6).

A défaut de justifier rigoureusement l'élargissement de la portée du principe d'optimisation qui va de pair avec sa perte de substance, la CIPR fournit les modalités pratiques à l'application de celui-ci en lui accolant le principe BAT dont la compréhension est moins controversée.

*« (80) The elements guiding or directing the **optimisation process** should be those that directly or indirectly determine the quality of the components of the facility as built, operated, and closed, where quality refers to the capacity of the components to fulfil the safety functions of containment and isolation in a robust manner. The assessment and judgement of the quality of system components essentially includes the site characteristics, **elements of Best Available Technique, as well as the concepts of good practice, sound engineering, and managerial principles**. These elements complement and support radiological optimisation when potential impacts in the distant future have to be dealt with. »*

*« (82) When dealing with safety in the more distant future, **optimisation can be complemented and supported by applying the concept of Best Available Technique on the various levels of the disposal system**, through:*

- the methodologies for identifying and selecting the methodological and scientific programme of site characterisation in order to assess its containment and isolation capacities now and in the distant future;*
- the development of the system design, including the choices of materials and technologies, and the way they will contribute, individually and together, to the main aim of containment and isolation, taking due account of the characteristics of the site;*
- the integration of waste, site, and design characteristics within one disposal system and the iterative assessment of the containment and isolation capacities of the system as a whole; and*

- the use of sound managerial and engineering methods and practices during system construction, operation, and closure, within an integrated management system. » (ICRP, 2013, §80, §82, nous soulignons)

On ne peut s'empêcher de relever quelques curiosités dans ces assertions : « *When dealing with safety in the more distant future, optimisation can be complemented and supported by applying the concept of Best Available Technique on the various levels of the disposal system* », en quoi serait-ce différent d'une optimisation étendue ? Ne s'agit-il pas ici d'une décharge de responsabilité sur le principe BAT qu'au fond, les radioprotectionnistes ne maîtrisent pas et qu'ils ne considèrent d'ailleurs pas comme partie intégrante de leur discipline ? Ou encore : « *the development of the system design, including the choices of materials and technologies, and the way they will contribute, individually and together [...]* », ouvrant la porte à un tout est possible, à la fois ensemble et individuellement... Néanmoins, par le truchement du principe BAT, l'optimisation gagne en matérialité et revêt des modalités pratiques. Comme elle avait perdu sa portée opérationnelle du monde de la protection radiologique pour devenir une « manière de penser », elle se devait, pour ne pas être qu'un vœu pieux, retrouver un ancrage dans le réel. Le principe BAT souffle donc l'action au cœur du principe d'optimisation et en constitue son bras armé.

8.6 Schizophrénie de l'optimisation : vers une rationalité multiple ? Conséquences pour le stockage

La poursuite de la lecture de la publication 122 de la CIPR, plutôt que de clarifier les curiosités relevées à la section précédente, aura tendance à augmenter la perplexité du lecteur. En effet, la CIPR maintient une autre dualité au sein du principe d'optimisation, celle issue de la stricte protection radiologique et celle, plus large, portant sur le développement du système :

« (83) ***Optimisation on the basis of radiological criteria (effective dose and risk) is an important part of the optimisation of the design and implementation process of the disposal system at specific***

periods and for specific aspects of the disposal system (e.g., when operational safety is assessed during the design development steps, and during preparation and implementation of operational procedures and activities). » (ICRP, 2013, §83, **nous soulignons**)

Mais c'est par le maintien de cette dualité que la CIPR reconnaît aussi avoir changé la nature même du principe d'optimisation, ou plutôt en avoir extrapolé une version étendue en parallèle du principe radiologique. Par ces deux principes – nous dirons le grand et le petit, à la fois dans le temps et l'espace, le petit s'appliquant à la manipulation de sources dans la temporalité de l'opération et le grand s'appliquant au développement d'un système aussi complexe qu'un stockage à une échelle de temps géologique –, la CIPR promeut bien un état d'esprit, voire deux *rationalités* au nom du principe d'optimisation. Il nous paraît dès lors plutôt normal que les régulateurs, censés être au plus près des textes, épousent cette déclaration d'intention qui pousse à l'optimisation du système dans tous ses composants. Il n'en demeure pas moins que la légitimité de ce raisonnement se doit d'être questionnée.

Le principe BAT n'est plus mentionné dans le paragraphe suivant mais une méthodologie séquentielle est proposée pour appliquer le principe d'optimisation :

*« (84) The way in which the various elements of a disposal system can be optimized in an integrative manner during system development varies to a large extent. First of all, **stepwise optimisation** decisions mainly have to be taken in **chronological order** (e.g. the decisions on the choice of a host rock and on one or a limited number of sites are often prior to decisions on a detailed design). **For the selection of a site, a balance has to be struck between technical criteria related to the safety of a disposal system** (long-term stability, barrier for radionuclide migration, absence or presence of natural resources in the vicinity), **and local or supralocal economic and societal factors. Favourable sites can, in a first step, be identified on the basis of broadly defined 'required qualities', taking due account of the containment and isolation function(s) of the natural barriers and the natural environment in the disposal system.** »* (ICRP, 2013, §84, **nous soulignons**)

Le paragraphe 84 ouvre ainsi toutes les boîtes de Pandore : les critères techniques doivent entrer en équilibre avec les autres facteurs tels l'économie locale ou supra-locale ainsi que les enjeux sociétaux, sans préciser comment un tel équilibre peut être atteint. Une approche progressive ou étagée (*stepwise*) doit être appliquée en définissant *ab initio* une série de qualités requises qui tiendraient dûment compte des propriétés de confinement et de robustesse du stockage, sans préciser ce que « dûment » pourra signifier en pratique. L'ordre chronologique dans le processus décisionnel est suggéré, faisant du choix de la roche hôte le premier sujet du principe d'optimisation dans le cas d'un stockage géologique, si l'on en croit les exemples fournis entre parenthèses.

Une telle recommandation laisse donc une grande place à l'interprétation et au dialogue entre toutes les parties concernées, afin de définir les équilibres et comment tenir dûment compte des propriétés essentielles du stockage... Mais cette largesse de vue pêche une nouvelle fois par manque de rigueur. Une optimisation qui procède par étapes, non pas de façon itérative sur un système envisagé comme un tout dès le commencement mais bien sur une partie du système auquel on adjoint d'autres parties au fur et à mesure des connaissances, revient à postuler que l'optimisation des parties de ce système conduira *de facto* à l'optimisation de l'ensemble de celui-ci. Or l'optimisation n'a pas un caractère simplement additif.

Pour s'en convaincre, prenons de la distance par rapport au monde des stockages de déchets et choisissons un exemple familial. Un constructeur de voitures qui partirait de l'idée de vouloir développer le moteur le plus puissant possible pour ensuite chercher à le placer dans une carrosserie qui aurait le meilleur coefficient de traînée possible, tout en envisageant la suspension la plus confortable et une ergonomie d'habitacle élevée pouvant accueillir agréablement une famille nombreuse ferait faillite avant de pouvoir sortir le premier véhicule de son usine. Le volume familial du véhicule ne pourra que difficilement s'harmoniser avec le plus bas C_x ²⁴⁷ tout comme la suspension la plus moelleuse aura du mal à soutenir les

²⁴⁷ Coefficient de traînée où $C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho v^2 S}$, avec F_x = force de traînée avec sa composante dans le sens du vecteur vitesse, ρ , la masse volumique du fluide, v , la vitesse de l'objet relativement au fluide et S , la surface de référence. Le C_x est un nombre adimensionnel.

prétentions les plus sportives de l'automobile. Toutes ces notions sont contradictoires (Ben Mena, 2000). L'optimisation d'un tel véhicule n'est en réalité possible qu'au départ d'une esquisse qui entrevoit, dès le départ, l'ensemble des dimensions qui serviront la fonction d'utilité de l'engin, c'est-à-dire ce pour quoi il est initialement imaginé. C'est l'ensemble de ces dimensions qui sera constamment ajusté afin d'atteindre l'équilibre entre toutes les composantes non sans, le plus souvent, avoir dû faire pas mal de concessions. La solution du système d'équations auquel ce genre d'optimisation se soumet résulte le plus souvent d'un trop grand nombre de contraintes pour les degrés de liberté qui sont offerts. C'est le relâchement d'un certain nombre de contraintes qui permet la solution, solution qui résultera toujours d'un optimum local mais jamais global²⁴⁸. C'est ce qu'exprime, en d'autres termes, William Edwards Deming, en prenant pour exemple de système parfaitement optimisé un orchestre symphonique :

« An example of a system, well optimized is a good orchestra. The players are not there to plays solos as prima donnas, each one trying to catch the ear of the listener. They are there to support each other (...) The obligation of any component is to contribute its best to the system, not to maximize its own production, profit, or sales, nor any other competitive measure. » (Deming, 1991, pp. 10-11)

Optimiser chaque composant dans l'espoir de trouver l'optimum du système reviendrait à faire de chaque musicien de l'orchestre des solistes de haut vol mais leur mise en commun pourrait davantage conduire à une cacophonie qu'à un résultat harmonieux. La méthode consistant à optimiser l'ensemble du système en renonçant à l'optimisation de chacun de ses composants est d'ailleurs un principe repris par la NASA (Grenville *et al.*, 2004).

Le texte de la CIPR laisse pourtant à penser que c'est bien l'optimum global – entendu ici comme la somme des optimisations de tous les composants pris individuellement – qui doit être recherché et cette illusion ne peut

²⁴⁸ Et l'optimum global n'est pas égal à la somme des optima locaux. Le paradoxe apparent de l'optimisation locale est même la dégradation de la performance globale et inversement, pour améliorer la performance globale, il est souvent nécessaire de dégrader volontairement une performance locale (Hohmann C., Théorie des contraintes). <http://christian.hohmann.free.fr/index.php/theorie-des-contraintes/les-basiques-de-la-theorie-des-contraintes/107-la-devise-de-la-toc-> [Consulté le 17 août 2021].

qu'être entretenue par l'approche séquentielle ou chronologique que la CIPR semble recommander dans son paragraphe 84. L'effet pervers d'une telle approche réside dans la légitimité que nous pourrions spontanément lui reconnaître en raison des incertitudes qui entourent le développement d'un tel système.

La recherche menée dans le cadre du développement des stockages est, en effet, itérative dans son approfondissement. Elle procède (aussi) par étapes, ce qui, à vrai dire, n'est pas forcément la même chose. Une approche par étapes peut s'envisager dans une progression constante, élément par élément, alors qu'une approche itérative peut s'envisager sur un tout sur lequel on revient constamment jusqu'à l'aboutissement. Le flou qui entoure ces vocables ne rend pas justice à la rigueur qu'exige pourtant le développement du système. Quoi qu'il en soit, à n'importe quel moment du processus, un grand nombre d'incertitudes demeurent ou se découvrent. Quoi de plus naturel au premier abord, prenant acte de celles-ci, que de recommander une approche prudente qui viserait à maîtriser un composant à la fois ? Puisque la connaissance globale du système semble impossible d'emblée, l'optimisation, que l'on tient pour principe directeur de développement, ne peut s'appliquer que sur les parties connues au fur et à mesure qu'elles se présentent. L'approche par étapes semble ainsi gagner sa légitimité puisqu'il ne semblerait pas possible, dans un tel contexte d'incertitude, d'envisager son application autrement.

Ce raisonnement nous paraît néanmoins fallacieux. D'une part, parce que la difficulté pratique de l'application d'un principe d'optimisation en climat d'incertitudes ne peut pas justifier le changement de la nature même du principe ou le changement de ses propriétés. L'optimisation n'en demeure donc pas moins non additive (Boussaïd, 2013, p. 9 ; Imoussaten, 2011, p. 228) et nous ne pouvons pas faire semblant d'oublier cette propriété intrinsèque au prétexte qu'il est plus facile, en pratique, de l'ignorer. D'autre part, la démarche itérative et par étapes n'exclut pas le fait que l'on parte de l'esquisse d'un tout qu'on viendrait améliorer itérativement. Cette amélioration n'est certes pas uniforme ou homogène à tout instant, ce qui nécessite des ajustements réguliers, mais il n'en demeure pas moins qu'une vision d'ensemble nous paraît indispensable, dès l'entame du processus.

Malgré notre objection, d'aucuns trouvent cependant cette logique de petits pas imparable. Au-delà du possible obstacle épistémologique, ce mode de pensée trahit, selon nous, une rationalité qui fait une analogie entre le processus de découverte (la recherche scientifique) et la conception du stockage tributaire de cette recherche (son résultat). Nous détaillerons ce que ce genre de rationalité implique dans la section suivante (voir section 8.7). Or, rien ne garantit la symétrie entre le processus de recherche et le processus de conception de l'objet qui bénéficie des résultats de cette recherche. L'un procède de l'évolution de la connaissance et l'autre d'une réalisation d'ingénierie. Certes, cette réalisation d'ingénierie est fonction de la connaissance scientifique des mécanismes à l'œuvre au sein du stockage tout autant que de la connaissance technique des matériaux qui viendront contribuer à confiner les déchets mais cela ne veut pas dire que cette conception doit suivre les mêmes circonvolutions que le développement de la connaissance. Le raisonnement qui consisterait à soutenir que les éléments du système doivent être optimisés au fur et à mesure que les incertitudes de la connaissance qui lui sont relatives se réduisent procéderait, selon nous, d'une erreur qui consisterait à confondre le processus de recherche avec le processus de développement du résultat. Bien sûr, on pourra dire que les incertitudes sont ubiquistes, elles gagnent tant la connaissance fondamentale sur laquelle le projet de stockage s'appuie que les données techniques sur lesquelles repose sa réalisation. Il n'est pas fait de distinction au sein des incertitudes pour justifier la prudence « pas à pas » et précisément... c'est bien ce qui nous heurte. Hisser l'étendard de l'incertitude pour justifier une approche séquentielle de l'optimisation n'est pas recevable même si elle peut partiellement se comprendre.

D'aucuns s'étonneront que la CIPR, en son paragraphe 85, s'aventure dans la question du choix de site alors que celui-ci ne sera que très peu lié aux facteurs radiologiques. Précisément ! La CIPR, tout comme le principe d'optimisation, déborde sans retenue de la sphère radiologique.

« (85) If several suitable sites can be identified and evaluated, the decision in favour of one specific host rock or site will always be a multifactor decision, based on both qualitative and quantitative judgements. Radiological criteria (e.g. calculated effective dose or risk) are often of limited value for this multifactor decision due to: (1) the increasing uncertainties for longer assessment time scales,

and (2) the observation that calculated radiological design-basis impacts are often so low that they do not constitute a discriminating factor for the choice of a site. » (ICRP, 2013, §85)

On pourra toujours défendre une telle audace en arguant que seule la CIPR est véritablement habilitée à relativiser l'importance des critères radiologiques dans ce contexte précis. Admettons. Les incertitudes sont nombreuses sur les longues échelles de temps et la dose effective ainsi que le risque perdent leur pertinence dans le choix du site. Que reste-t-il alors comme base de jugement ? La CIPR invoque le principe de robustesse en le reliant à l'optimisation comme discuté au chapitre 7 (voir section 7.4.5). Plus particulièrement, comme l'illustre le paragraphe 86 de la CIPR que nous répétons ci-dessous, la CIPR souligne l'importance de l'évaluation des contributions relatives des différents composants aux objectifs globaux du système, à savoir le confinement et l'isolation :

« (86) Assessment of the robustness of the disposal system can contribute to system optimisation because it provides insight, quantitative or qualitative, into the performance of the disposal system and its components, and into the relative contributions of the various components to the overall system. Therefore, the value of such an assessment for the optimisation process is mainly through the insights it provides on the relative contributions of the various components to the overall system objectives of containment and isolation, and how these contributions can be affected by disturbing events and processes or by remaining uncertainties. The uncertain nature of calculated effective dose and risk that is estimated to arise in the very distant future reduces their usefulness for the optimisation process. » (ICRP, 2013, §86)

Ce paragraphe de la CIPR tend ainsi à faire de l'analyse de sûreté, qui englobe le calcul des indicateurs de performances, une contribution au processus d'optimisation et non le contraire. Le principe d'optimisation est une fois encore renforcé dans son statut de méta-processus.

Peut-être plus encore qu'un méta-processus, l'optimisation tend même à phagocytter la sûreté dans la mesure où les évaluations de sûreté constituent une entrée au processus d'optimisation. Même si ceci peut se concevoir en

pratique, il s'agit néanmoins d'une curiosité conceptuelle. Nous la retenons comme *troisième glissement*.

En conclusion de cette analyse de la publication 122 de la CIPR, il apparaît que ce n'est pas le principe BAT qui confère au principe d'optimisation son statut de principe de sûreté mais c'est bien lui qui rend cette transformation possible. Alors que le principe d'optimisation perd sa substance propre en quittant le domaine restreint de la protection radiologique en phase opérationnelle (principe ALARA) pour devenir un certain état d'esprit qui préside au développement du système de stockage, le principe BAT, plus simple et moins controversé, lui redonne une matérialité qui permet son application pratique.

Toutefois, la CIPR, en préconisant une optimisation séquentielle en lieu et place d'une optimisation du système comme globalité, crée de façon sous-jacente une aporie au sein du principe d'optimisation sur laquelle ne manqueront pas de buter différents types de rationalité. Enfin, rappelons que le glissement du principe radiologique vers le principe de sûreté n'a toujours pas trouvé ici de légitimation.

Après avoir commenté la nature et la portée du principe d'optimisation, il nous faut terminer l'analyse par la critique de sa mise en œuvre. La section suivante interroge donc les limites épistémologiques des techniques d'aide à la décision qui soutiennent la mise en œuvre de l'optimisation.

8.7 Techniques d'aide à la décision et optimisation : aux confins de l'utilité

« Lorsque que nous avons à concevoir des systèmes aussi complexes que des villes, ou des bâtiments, ou des économies, nous renonçons à l'ambition de créer des systèmes qui optimiseraient quelque hypothétique fonction d'utilité. » (Simon, [1969] 2004, p. 233)

La publication 101 de la CIPR dédiée à l'optimisation décrit les techniques d'aide à la décision, c'est-à-dire une aide au choix d'options, celles-ci prenant place dans un contexte sociotechnique large, impliquant différents preneurs d'enjeux.

Le choix se fait à la suite d'une comparaison des options de protection. Il s'agit d'une caractéristique clé du processus d'optimisation, qui doit impliquer un examen attentif des caractéristiques de la distribution de l'exposition individuelle au sein d'un groupe de population exposé²⁴⁹ (ICRP, 2006). Cependant, un seul paramètre d'exposition est généralement insuffisant pour comparer pleinement les différentes options de protection.

Les techniques d'aide à la décision décrites dans l'annexe de la publication 101 de la CIPR contrastent avec les recommandations générales de l'opus sur la prise en compte large du contexte et des preneurs d'enjeu. La description y est extrêmement instrumentale et évoque un procédé de rabattement au sens que la psychologie peut donner à ce mot²⁵⁰

²⁴⁹ Chaque groupe de population affecté par une source peut être décrit par différents attributs tels que l'âge, le sexe et les habitudes, ainsi que par divers paramètres d'exposition, tels que les doses individuelles moyennes, minimales et maximales, le nombre d'individus exposés, la dose collective et la probabilité d'une exposition potentielle (ICRP, 2006).

²⁵⁰ Le rabattement est un procédé graphique, que l'on trouve dans de nombreux dessins d'enfants. Il consiste à dessiner dans un même plan des objets ou des surfaces qui ne le sont pas dans la réalité. Il s'agit, par exemple, de représenter à la fois le sol et les murs d'une pièce, ou encore, le plateau et les quatre pieds d'une table (<https://carnets2psycho.net/dico/sens-de-rabattement.html>, [Consulté le 4 décembre 2019]).

Parmi les méthodes d'aide à la décision préconisées par la CIPR, on retrouve :

- l'analyse coût-bénéfice (la première méthode historiquement),
- la méthode coût-efficacité (*cost-effectiveness*),
- l'analyse multicritères (*multi-attribute analysis*).

La mise en œuvre du principe d'optimisation est en fait très simple : après avoir identifié et évalué les situations d'exposition et leurs risques, les solutions de protection sont identifiées. Ensuite, la meilleure des solutions est sélectionnée en tenant compte des circonstances existantes. La CIPR précise que celles-ci peuvent conduire à un choix de différents paramètres pour identifier la « meilleure option ». Enfin, l'option choisie est mise en pratique. C'est évidemment au niveau de la sélection des options préalablement identifiées qu'interviennent les techniques d'aide à la décision (ICRP, 2006)

8.7.1 L'analyse coût-bénéfice

La première technique, l'analyse coût-bénéfice, consiste à exprimer en termes monétaires les différents facteurs, qui influencent l'équilibre entre les coûts d'un côté et les bénéfices de l'autre, et en les agrégeant afin de pouvoir choisir l'option ayant le coût net (i.e. total) le plus bas. Dans une simple application de radioprotection, il s'agit d'utiliser une valeur monétaire pour « l'homme-sievert » (*man-sievert*), représentant la dose reçue par un individu et ce, afin d'obtenir un dénominateur commun d'évaluation entre le coût de l'option à l'examen et le gain de protection radiologique qu'elle engendre. Il est évident que la valeur monétaire du « man-sievert » a fait l'objet de nombreux débats éthiques puisqu'il s'agit d'une part, de monnayer la vie humaine et d'autre part, si l'on en accepte le principe, de trouver des bases communément admises pour ce faire. La CIPR reconnaît la controverse entourant l'introduction de cette notion dans la publication 22 de 1973 mais souligne, en 2006, qu'en dépit de celle-ci, la notion a été utilisée et développée par de nombreuses organisations :

« (A9) *The definition and use of the monetary value of the man sievert has been, and remains, a matter of debate since the concept was introduced formally by ICRP in Publication 22 (ICRP, 1973). First, there*

have always been some reservations about the use of the concept from an ethical point of view because of its link with the economic 'value of life'. (...) »

*« (A10) Despite these reservations, the concept was further developed with the practical implementation of the optimisation principle, and many organisations (operators and authorities) in the world have adopted values to be used more or less formally in the optimisation process in relation to decision-aiding techniques. »
(ICRP, 2006)*

Cette controverse éthique sera brièvement abordée plus loin mais ce qui nous intéresse maintenant est bien la méthode utilisée en tant qu'élaboration d'un dénominateur commun entre les différentes dimensions d'un problème, quelle que soit d'ailleurs la méthode d'aide à la décision à laquelle on ait recours.

Voyons d'abord ce que ça donne pour la formulation **coût-bénéfice** qui répond à l'expression d'un coût associé à la dose collective Y tel que :

$$Y = \sum_j \alpha_j S_j \quad \text{Equation 8-1}$$

où α_j est la valeur monétaire de l'homme-sievert à appliquer au groupe exposé j et S_j la dose individuelle reçue au sein du groupe exposé j . La dose collective est une mesure de l'exposition d'un groupe d'individus donnés émanant d'une source de radiation. Elle se définit comme l'intégrale de la distribution des doses reçues individuellement. On devine les disparités qui peuvent apparaître au sein d'un groupe et qui ne sont évidemment pas reflétées par le concept écrasant de dose collective. Celle-ci, souvent utilisée comme indicateur de performance d'une option, n'a d'intérêt que si l'exposition au sein du groupe est relativement homogène. La dose collective

n'est pas toujours discriminante dans le processus de prise de décision²⁵¹ (ICRP, 2006).

Le coût net de chaque option est calculé au départ du coût de la protection X et du coût correspondant à l'exposition collective Y . Plus le coût de la protection est élevé, moins l'exposition collective le sera. Le coût total de l'option considérée est le coût associé aux mesures de protection auquel est ajouté le coût associé à l'exposition collective, en termes de *man-sievert*, c'est-à-dire le préjudice subi converti en valeur monétaire. La solution optimale est celle qui répond au coût total minimum, c'est-à-dire l'option qui semble réaliser au mieux l'équilibre entre les efforts à fournir pour protéger l'humain de l'exposition et les efforts du portefeuille, comme l'illustre la figure 8-2 ci-dessous.

Une telle approche repose sur des hypothèses simplificatrices fortes : un préjudice identifiable que l'on puisse (et veuille) chiffrer en termes monétaires en réponse à une valeur financière d'investissement dans l'option considérée. Il faut donc un dénominateur commun, ici purement économique, et une situation à modéliser qui puisse se ramener à ces deux seules dimensions. Dans des situations simplifiées de protection radiologique opérationnelle²⁵², ce genre de méthode est efficace afin de trouver un équilibre entre les mesures de protection et la viabilité économique de l'activité.

²⁵¹ La CIPR précise que lorsque les expositions concernent de grandes populations, de vastes zones géographiques et de longues périodes de temps, la dose effective collective totale (c'est-à-dire la somme de toutes les expositions individuelles dans le temps et l'espace) n'est pas un outil valide pour l'aide à la décision, car elle peut agréger les informations de manière excessive et pourrait être trompeuse pour le choix des mesures de protection (ICRP, 2006).

²⁵² Sur un plan éthique, rappelons que les travailleurs exposés sont censés avoir donné préalablement leur consentement sur une base libre et informée. En théorie au moins, ils sont donc conscients des dangers que comporte la manipulation de sources radioactives. Il existe d'ailleurs des normes de dose d'exposition distinctes de celles qui s'appliquent au public. Notons que ce genre d'approche est également utilisée pour le public et pour les différents types d'expositions, que celles-ci soient planifiées (normales ou potentielles) ou d'urgence mais avec différentes contraintes de dose.

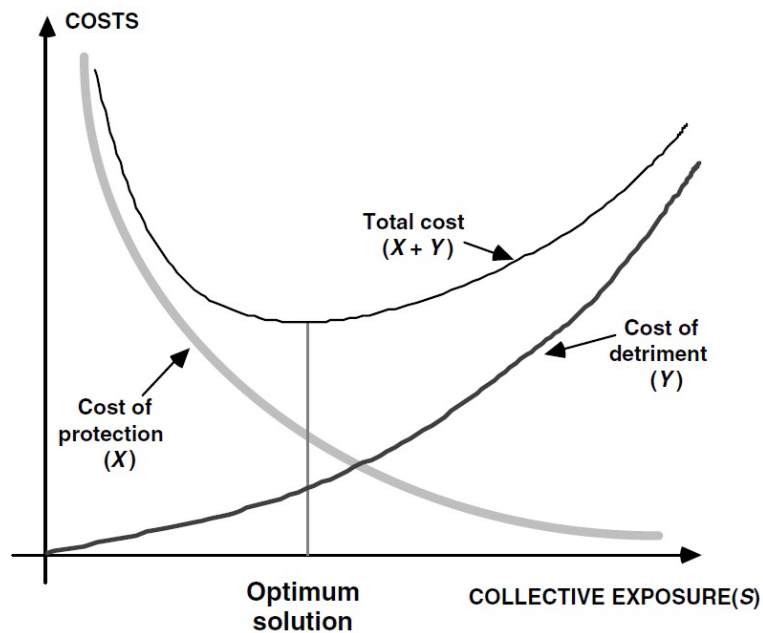


Figure 8-2 – Dans un repère cartésien portant les coûts en ordonnée et la dose collective en abscisse, le coût de la protection suit une courbe strictement décroissante. Le coût du préjudice (detriment) va croissant à mesure que la dose collective augmente. Le coût total de l'option est la somme de X et de Y représentant le coût associé aux mesures de protection auquel est ajouté le coût associé à l'exposition collective, en termes de man-sievert, c'est-à-dire le préjudice subi converti en valeur monétaire. La solution optimale est donnée par le minimum de la courbe enveloppe $X + Y$ (ICRP, 2006).

Avec le temps, un facteur correctif a été introduit afin de refléter l'aversion au risque et de pouvoir traiter différemment une exposition collective de 1 *man-sievert* résultant de 10 individus exposés à 100 mSv d'une exposition collective d'un *man-sievert* résultant de 1 000 individus exposés à une dose de 1 mSv (ICRP, 1983). Le risque individuel étant plus grand dans le premier cas que dans le second, pour un risque sanitaire collectif jugé identique, plus d'efforts seront consentis afin de le prévenir ou de le réduire. Comme déjà mentionné, le « *as low as reasonable achievable* » du principe d'optimisation a porté de plus en plus, au fil du temps, sur la dose individuelle reçue et sur le nombre de personnes exposées plutôt que sur la simple dose collective (ICRP, 2006).

Un coefficient correcteur a ainsi été ajouté à l'expression de α_j afin de tenir compte de la dose individuelle reçue, de l'aversion au risque et du degré même de cette aversion ainsi que, du niveau d'exposition annuel.

$$\alpha_{ref}(d) = \alpha_{base} (d/d_0)^a \quad \text{Equation 8-2}$$

Dans la formule ci-dessus, le α_j de l'équation 8-1 est exprimé sous la forme d'une valeur monétaire de référence du *man-sievert* soit α_{ref} en fonction de d correspondant au niveau d'exposition individuel annuel. Ce coefficient α_{ref} se calcule et se module en fonction de la valeur de base du *man-sievert* α_{base} et d'un quotient de niveau d'exposition représenté par d , précédemment décrit, et d_0 qui représente la borne inférieure de l'intervalle de dose individuelle auquel s'applique le coefficient d'aversion au risque a . Cette correction entraîne une augmentation de la valeur monétaire du *man-sievert* à mesure que l'exposition individuelle augmente²⁵³.

Quoi qu'il en soit, la méthode coût-bénéfices appartient aux méthodes de programmation mathématique qui supposent que la problématique posée puisse se décliner sous la forme d'une fonction à optimiser. Cette fonction est une fonction d'utilité et dans le cas exposé ci-avant, il s'agit de la fonction $X + Y$. Cette fonction peut en effet très bien s'exprimer sous la forme d'une relation mathématique propre à la fonction d'utilité issue du champ de l'économie. En procédant à une analogie avec l'économie, la fonction d'utilité dépend :

- du prix du bien (ce qui, en radioprotection, correspondrait au prix de l'option choisie),
- du revenu du consommateur (ce qui, en radioprotection, correspondrait à la dose maximale acceptable à titre individuel ou collectif),

²⁵³ En effet, $a=0$ pour $d < d_0$; ce cas est trivial, le coefficient d'aversion au risque est assigné à zéro puisque la dose individuelle reçue est en deçà du minimum. $\alpha_{ref} = \alpha_{base}$. $a \geq 0$ pour $d \geq d_0$. Dès que le degré d'aversion au risque est positif, la valeur monétaire du *man-sievert* pour l'exposition considérée augmente par rapport à la valeur monétaire de base, fixée conventionnellement. Cette valeur de base se situe dans un intervalle de valeurs allant de 1 000 USD à 100 000 USD (ICRP, 1983).

- de l'utilité de l'option (reflétant ici une nécessité ou l'utilité de l'activité à risque pour l'individu ou la collectivité qu'il sert),
- du prix des substituts (ce qui, en radioprotection, serait l'exposition aux radiations, collective ou individuelle, représentant ce que l'individu consent à « sacrifier » dans les différentes options évaluées, éventuellement combiné au prix des autres options).

Comme tous les modèles économétriques, descriptifs ou décisionnels, ils ne sont qu'une approximation des mécanismes réels (Esch, 1992) et toute la question qu'il conviendra de se poser ici est de savoir jusqu'où cette approche, fût-elle approximative, reste licite. Nous reviendrons sur cette question après avoir brièvement exposé les autres méthodes de mise en pratique du principe d'optimisation.

8.7.2 La méthode coût-efficacité

La deuxième méthode utilise un autre concept emprunté à l'économie, l'utilité marginale ou coût marginal²⁵⁴ ; cette **technique**, appelée **coût-efficacité** (*cost-effectiveness*), cherche à éliminer toutes les options qui n'auraient pas de coûts efficaces et à isoler l'ensemble des options résiduelles en vue de pouvoir choisir la meilleure. A proprement parler, il ne s'agit donc pas d'une méthode d'optimisation mais plutôt d'une méthode de *screening* et de comparaison.

La méthode consiste à analyser (par exemple, graphiquement) le niveau d'exposition résiduelle d'une option en fonction des coûts de la protection. Une fois encore, dans un tel repère, la courbe est simplement décroissante puisque plus on consentira des efforts dans la protection et donc, corrélativement, plus les coûts de la protection seront élevés, plus l'exposition résiduelle diminuera. Les options qui figurent sur la courbe sont celles qui ont les coûts efficaces, les autres options, celles ne figurant pas sur

²⁵⁴ L'utilité marginale se définit comme l'augmentation de l'utilité totale du consommateur quand il consomme une unité additionnelle du bien. On définit similairement le coût marginal. L'utilité marginale est décroissante car l'utilité d'une unité additionnelle du bien est moindre que la précédente (ex : utilité de disposer d'une seconde voiture quand on en dispose déjà d'une).

la courbe, doivent être écartées. La comparaison fonctionne sur l'analyse du coût marginal (ICRP, 2006). L'approche coût-efficacité permet d'associer à chaque mesure un coût marginal de l'unité de dose évitée (Lochard *et al.*, 1981). Si une petite augmentation des coûts entraîne un grand gain de protection, alors l'option correspondante est plus efficace. Chaque option efficace peut être caractérisée par l'augmentation de coût qu'elle représente par rapport à l'autre et la diminution correspondante de l'exposition résiduelle. Le ratio coût-diminution de l'exposition résiduelle (ratio coût-efficacité) peut donc servir au tri des options.

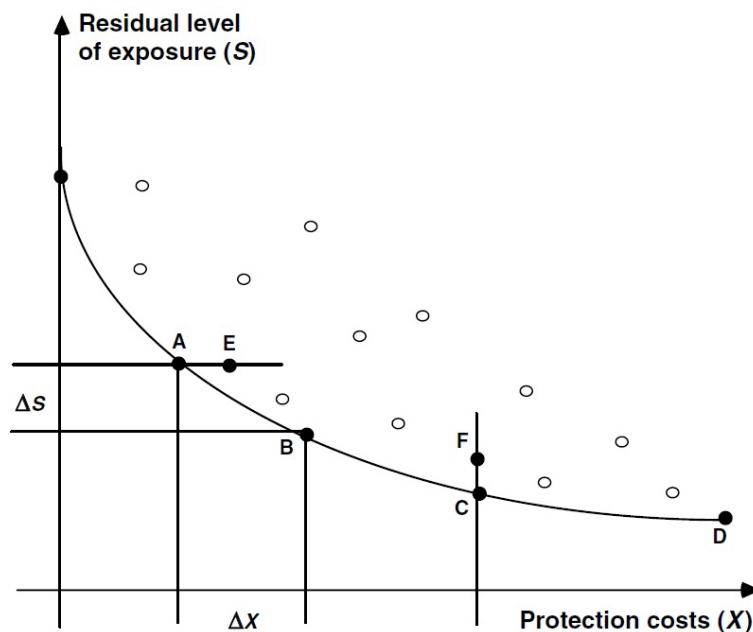


Figure 8-3 – Illustration de la méthode coût-efficacité. Dans l'exemple ainsi donné, il apparaît clairement que l'option A permet d'atteindre un niveau d'exposition résiduel identique à l'option E mais pour un coût moindre. Similairement, l'option C permet d'atteindre un niveau de protection supérieure à l'option F pour le même coût (ICRP, 2006).

Cette méthode n'étant pas en soi normative, elle nécessite donc l'introduction d'une valeur de référence pour évaluer ce ratio autrement que de façon simplement ordinale²⁵⁵. La valeur monétaire du *man-sievert* peut

²⁵⁵ C'est-à-dire en comparant les options entre elles de façon relative.

servir également à cette fin. Ainsi, l'interprétation classique est de considérer le ratio coût-efficacité de la dernière mesure adoptée comme la valeur monétaire implicitement accordée au *man-sievert* (Lochard *et al.*, 1981). S'il n'existe pas de valeur de référence de coût de l'unité de dose (imposée légalement ou administrativement), l'analyse des actions passées de protection permet de déterminer quelle a été la valeur implicitement accordée au *man-sievert*.

Les observations faites précédemment sur l'analyse coût-bénéfice s'appliquent ici également. Une comparaison d'options selon une telle méthode suppose la réduction des situations à analyser à un espace binaire agrégeant plusieurs dimensions réelles.

On peut imaginer l'application de la méthode coût-efficacité, à la suite d'une première évaluation de type coûts-bénéfice ou en amont de celle-ci, sachant qu'en pratique les bonnes options peuvent toutes se tenir dans un mouchoir de poche et nécessiter des approches complémentaires pour procéder à un choix raisonné.

8.7.3 L'analyse multicritères

L'analyse multicritères, troisième technique d'aide à la décision utilisée, est censée répondre à l'objection que nous venons de formuler. Lorsque la situation d'exposition étudiée ne peut être réduite au préjudice radiologique (*radiation detriment*) et aux coûts associés à la protection mais dépend, au contraire, d'un grand nombre de critères (complexes ou non), cette technique peut être appliquée. Toutefois, elle requiert que les critères soient quantifiables ou puissent être, à tout le moins, ordonnés de façon à permettre une classification des options.

L'analyse multicritères correspond à une analyse de l'utilité selon des attributs multiples (*multi-attribute utility analysis*). Il s'agit bien ici de l'optimisation d'une fonction d'utilité comme on en rencontre classiquement en économie et en ingénierie de projet. C'est l'attribution de scores qui définit à proprement parler la fonction d'utilité. Chaque option à l'étude possède une fonction d'utilité définie en fonction des critères pertinents pour la situation. Parmi eux, on retrouvera des paramètres comme la dose

collective et le coût de la protection mais pas uniquement ou pas nécessairement puisque, nous dit la CIPR, des facteurs comme la perception du niveau de risque ou encore l'étalement de l'exposition dans le temps et l'espace peuvent être pris en compte (ICRP, 2006). Selon les critères définis, chaque option pourra obtenir un classement différent, une option pouvant être plus intéressante qu'une autre du point de vue d'un critère choisi alors qu'elle le sera moins du point de vue d'un autre. La décision ne pourra être prise qu'après avoir assigné des facteurs de pondération auxdits critères de façon à exprimer leur importance relative. Une illustration de cette méthode sera fournie dans l'étude de cas de cette thèse.

Sur un plan formel, il s'agit de qualifier chaque option par une fonction d'utilité totale U_i calculée de la façon suivante :

$$U_i = \sum k_j u_{j,i} \quad \text{Equation 8-3}$$

où i désigne l'option considérée, j est l'index du critère considérée, k_j est le facteur de pondération du critère et $u_{j,i}$ est la fonction unitaire d'utilité de l'option i pour le critère j .

L'option choisie sera celle qui entraîne une utilité totale maximale. La CIPR recommande de procéder à des analyses de sensibilité afin de confirmer le résultat obtenu et d'en évaluer sa robustesse (ICRP, 2006). En effet, la pondération choisie pour les critères étant le fruit d'un jugement posé *a priori*, il est prudent d'évaluer la sensibilité du résultat final par rapport à ce choix. Les techniques d'aide à la décision sont relativement simples à mettre en œuvre, c'est la complexité de situations auxquelles elles s'appliquent qui rendent l'exercice général malaisé. Les obstacles se rencontrent essentiellement dans la délimitation des attributs pertinents, la collecte des données de base, la prise en compte des incertitudes et la traduction des jugements de valeur de manière quantitative (ICRP, 2006).

Nous ne contestons pas ces méthodes, nous y avons recours mais... prudemment. La mathématisation de la décision confère toujours à celle-ci une assise qui n'en demeure pas moins contestable si elle n'est pas constamment interrogée. Comme toute modélisation, il y a une simplification de la réalité obtenue par une stylisation de ses principales

caractéristiques, au service d'un but à atteindre (un choix à opérer, une prévision, etc.). Il y a cependant des limites de validité à tout modèle descriptif (Falkenburg, 2000)²⁵⁶, les modèles d'aide à la décision ne font pas exception. Nous pensons qu'il s'agit non plus de validité mais bien de limites à la légitimité de leur emploi car ces modèles ont un caractère non plus descriptif mais normatif. Quand un modèle descriptif est employé en dehors de son domaine de validité et même s'il peut encore fournir des résultats numériques, plus aucun crédit ne pourra être octroyé aux résultats. Il devrait en être de même avec les modèles à caractère décisionnel ou normatif vis-à-vis de leur emploi en dehors de leurs « limites de légitimité », limites dont la détermination est elle-même problématique. C'est sans doute ce que nous rappelle Habermas qui, s'appuyant sur la différence qu'opère Kant entre savoir épistémique et savoir pratique, distingue la « vérité » des propositions descriptives de la « justesse » des propositions normatives (Habermas, 2001, p. 204). L'emploi de résultats d'un modèle en dehors des limites établies pour son fonctionnement conduirait donc à une conclusion tantôt erronée, non « juste » au sens de l'exactitude, c'est-à-dire non vraie, pour le modèle descriptif et tantôt à une conclusion non « juste » au sens moral, c'est-à-dire « injuste », dans le cas du modèle normatif.

Au-delà des critiques que l'on pourrait déjà formuler à l'utilisation de ces techniques au sein même de la radioprotection, nous interrogerons plus particulièrement la pertinence et surtout la légitimité de ces techniques lorsqu'elles sont transférées, sans coup férir, à la sûreté. C'est ce que nous traiterons dans les sections 8.7.5 et 8.7.6 après avoir commenté brièvement, sur le plan éthique, la valeur monétaire du *man-sievert* et les approches individuelle et collective de la protection radiologique dans la section suivante (voir section 8.7.4).

²⁵⁶ « *Models symbolise specific structures. Compared with theories, they have a smaller domain, and they contain more contingent parameters which do not derive from a theory but have to be put into the model ad hoc* » (Falkenburg, 2000).

8.7.4 Réflexions éthiques ciblées sur l'application du principe d'optimisation

Les bases éthiques des trois principes de la radioprotection ont été décrites précédemment. Nous ne les répéterons pas ici. Toutefois, de ce qui précède, deux observations spécifiques en rapport avec les outils d'implémentation du principe d'optimisation peuvent être formulées.

La première observation porte sur le débat éthique de la valeur monétaire du *man-sievert*.

« La démarche qui consiste à utiliser les valeurs implicites de la vie humaine pour comparer et éventuellement gérer des risques d'origine diverses, bien que largement pratiquée, doit cependant être maniée avec prudence [...] » (Lochard et al., 1981)

Le fait d'attribuer une valeur monétaire à une vie humaine ne peut impliquer que cette vie peut être achetée ou que le droit de tuer une personne puisse être également l'objet d'une transaction financière, nous rassure Hansson. Il doit être clairement établi que, même pour la CIPR, l'argent et la vie humaine sont incommensurables. La valeur monétaire est introduite à des seules fins de calcul et porte sur des « vies statistiques » et non des « vies de personnes identifiées » (Hansson, 2007). Nous reconnaissons à Hansson le mérite de tenter une justification au moins procédurale pour contrer le malaise, malaise qui semble s'effacer par l'exigence de pragmatisme comme nous le disent Berthet et ses collègues :

« Fixer une valeur monétaire à l'unité de dose collective revient à donner une valeur à la perte d'espérance de vie et même à la détérioration de la qualité de la vie, en raison même de l'adoption de la relation dose-effet. Cela ne va pas sans soulever des problèmes d'éthique car on peut, à juste titre, considérer que la vie d'un individu n'a pas de prix. Cependant, dans le domaine de la prévention, pour éviter des risques statistiques, des choix doivent être faits car les ressources ne sont pas illimitées et toute décision en matière de prévention se traduit par une « valeur » implicite de la vie humaine. Cette logique a déjà été adoptée explicitement dans de nombreux domaines comme celui des infrastructures routières par exemple [...].

Se doter d'un système de valeurs de référence de l'unité de dose collective évitée revient donc à appliquer au domaine de la radioprotection une rationalité tout à fait admise et pratiquée dans nos sociétés. » (Berthet et al., 1992)

La justification ainsi donnée repose sur la pratique déjà admise. Mais par qui ? Comment ? De quelle façon ? Cette justification par analogie ne répond en rien à la question de savoir si la vie a un prix (Allemand, 2002). Si les individus sont capables d'une telle substitution, entre vie humaine et bien, c'est qu'ils ne ressentent aucune empathie envers cette vie²⁵⁷.

La deuxième observation porte sur la compartimentalisation sous-jacente de la protection radiologique. En cas d'exposition à des substances radioactives, les voies de contamination diffèrent et une distinction est faite entre la toxicité radiologique à l'ingestion et la toxicité radiologique à l'inhalation. Les modélisations à long terme de la biosphère, dans le cadre des évaluations de sûreté, rendent d'ailleurs compte de ces différences. Il est cependant intéressant de noter que les modèles éthiques à l'œuvre dans l'application des mesures de protection diffèrent également en fonction des voies de contamination considérées.

Ainsi, si la contamination a lieu par l'ingestion de nourriture, l'éthique appliquée qui sous-tend l'évaluation des risques est de type individuelle (*individual risk weighting*) alors que la contamination par l'air sera traitée par une approche de risque collectif (*collective risk weighting*).

L'approche individuelle peut être illustrée par la relation patient-médecin. Celle-ci est capitale en éthique médicale et une évaluation coût-bénéfice considère toujours et uniquement l'intérêt individuel du patient. Ainsi, lorsqu'il s'agit d'évaluer l'opportunité de faire participer un patient à une étude clinique, il faut que le traitement que celui-ci est susceptible de recevoir dans le cadre de cette étude soit réputé meilleur que celui qu'il pourrait recevoir s'il n'y participait pas. L'intérêt du patient ne peut pas passer après le bénéfice supposé pour la science ni même l'intérêt de futurs

²⁵⁷ La vie est généralement considérée comme porteuse de sens. Illustrons par l'exemple : il est rare que la prime d'une assurance-vie versée aux ayant droits ait une quelconque valeur de remplacement du défunt autrement que de façon instrumentale.

patients qui pourraient être traités à l'avenir en bénéficiant des résultats positifs de l'étude (voir aussi section 7.4.3.2). Une pondération collective, évaluant le « risque total » d'une activité telle qu'elle est pratiquée habituellement dans l'analyse de risques n'a pas cours dans le cadre de la relation patient-soignant (Hansson, 2007). Il en va de même, nous dit Hansson, des recommandations nutritionnelles. Si la consommation de poisson est certainement bénéfique pour la santé, elle doit souvent être tempérée, en particulier chez la femme enceinte et la femme allaitante, en raison de la contamination fréquente en métaux lourds. Dans cette équation, des considérations économiques relatives à l'industrie poissonnière seraient tout à fait indécentes.

La protection radiologique adopte le plus souvent une approche mixte mais bascule sur le versant de la pondération collective lorsqu'ils évoquent les doses collectives et sur celui de la pondération individuelle lorsqu'il s'agit d'applications thérapeutiques. Les outils utilisés seront à chaque fois recalibrés en fonction du contexte de la situation à évaluer. Cette flexibilité des outils permettant une utilisation à géométrie variable en fonction des contextes renvoie à la nécessité de veiller à la robustesse des prémisses à poser avant chaque utilisation.

8.7.5 **Réflexion sur la transposition de ces méthodes à la sûreté**

Dans une évaluation de sûreté globale, embrassant la protection radiologique globale ainsi que d'autres facteurs (non radiologiques), quelle serait encore la validité de méthodes d'aide à la décision aussi spécifiques que celles que nous avons brossées dans la section précédente ?

La question se pose en ces termes pour notre cas d'étude puisque l'AFCN recommande l'application d'une méthode multicritère afin de comparer les roches hôtes. Il s'agit donc de comparer les propriétés des roches hôtes contribuant à la sûreté en tant que mise en œuvre du principe d'optimisation. Nous pensons que si la transition du statut de principe radiologique au principe de sûreté n'est pas rigoureusement établie pour le principe d'optimisation, la licéité de l'usage des outils d'implémentation de

ce principe n'est pas davantage établie dès lors qu'on en élargit le champ d'application, en passant de la protection radiologique à la sûreté.

Bien sûr, on objectera que l'analyse multicritères n'est pas propre à la protection radiologique, il s'agit d'un outil courant d'aide à la décision en ingénierie. Mais, ce qui est problématique, c'est d'en lier l'application au principe d'optimisation en tant que principe de sûreté comme l'enjoint l'AFCN. Cela étant posé, l'analyse multicritères comporte elle-même des limitations que l'on peut d'autant plus questionner que le contexte dans lequel on y a recours est large. Or, il paraît incontestable que celui de la sûreté est intrinsèquement plus étendu que celui de la protection radiologique. En effet, la protection radiologique se conclut avec un indicateur de performance unique, la dose. Il n'en va pas de même de la sûreté. Son champ d'application dépasse celui de la protection radiologique en incluant, par exemple, la protection contre la toxicité chimique des radionucléides (Harju-Autti et Volckaert, 1995 ; Meert, 2020), la conception redondante d'une installation ou encore sa pérennité.

Dans les précédentes sections, nous avons émis des réserves sur la légitimité de considérer le principe d'optimisation issu de la protection radiologique comme un principe de sûreté. Plus exactement, nous avons tenté de montrer qu'en l'absence de justification, cette transition du registre de la protection au registre de la sûreté n'était peut-être pas complètement justifiée, à moins bien sûr de considérer une situation triviale où la sûreté se réduirait à la seule protection radiologique.

Il n'est d'ailleurs pas interdit de penser que c'est l'examen de cette situation triviale qui est à l'origine du glissement. Le cloisonnement des disciplines pourrait ainsi en être une possible explication. Les radioprotectionnistes peuvent en effet considérer que, de leur point de vue, la sûreté est avant tout affaire de protection radiologique. Une fois le concept introduit dans les textes, d'autant plus facilement qu'il nous est familier – cette proximité qu'il entretient avec notre sens commun endormant notre vigilance (voir aussi première partie – section 6.1) –, le ver est dans le fruit. Mais si cette hypothèse est bien exacte, les radioprotectionnistes de la CIPR ne sont pas les seuls à avoir opéré ce glissement, l'AIEA s'en est aussi portée complice tant la préoccupation majeure de la sûreté, lorsqu'il est question du nucléaire est, avant tout, de l'ordre de la protection radiologique.

Quoi qu'il en soit, c'est un autre angle d'analyse que nous venons d'emprunter et qui porte sur le détail de l'implémentation, c'est-à-dire au niveau des outils permettant l'application du principe d'optimisation. C'est la portée résolument instrumentale du principe d'optimisation qui se reflète dans les méthodes d'aide à la décision auquel il fait appel. Cette visée instrumentale contraste quelque peu avec la mise en perspective dont il fait par ailleurs l'objet en mobilisant, pour ce faire, la sûreté, la culture de sûreté (on frise ici le vertige tautologique si protection radiologique et sûreté se renvoient constamment l'un à l'autre) et le mode de pensée (*state of mind*). Ce dernier est d'ailleurs censé se construire dans le dialogue avec les autorités et les autres parties prenantes, en particulier entre le régulateur et l'exploitant :

« (62) All aspects of optimization cannot be codified; optimisation is more an obligation of means than of results. Except in cases of regulatory violation, it is not the role of the authority to focus on specific outcomes for a particular situation, but rather on processes, procedures, and judgments. The regulation should provide guidelines designed to build such dialogue. The success of the optimization process will depend strongly on the quality of this dialogue. » (ICRP, 2006, §62)

Ce principe de concertation pourrait s'apparenter à la notion de « *gestion en bon père de famille* » que le droit civil a consacrée. Mais est-ce que cette mise en perspective théorique suffit vraiment à donner l'envergure voulue au principe d'optimisation lorsque la mise en pratique de celui-ci semble demeurer indissociablement liée aux outils d'aide à la décision présentés par la CIPR ?

Nous reviendrons largement sur cette question de l'état d'esprit ou du mode de pensée que nous tenons pour le siège d'une rationalité disputée par les autorités (le régulateur) et l'opérateur. Cependant, avant de relever le débat sur cette possible dissonance de rationalité, nous interrogeons plus prosaïquement la limitation pratique de cette volonté de « mesure » en termes de fonction d'utilité.

8.7.6 La sûreté est-elle soluble dans l'utilité ?

Les outils d'aide à la décision de types « coûts-bénéfices » et « analyse multicritères » dont l'utilisation est recommandée par la CIPR renvoient à l'existence d'une possible fonction d'utilité pour toutes les alternatives à envisager, dans un but de comparaison et de recherche d'optimum.

Est-ce que la sûreté, dans le champ d'application qui nous occupe, même si elle s'est dérobée jusqu'ici à toute tentative de définition rigoureuse, peut se laisser capturer de manière suffisamment valide par une fonction d'utilité ? En d'autres termes, peut-on représenter adéquatement la sûreté par une fonction d'utilité comme on le ferait pour la protection radiologique ? Le doute sur une telle entreprise n'est-il pas d'autant plus permis qu'au sein même de la protection radiologique, nous avons déjà pu montrer l'arbitraire qui pouvait frapper une telle approche tant dans la pondération des critères (analyse multicritères) que dans la détermination de la valeur monétaire du *man-sievert* dans les évaluations coût-bénéfices ou coût-efficacité ? Si une part d'arbitraire est sans doute inévitable, quelles limites acceptables lui donner ? A partir de quelle dose d'arbitraire y a-t-il détournement de sens ?

Les algorithmes traitant les problèmes de décision multidimensionnels, même s'ils tiennent compte dans une certaine mesure de l'incertain, exigent une structuration mathématique forte du problème à traiter. Pour que l'ordinateur puisse rechercher une solution optimale, il faut évidemment que le problème ait été réduit afin de permettre sa computation (Simon, 1969). Ces méthodes de programmation mathématique (linéaire ou non) comme celles utilisées dans l'analyse coûts-bénéfices relèvent de la recherche opérationnelle. Une des exigences de l'optimisation est que toutes les alternatives soient mesurables dans les termes d'une commune fonction d'utilité (Simon, 1969).

Nous souhaitons introduire dans le prochain chapitre, le travail d'Herbert Simon, prix Nobel d'Economie en 1978, qui fut titulaire de la chaire de science de la computation et de psychologie de l'université de Carnegie-Mellon, et en particulier sa contribution à la mise en valeur des insuffisances théoriques et pratiques du principe d'optimisation. Le principe d'optimisation est étudié initialement par Simon en économie et il en généralisera le propos à pléthore de domaines dont les *sciences de l'artificiel*,

désignant les sciences de l'ingénierie telles qu'elles sont apparues après 1948 (Simon, 1969). Simon souligne les contraintes fortes que les algorithmes de recherche d'optimum imposent aux phénomènes modélisés mais aussi à l'interprétation de la solution optimale (Le Moigne, 2009). La compatibilité de ces contraintes avec la complexité de la sûreté des stockages de déchets radioactifs est questionnée.

8.8 Synthèse et conclusions du chapitre 8

Le présent chapitre s'est intéressé au principe d'optimisation de la protection radiologique.

Nous y avons tout d'abord distingué la protection radiologique de la sûreté. Deux différences nous ont paru fondamentales : la première est d'échelle, la protection radiologique pouvant constituer un sous-ensemble de la sûreté ; la seconde est dans l'objet, la protection radiologique se pensant prioritairement en fonction du récepteur du rayonnement (*outside-in*) et la sûreté se pensant prioritairement sur le contrôle du terme source ionisant (*inside-out*).

La lecture du droit nucléaire international nous en a donné une autre, proximale : la sûreté a trait aux conditions d'existence des accidents et la protection radiologique *constitue* alors le résultat du déploiement des mesures de sûreté. Cette interprétation soutient l'inclusion de la protection dans la sûreté. Mais la protection désigne également les moyens mis en œuvre face aux radiations sans chercher à agir sur leurs conditions d'apparition. Dans ce cas, elle est *consécutif* de la sûreté, elle n'en fait pas pleinement partie. A moitié dehors et à moitié dedans, la protection radiologique sait donc maintenir ses distances avec la sûreté à laquelle elle ne prête d'ailleurs qu'un seul de ces trois principes, celui d'optimisation. Et précisément, la justification de cette transversalité du principe d'optimisation résiste à l'analyse. C'est sans coup férir que la sûreté fait son entrée dans le système de la CIPR à l'intérieur du principe d'optimisation, pourtant consacré en tant que principe de protection radiologique.

Cette curiosité est analysée à la lumière de l'interprétation évolutive du principe d'optimisation au fil de l'histoire retracée par les publications de la

CIPR. La compréhension la plus récente qui vise à élire le principe d'optimisation comme un principe moteur de l'approche de sûreté et du développement des systèmes est aussi celle de l'AFCN. L'analyse des publications généralistes de la CIPR (i.e. non spécifiques aux stockages) nous a permis de reconstruire le cheminement du principe d'optimisation depuis la formulation ALARA qui l'avait vu naître jusqu'à son aboutissement en tant que méta-principe.

Le premier changement d'envergure est celui de l'adjonction de la sûreté dans la définition du principe d'optimisation de la CIPR, une association qui s'est également accompagnée de l'introduction du principe BAT, un principe issu de la législation environnementale. Nous avons identifié ce changement comme un *premier glissement* de sens et de portée du principe d'optimisation. Nous en avons obtenu la confirmation en consultant les publications de l'AIEA. Ces dernières nous ont permis d'identifier un *deuxième glissement* à sa suite, dans le fait que la sûreté attachée au principe d'optimisation ne se restreignait pas aux seuls aspects radiologiques et n'était donc pas uniquement confinée à la sûreté nucléaire. Ces glissements ont été concomitants d'un changement de statut du principe d'optimisation, en particulier dans le cas des stockages géologiques. Pour ces derniers, le principe d'optimisation occupe une place centrale.

La justification de l'élargissement du principe d'optimisation a logiquement été recherchée dans le principe BAT qui a, de toute évidence, organisé le changement de pensée en matérialisant la réunion du monde de la radioprotection avec celui de l'environnement d'abord, et ensuite, avec celui de la sûreté, au moins dans le cas particulier des stockages de déchets radioactifs.

La question de l'origine éventuellement contingente du saut conceptuel opéré entre la protection radiologique et la sûreté, en lien avec l'objet « stockages de déchets radioactifs » est discutée puis écartée au profit d'une origine substantielle que les liens optimisation-sûreté, sûreté-précaution, précaution-BAT, optimisation-BAT et optimisation-précaution ont mis au jour.

La mesure de l'influence du principe BAT sur le principe d'optimisation a également retenu notre attention. Le BAT nourrit l'optimisation qui devrait

s'imposer comme un état d'esprit dans le chef du concepteur de stockage et de l'exploitant. L'analyse de la publication 122 de la CIPR conduit à de remarquables constats. L'optimisation qui s'impose d'abord comme un principe d'action et de sûreté embrassant toutes les phases de vie du stockage poursuit sa croissance en devenant une méthodologie qui ira jusqu'à phagocyter la sûreté conceptuellement, ce qui constitue un *troisième glissement*. En outre, face aux longues échelles de temps, l'optimisation devenue *principe-méthodologie* va jusqu'à s'affranchir du concept de dose qui l'a vu naître et auquel elle devait sa légitimité en tant que principe ALARA. Ce qui est remarquable, ce n'est pas tant l'inadéquation de la dose comme indicateur de sûreté à long terme que le silence des critiques par rapport aux conditions de validité du principe d'optimisation. Un principe qui, de son expression originelle et de son opérationnalité en protection radiologique, a évolué vers une approche holistique de gouvernance. Ce changement de paradigme est d'autant plus interpellant qu'il englobe, dans ses prémisses, un concept de sûreté lui-même peu questionné.

Plutôt que de justifier le changement d'échelle opéré par le principe d'optimisation, la CIPR semble s'être contentée de fournir les modalités de son application en cherchant à l'extérieur de son système le principe qu'elle a été contrainte *in fine* d'intégrer, à savoir le principe BAT. Avec cette montée en puissance du principe d'optimisation, une aporie s'est créée et, avec elle, le germe d'un conflit de rationalités. Cette aporie est d'autant plus marquée que la CIPR entretient par ailleurs deux expressions distinctes du principe d'optimisation, la première strictement radiologique et la seconde en tant que principe de gouvernance (i.e. une optimisation en grand). L'ambivalence de la CIPR donne certainement corps à deux rationalités dont la différence sera surtout nourrie par la vision séquentielle de l'optimisation en grand. Selon nous, cette vision ne peut s'expliquer par le contexte d'incertitudes dans lequel le développement des stockages siège, sans commettre un ultime glissement, celui qui confondrait le processus de recherche avec le processus de conception, c'est-à-dire le processus menant la fabrication de l'objet rendue possible grâce aux résultats de la recherche.

Enfin, les techniques de mise en œuvre de l'optimisation reflètent avant tout la visée instrumentale de celle-ci, ce qui contraste avec l'élargissement que lui confèrent la CIPR et l'AIEA. Ces méthodes d'aide à la décision validées

pour la protection radiologique ne le sont pas nécessairement pour la sûreté. En outre, elles supposent, lorsqu'on les étend à la sûreté, que cette dernière puisse être ramenée à une fonction d'utilité. Une telle réduction semble difficilement compatible avec l'inhérente complexité de la sûreté. Dans le cas particulier de l'analyse multicritères, l'attribution des scores aux différents attributs de la sûreté façonnerait celle-ci de façon arbitraire et les limites de validité d'une telle méthode devraient être interrogées comme limites de légitimité d'un modèle normatif.

Le chapitre 8 nous a donc permis de mettre au jour plusieurs glissements conceptuels qui nous semblent autant de distorsions sur le plan épistémologique. Sur ces distorsions, au moins deux rationalités peuvent prendre place, l'une qui adoptera l'optimisation en grand telle que développée par la CIPR ces dernières années et l'autre, probablement plus proche de l'ALARA initial, que nous appellerons, par contraste, optimisation en petit. En récusant la mise en œuvre séquentielle ainsi que l'extrapolation des outils décisionnels en dehors de la sphère radiologique, cette rationalité rejettera le concept de l'optimisation en grand.

A ces différentes rationalités, il nous faut à présent donner un cadre théorique, c'est ce que nous entreprenons dans le chapitre 9.

Chapitre 9 Optimisation et rationalité : les travaux d'Herbert Simon

Nous explorons, dans le présent chapitre, un cadre théorique qui puisse rendre compte des différences d'interprétation du principe d'optimisation. Plus précisément, il s'agit de comprendre les modes de pensée qui autorisent la montée en puissance du principe d'optimisation, de la protection radiologique à la sûreté et ensuite, de la sûreté à la méthodologie (ou gouvernance), ainsi que ceux qui s'y opposent en dénonçant surtout, outre l'illicéité du procédé, son impossibilité pratique.

Herbert Simon a longuement étudié les *rationalités* mises en œuvre dans les problèmes du choix et s'est montré critique à l'égard de la démarche d'optimisation érigée initialement comme seul paradigme de la *rationalité*. La première section introduit le concept de *satisficing* et explique en quoi il se distingue de l'optimisation (voir section 9.1). Nous expliquons ensuite en quoi l'exercice du choix humain ne peut que difficilement s'accommoder de la *rationalité parfaite* qu'exigerait un processus d'optimisation. Les concepts de *rationalité limitée* et de *niveaux d'aspiration* sont introduits et opposés à l'optimisation et aux *fonctions d'utilité* (voir section 9.2). Afin d'être en mesure d'approfondir la taxonomie des *rationalités* proposée par Simon, nous interrogeons la *rationalité* elle-même et plus précisément la manière de formaliser une décision rationnelle (voir section 9.3). Après avoir passé en revue les principaux biais dans la prise de décision qui sont autant d'écarts à la *rationalité* (voir section 9.4), nous explorons l'espace rationnel des décisions en distinguant les *rationalités substantive, procédurale, limitée et complexe* et proposons d'associer à l'AFCN et l'ONDRAF une rationalité

particulière pour chacun d’eux (voir section 9.5). Nous explorons ensuite le comportement en lien avec ces rationalités (voir section 9.6) avant d’expliquer en quoi la recherche d’optimisation d’un système de stockage, sous-tendue par une *rationalité substantive*, reviendrait à en simplifier la représentation et à réduire la complexité de la sûreté, nécessairement multiforme, à la seule protection radiologique (voir section 9.7). Avant de conclure le chapitre (voir section 9.9), une introduction à l’étude de cas du chapitre 10 est présentée (voir section 9.8) afin d’esquisser, en termes de *planification*, les conséquences d’une différence de *rationalités* entre l’AFCN et l’ONDRAF.

9.1 Optimisation versus « *satisficing* »

La plupart du temps, l’humain est incapable de choisir la solution optimale à un problème complexe, en raison de ses capacités de calcul limitées et de l’information dont il dispose, nécessairement limitée, elle aussi. Ainsi la rationalité globale de *l’Homo Economicus* (et son frère l’Homme administratif) devrait être remplacée par une sorte de comportement rationnel en phase avec la réalité de l’accès à l’information et aux capacités de calcul des organismes, dans leurs environnements respectifs (Simon, 1979). Cette objection à l’utilisation du principe d’optimisation est fondamentale : en réalité les affaires humaines ne sont pas guidées par une recherche d’optimum. Qui plus est, la limitation tant de l’information que de la capacité de calcul rend cette recherche impossible la plupart du temps. C’est la première critique de Simon à l’encontre de l’optimisation. L’évaluation des alternatives et de leurs conséquences dans une situation donnée est limitée par le manque de connaissances et notre inaptitude à prévoir l’avenir (Simon, 1997). Il y a donc non seulement un manque (objectif) d’informations, mais quand bien même celles-ci seraient disponibles, il existe des limites à notre faculté de les traiter. Enfin, il y a également des limites à l’adéquation des théories et des modèles avec la réalité. C’est particulièrement vrai dans les théories fondées sur la recherche de l’optimum.

Ce ne sera pas la seule objection de Simon à l’usage du principe d’optimisation, bien que celle-ci soit absolument fondamentale et

discriminante en termes de rationalité, nous y reviendrons largement. En effet, Simon formule une deuxième critique relative à l'incommensurabilité des dimensions à considérer dans une situation donnée, ce qui rend leur agrégation dans une fonction d'utilité particulièrement biaisée et malaisée dans la plupart des cas. Ce biais a tendance à ajouter du crédit à la première critique en éloignant les modèles de la réalité : l'optimisation algorithmique fait appel à des évaluations multicritères, lesquelles ne sont pas toujours quantifiables et sont « évolutives » (Le Moigne, 2009). Une démonstration générale d'optimisation semble donc impossible.

Mais Simon va plus loin encore : outre les limitations dans les capacités de calcul, il paraît difficile de procéder à un arbitrage entre des dimensions ou des aspects d'une situation qui soient incommensurables (Simon, 1997). C'est en principe la fonction d'utilité qui assure la commensurabilité, à condition, nous dit Simon, de savoir comment la formaliser. Il y a différentes classes de situations où l'incommensurabilité des buts et des conséquences s'invite (Simon, 1997) :

- les situations d'incertitudes : pour chaque alternative envisagée, une conséquence négative d'une éventualité peut être rééquilibrée par une conséquence positive dans une autre éventualité.
- Les situations de choix multipersonnel : le gain obtenu pour une personne correspond à une perte pour une autre.
- Les situations où un choix entraîne un gain dans une dimension mais une perte dans une autre.

L'expérience montre, dit Simon, que face à ces trois cas, de nouvelles solutions alternatives seront cherchées en vue d'éviter un arbitrage. Face à la première catégorie de situations, on s'assurera de trouver un critère de satisfaction minimum pour toutes les éventualités. Dans la deuxième catégorie de situations, on cherchera à assurer un résultat positif pour tous les protagonistes. Enfin, dans la troisième catégorie de situations, on s'assurera de trouver un résultat qui rencontre une satisfaction minimale (*minimally satisfactory*) dans toutes les dimensions. Nous verrons plus tard

que la formulation de ces alternatives tombe dans le champ de la recherche de la satisfaction (*satisficing*²⁵⁸) (Simon, 1956 ; Simon, 1969 ; Simon, 1979).

Cette remarque nous amène à considérer une troisième critique fondamentale que Simon émet à l'encontre du principe d'optimisation. Celui-ci ne fait pas émerger des solutions alternatives qui n'auraient pas été préalablement recensées et qui pourraient être néanmoins plus satisfaisantes si elles avaient été considérées (Le Moigne, 2009 ; Simon, 1997). Simon nous dit que dans une approche d'optimum, les acteurs sont censés choisir, parmi toutes les alternatives qui s'offrent à eux, celle qui fournira la plus grande utilité (Simon, 1997). Mais il n'est évidemment pas raisonnable d'espérer trouver toutes les alternatives car c'est un processus long et coûteux qui, de toute façon, ne peut que rarement garantir une quelconque complétude. Le comportement humain qui cherche à générer des alternatives est bien mieux décrit par l'heuristique de recherche qui vise à trouver des alternatives satisfaisantes (Simon, 1997). L'expression « heuristique de recherche » (*heuristic search*)²⁵⁹ est à la fois utilisée pour la formulation du problème et pour sa méthode de résolution (Newel et Simon, 1972), elle désigne la recherche sélective par tâtonnements (Simon, 1969). Notons que, mathématiquement ou plus exactement en informatique théorique, une heuristique est une méthode approximative qui repose sur un algorithme fournissant rapidement (en un temps polynomial) une solution réalisable non nécessairement optimale, pour un problème dit

²⁵⁸ *Satisficing* est dérivé de « to satisfice », en anglais, synonyme de « to satisfy » en anglais de l'Ombrie du nord, d'après l'*Oxford English Dictionary*. C'est un mot d'emprunt avancé par H. Simon pour ce nouvel usage (Simon, 1956).

²⁵⁹ C'est en croisant les publications originales de Simon en langue anglaise et certaines de leurs traductions en français que nous assumons la traduction de *heuristic search* par « heuristique de recherche » et non pas « recherche heuristique ». En outre, l'adjectif « heuristique » qualifiant ce qui aide à la recherche, l'expression « recherche heuristique » relève du pléonasme. L'heuristique en tant que substantif est une méthode de calcul qui fournit une solution réalisable, non nécessairement optimale à un problème d'optimisation difficile. En sociologie, il s'agit de la discipline qui tente de dégager les règles de la recherche scientifique. L'heuristique est aussi un système empirique qui résout des problèmes à partir de solutions incomplètes, en incluant notamment la méthode essai-erreur. Il nous a donc paru pertinent de choisir cette traduction (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Heuristique> et [https://fr.wikipedia.org/wiki/Heuristique_\(math%C3%A9matiques\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Heuristique_(math%C3%A9matiques))). [Consultés le 22 août 2021].

« d’optimisation NP-difficile²⁶⁰ » (Boussaïd, 2013). C’est à George Polya que l’on doit le concept de raisonnement heuristique qui provient de l’interrogation que tout étudiant en sciences et, en particulier, en mathématiques a déjà rencontrée : comment puis-je inventer la solution ? Comment puis-je découvrir ce fait ? (Le Moigne, 1994). L’heuristique vise à la généralité et à l’étude des méthodes indépendamment de la question posée.

Herbert Simon a proposé en son temps un changement de paradigme en économie, critiquant la perspective néo-classique qui était en vigueur, en fustigeant certains concepts sans fondement ou inadéquatement expliqués par les théories supposant un comportement optimal des acheteurs et des vendeurs. La théorie néo-classique²⁶¹ suppose une rationalité parfaite des acteurs économiques et cette hypothèse n’est absolument pas validée empiriquement. Quand des déviations sont observées, la théorie néo-classique introduit des artefacts non motivés (Simon, 1997), c’est-à-dire qui ne sont pas davantage justifiés par l’expérience. Partant de ce constat, et s’inspirant largement de l’évolution de la biologie, de la géologie et d’autres sciences expérimentales ou d’observation, Simon est à l’origine d’un tournant dans l’évolution des sciences économiques en proposant une économie comportementale (*behaviorist*) prétendant à une véracité par les faits observés (*veridical economic theory*) qui repose sur une théorie générale valide du mode de pensée et de décision (*human thinking and decision making*). Intégrant ainsi les limites des capacités de calcul humaines,

²⁶⁰ On désigne par *P* la classe de problèmes calculables en temps polynomial par une machine de Turing déterministe. *P* se référant à polynomial. Face à *P*, il y a la classe *NP* (*Non-determinist Polynomial*) définie à partir d’un modèle de calcul non déterministe. Il s’agit donc de la classe des problèmes calculables par une machine de Turing non déterministe en temps polynomial (dont on peut donc tester la validité de la solution en un temps polynomial). Pour rappel, les calculs d’une machine de Turing déterministe forment une suite alors que ceux d’une machine de Turing non déterministe forment un arbre dans lequel chaque chemin correspond à une suite de calculs possibles (Boussaïd, 2013). Un exemple type de problème *NP* est celui du voyageur de commerce, évoqué en section 9.5.

²⁶¹ A rapprocher du paradigme de l’utilité espérée, inspiré de la théorie des jeux et qui est à l’origine d’une théorie normative : le comportement rationnel d’un individu est celui qui pousse celui-ci à maximiser les valeurs d’utilité (Kermisch, 2010). L’utilité espérée est aussi connue sous le nom de théorie du choix rationnel (Boudon, 1999).

Simon propose d'avoir recours aux méthodes de *satisficing* en adéquation avec la rationalité limitée des acteurs.

9.2 La rationalité limitée dans l'exercice du choix

Choisir la meilleure alternative disponible selon un critère défini revient à optimiser. Choisir une alternative qui rencontre ou dépasse un critère spécifique mais sans garantir que ladite alternative est la meilleure ou qu'elle est unique revient à « satisfaire » (Simon, 1997). Elle correspond au *satisficing* (Simon, 1956).

L'optimisation est approchée, en théorie, par la programmation linéaire et ne coûte que le calcul d'une dérivée. Même dans des situations plus complexes, il est souvent possible de s'en sortir avec un système d'équations ou d'inéquations avec un critère établi selon une fonction linéaire. Un calcul numérique permet (toujours) de résoudre le problème posé (Simon, 1997). Mais la difficulté réside dans l'adéquation du formalisme du problème avec la réalité. Celle-ci peut être beaucoup plus complexe et dépasser le simple problème de calcul. Il est parfois impossible d'optimiser et c'est là que la recherche d'une alternative satisfaisante prend tout son sens.

L'exemple type que Simon utilise afin d'illustrer son propos est celui de la recherche d'une aiguille dans une meule de foin, problème emprunté directement à l'expression de Madame de Sévigné et dont la complexité est synonyme de quasi-impossibilité. Le problème que se pose Simon est cependant quelque peu différent de celui sous-entendu par l'adage populaire. Soient des aiguilles distribuées au hasard dans une meule de foin, avec une certaine densité²⁶². Si le but est de trouver l'aiguille la plus pointue de la meule, la méthode de résolution consistera à trouver toutes les aiguilles, les comparer et à les ordonner de la plus fine à la plus grossière.

²⁶² Un vieux réflexe d'ingénieur des mines nous invite à supposer que les aiguilles sont réparties de façon homogène dans la meule et qu'il existe bien une densité d'aiguilles, excluant tout effet dit « de pépite », hypothèse fondamentale de la géostatistique mais non explicitée par Simon.

Trouver l'aiguille la plus affûtée de toutes requiert un effort proportionnel à la taille de la meule (Simon, 1997). Or, si la meule est très large, on sera tenté de réduire le problème en ne considérant qu'une partie de celle-ci et sélectionner l'aiguille la plus affûtée dans cette portion. Dans un nième de la meule, les chances de trouver l'aiguille la plus affûtée est de $1/n$. Quand s'arrêter de chercher ? Soit après un effort donné et fixé à l'avance (en d'autres termes, un coût fixé de l'opération), soit après avoir trouvé une aiguille suffisamment pointue pour coudre, si l'on suppose évidemment que pouvoir coudre était le but initial et tacite de cette opération (Simon, 1977). Trouver une aiguille suffisamment pointue pour coudre ne dépend que de la densité d'aiguilles possédant la taille de pointe requise et non de la taille de la meule. Le temps de recherche est donc inversement proportionnel à la densité d'aiguilles fines dans la meule. Simon nous dit que c'est une propriété très utile dans un monde plein de meules et avec un nombre infini d'objectifs (Simon, 1977). Il s'agit bien du processus de *satisficing*, consistant à trouver une solution « suffisamment bonne » pour l'objectif donné.

Trouver une alternative satisfaisante ne dépend pas directement de la complexité de la situation et c'est une façon de s'en affranchir pour ne dépendre plus que de l'ensemble des alternatives possibles. Si le principe est facile à comprendre, il reste cependant à se poser la question de « comment poser le critère de satisfaction ? ».

La psychologie propose le mécanisme des niveaux d'aspiration pour établir le critère de satisfaction. Contrairement à une fonction d'utilité (nécessaire dans la recherche de l'optimum), le thermomètre de la satisfaction n'est pas limité aux valeurs positives, il y a un point zéro correspondant au contentement minimal et des valeurs négatives correspondant à l'insatisfaction. Les aspirations sont multi-dimensionnelles. Pour chaque dimension, on compare les espérances de réussite (qui définissent une aspiration) au niveau effectivement atteint. Si l'état atteint est supérieur à l'aspiration, il y a satisfaction ; dans le cas contraire, il y a insatisfaction (Simon [1969] 2004). S'il est facile de trouver des alternatives répondant aux critères, les standards s'élèveront ; dans le cas contraire, ils diminueront progressivement. Il s'agit d'un mécanisme de feedback par tâtonnement²⁶³

²⁶³ En français dans le texte.

(Simon, 1997), comme évoqué précédemment. En théorie du choix en contexte d'incertitudes, les niveaux d'aspiration correspondent à des attentes adaptatives (*adaptive expectations*) alors que l'optimisation correspond à des attentes rationnelles (*rational expectations*).

Il serait légitime de poser ici la question de la rationalité elle-même. Simon distingue la rationalité *procédurale* (Simon, 1997) ou *limitée* (Simon, 1972) de la rationalité *substantive* (Simon [1969] 2004) (Simon, 1997) ou *globale* (Simon, 1979) ou encore *parfaite* (Simon, 1997). **La première est en quête de satisfaction et est en lien avec les niveaux d'aspiration alors que la seconde est en quête d'optimum et en lien avec une fonction d'utilité.** Nous assumons ici, provisoirement, une synonymie entre rationalité procédurale et rationalité limitée de même qu'entre rationalité substantive et rationalité globale ou parfaite. Il s'agit en réalité d'une approximation quelque peu grossière quoique courante (Le Moigne, 1994)²⁶⁴ et nous reviendrons plus tard sur les nuances qu'il convient d'y apporter. Mais la question première de savoir ce qui définit la rationalité se pose. Est-ce que la rationalité limitée relève bien encore de la rationalité ? Qu'est-ce qui le garantit ? Cette question qui fait appel à un peu de formalisme logico-mathématique est traitée dans la section suivante.

9.3 Qu'est-ce qu'une décision rationnelle ?

La théorie économique définit un décideur *rationnel* comme quelqu'un qui choisit une alternative donnée après un processus de délibération au cours duquel il répond à trois questions :

- Qu'est-ce qui est faisable ?
- Qu'est-ce qui est désirable ?

²⁶⁴ « En introduisant ces deux conceptions différentes de la rationalité [rationalité substantive et rationalité procédurale], H.A. Simon n'abandonne pas pour autant le paradigme de la rationalité limitée, ni donc de la distinction entre la rationalité présumée parfaite et la rationalité limitée ; mais il ne le précise pas explicitement, si bien que plusieurs interprètes ont pu considérer la rationalité procédurale comme une façon de caractériser la rationalité limitée (...) » (Le Moigne, 1994).

- Qu'est-ce qui constitue la meilleure alternative compte tenu de mes souhaits et compte tenu des contraintes de faisabilité²⁶⁵ ? (Rubinstein, 1998)

Une hypothèse fondamentale est ici posée : l'opération consistant à découvrir les alternatives et l'opération consistant à définir les préférences sont totalement indépendantes (Rubinstein, 1998).

Sur un plan formel, le modèle de choix abstrait se réfère à un décideur qui choisit au départ d'ensembles d'alternatives qui sont eux-mêmes des sous-ensembles d'un plus grand ensemble **A**. Le problème du choix *A* est un sous-ensemble de **A**. La décision consiste à isoler un élément de *A*. Il s'agit donc de définir une relation de préférence sur l'ensemble **A**, soit $\succeq$ cette relation, où $x \succeq y$ signifie que *x* est préféré à *y*.

Si l'on fait face à un problème de choix $A \subseteq \mathbf{A}$, choisir un x^* dans *A* qui soit $\succeq$ -optimal revient à chercher $x^* \succeq x$ pour tout $x \in A$. On peut remplacer cette relation de préférence par une fonction d'utilité $u : \mathbf{A} \rightarrow \mathbf{R}$ où **R** désigne l'ensemble des nombres réels et $a \in \mathbf{A}$ tel que $u(a) \geq u(a')$ correspond à $a \succeq a'$. Il faut satisfaire certaines hypothèses afin d'établir une correspondance entre la relation de préférence et la fonction d'utilité :

- La première hypothèse est « la connaissance du problème ». Il faut que le décideur ait la connaissance parfaite du problème de choix auquel il est confronté, ce qui implique la conscience de toutes les alternatives qu'il peut choisir. Le décideur peut donc choisir tout $x \in A$ et le x^* choisi ne peut pas être moins préféré que tout autre *x* de *A*.
- La deuxième hypothèse est la « clarté des préférences » c'est-à-dire qu'un ordonnancement parfait est possible sur tout l'ensemble des préférences.
- La troisième hypothèse est que le décideur est un calculateur parfait, aux capacités illimitées et ne commettant pas d'erreurs. Quelle que soit la

²⁶⁵ « *What is the best alternative according to the notion of desirability, given the feasibility constraints?* » (Rubinstein, 1998)

complexité calculatoire contenue dans l'expression $\max u(a), a \in \mathbf{A}$, elle peut être estimée.

- La quatrième hypothèse est l'indifférence du décideur à des descriptions logiquement équivalentes d'alternatives. Le remplacement d'une alternative par une autre qui lui est logiquement équivalente n'affecte pas le choix. Si deux ensembles A et B sont égaux, le choix dans A est identique au choix dans B .

Notons que souvent le décideur base son choix sur le calcul des conséquences de ce choix (Rubinstein, 1998) ou encore les états futurs possibles de la situation, les états réels ou perçus étant ici agrégés (Simon, 1979). Si l'ensemble des préférences est défini dans $\mathbf{A}$, les conséquences perçues par le décideur et engendrées par les alternatives de $\mathbf{A}$ ont pour domaine de définition un ensemble $\mathbf{C}$.

Il existe une fonction « conséquence » qui applique A sur C , $f: \mathbf{A} \rightarrow \mathbf{C}$ qui représente la perception par le décideur de la dépendance causale entre une alternative et une conséquence ainsi qu'une fonction numérique $V: \mathbf{C} \rightarrow \mathbf{R}$ qui applique l'ensemble des conséquences sur l'ensemble des nombres réels. Cette fonction est parfois appelée fonction de gain (Simon, 1979) et s'apparente à une fonction d'utilité²⁶⁶. Le décideur choisira l'alternative dont le résultat lui donnera le plus grand gain c'est-à-dire pour tout ensemble $A \subseteq \mathbf{A}$, l'alternative de A qui aura la meilleure conséquence, à savoir $\max V(f(a)), a \in \mathbf{A}$, résultant logiquement de l'application de l'ensemble des alternatives sur l'ensemble des conséquences et de la maximisation du gain associé à ces conséquences dans l'ensemble des nombres réels.

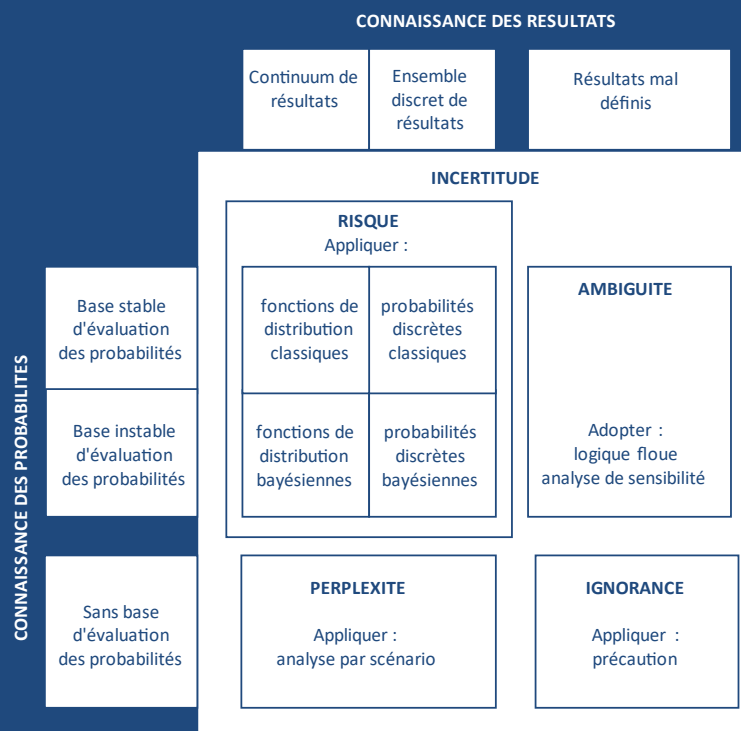
Ce type de rationalité correspond à la recherche de l'optimum (Rubinstein, 1998) et renvoie à une règle de certitude correspondant à l'un des concepts classiques de rationalité comme le définit Herbert Simon (Simon, 1979). Il est possible d'introduire la prise en compte de l'incertitude pesant sur la connexion action-conséquence dans ce type de choix. Rubinstein introduit

²⁶⁶ Le formalisme employé par Simon est quelque peu différent et varie d'un ouvrage à l'autre. Nous suivons donc plutôt celui de Ariel Rubinstein dans l'ouvrage *Modeling Bounded Rationality* (Rubinstein, 2008) et l'adaptions au besoin, en consultant Simon, afin de privilégier les expressions qui nous paraissent les plus faciles à comprendre.

un espace des états afin d'enrichir le modèle (Rubinstein, 1998) alors que Simon préfère dissocier cette éventualité en identifiant une règle probabiliste distincte mais représentative d'une rationalité à part entière (Simon, 1979). Comme il s'agit toujours d'une rationalité substantive, dans la mesure où soit les alternatives sont connues avec certitude soit il est possible de leur attribuer une probabilité d'occurrence, nous considérons qu'il est licite de les agréger comme le propose, sans en débattre, Rubinstein (Rubinstein, 1998). En effet, le sujet reste – d'une certaine façon – omniscient, même s'il s'agit ici d'estimer une incertitude ! L'oxymore n'est en réalité évité de justesse qu'en se basant sur la taxonomie de Stirling (Stirling, 2000) relative aux différents types d'incertitudes. En effet, dès lors qu'il existe une base de probabilités, nous évoluons dans un sous-domaine de l'incertitude consacré au risque et nous nous écartons des autres domaines de celle-ci – plus difficilement conciliables avec la rationalité substantive de Simon –, que sont l'ambiguïté, la perplexité et l'ignorance (voir encadré 2).

Encadré 2 – « Les définitions formelles du risque, de la perplexité, de l'ambiguïté et de l'ignorance » Tableau extrait de (Stirling, 2000, p. 80)

Soit un plan dans lequel nous représentons, en abscisse, la connaissance des résultats et, en ordonnée, la connaissance des probabilités. Sur l'abscisse, les résultats apparaissent en trois catégories : continuum, ensemble discret et résultats mal définis. En ordonnée, trois catégories également : une base stable d'évaluation des probabilités, une base instable d'évaluation des probabilités et l'absence de base d'évaluation des probabilités. Le domaine du risque englobe le sous-espace du plan défini par les résultats discrets et continus et l'évaluation des probabilités stable ou instable. Le domaine de la perplexité est défini comme sous-espace du plan correspondant à l'absence de base d'évaluation des probabilités et une connaissance des résultats discrets ou continus. L'ambiguïté est définie sur le domaine constitué des résultats mal définis mais pour lesquels il existe une base (stable ou instable) d'évaluation des probabilités. Enfin, l'ignorance correspond au domaine résiduel restant pour lequel les résultats sont mal définis et les probabilités ne peuvent être évaluées (d'après Stirling, 2000).



L'espace des états Ω représente la liste des facteurs extérieurs ou exogènes qui sont pertinents vis-à-vis des intérêts du décideur et qui sont hors de son contrôle. La fonction « conséquence » f se redéfinit alors comme suit : $f : \mathbf{A} \times \Omega \rightarrow \mathbf{C}$, toute action $a \in \mathbf{A}$ engendrant une conséquence ($\in \mathbf{C}$) pour tout état dans Ω . Ce type d'action a est appelé « acte » et la relation de préférence $\succeq$ définie sur $\mathbf{A}$ est désormais induite des préférences sur les actes. Formellement, le problème du choix n'est plus seulement $A \subseteq \mathbf{A}$ mais bien un couple (A, Ω) où $A \subseteq \mathbf{A}$ est l'ensemble des alternatives et $\Omega \subseteq \Omega$ est l'ensemble des états non exclus par les informations dont le décideur dispose. Il est communément admis que le choix de l'homme rationnel se base sur une croyance portant sur Ω , croyance qu'il met à jour, nous dit Rubinstein, par la formule de Bayes²⁶⁷, la distribution de probabilités étant supposée connue (Simon, 1979).

Cette approche théorique traditionnelle de l'homme rationnel a été remise en question par Herbert Simon qui a insisté davantage sur le comportement

²⁶⁷ Du théorème de Bayes portant sur les probabilités dites conditionnelles et permettant d'estimer a posteriori la probabilité d'apparition d'un événement A en se fondant sur une première estimation *a priori* de cette probabilité (ou de la probabilité d'apparition d'un événement B proche de A) et en prenant en compte un certain nombre d'observations résultant d'expériences aléatoires, qui permettent d'actualiser cette estimation de la probabilité d'apparition de A. Le fait de se fonder sur la probabilité d'apparition *a priori* de A (ou de l'événement proche B) pour estimer a posteriori la probabilité de A peut être considérée comme une démarche « subjective » au sens où elle ne se base pas sur des observations répétées (comme dans une approche « fréquentiste » objective) et qu'il n'y a aucune certitude *a priori* sur l'équivalence de ces probabilités. Mais la prise en compte d'observations de plus en plus nombreuses afin d'actualiser la probabilité d'apparition de A, par la *vraisemblance* de ces observations (c'est-à-dire la probabilité conditionnelle « fréquentiste »), confère néanmoins une certaine « objectivité », d'autant plus grande étant donné le poids croissant accordé à ces observations. C'est en ce sens que les probabilités bayésiennes sont souvent considérées, à tort, comme « subjectives » mais il faut garder à l'esprit que le théorème de Bayes, lui, tient compte de probabilités fréquentistes et objectives. Nous devons l'idée de « probabilité subjective » à l'économiste John Keynes (1883-1946), probabilité qu'il définit comme le « degré de croyance rationnelle » (Lecourt, 2001, p. 71). Les probabilités bayésiennes ne sont donc pas synonymes de probabilités subjectives, elles sont en réalité à mi-chemin entre ces dernières et les probabilités fréquentistes dites « objectives » lesquelles renvoient à des expériences répétées (Kermisch, 2010). Notons enfin que l'expression « probabilité fréquentiste » renvoie à une définition non complètement rigoureuse de la probabilité en ce sens que cette dernière est considérée comme la limite d'une fréquence relative de la réalisation de l'événement quand le nombre d'observations croît indéfiniment (Spiegel, 1976) sans devoir introduire la notion de tribu et de théorie de la mesure (Chossat *et al.*, [2001] 2012).

(réel) du décideur (*behavior*) plutôt que sur le processus menant à la décision (Rubinstein, 1998). Cette critique a dépassé le champ de la micro-économie, la « marque de la rationalité limitée » ayant été relevée très tôt par certains auteurs dans la perception des risques environnementaux, par exemple (Burton, 1968). Cependant, même si le comportement effectif du décideur se distancie de la procédure de choix de l'homme rationnel, au sens d'une rationalité parfaite en recherche d'optimum²⁶⁸, un comportement « comme si » peut être supposé, à savoir un comportement équivalent à celui décrit par la procédure parfaitement rationnelle²⁶⁹. Il suffit pour cela que la fonction de choix induite par le décideur satisfasse une condition nécessaire et suffisante de rationalité connue, en théorie du choix, sous le nom d'axiome d'indépendance, d'indépendance binaire, de *condition de cohérence*²⁷⁰ ou encore *d'indépendance des alternatives non pertinentes*²⁷¹ (Rubinstein, 1998) qui s'énonce comme suit :

Si pour tout $A_1 \subseteq A_2 \subseteq A$, alors si $C(A_2) \in A_1$ où $C(A)$ désigne le choix du décideur confronté au problème A , alors $C(A_1) = C(A_2)$. Ceci signifie que si un élément choisi dans le grand ensemble A_2 est aussi un élément de A_1 , alors le décideur le choisit également dans l'ensemble A_1 .

²⁶⁸ Le comportement (parfaitement) rationnel est celui qui viserait à maximiser les valeurs d'utilité c'est-à-dire la satisfaction procurée par un gain. La théorie de l'utilité espérée ou encore théorie du choix rationnel (Boudon, 1999, p. 108 – voir aussi section 10.5.3) puise son origine dans le paradoxe de Saint-Petersbourg formulé par les frères Bernoulli, Nicolas et Daniel. Un joueur joue à pile ou face et gagne 2^n pièces de monnaie si face sort pour la première fois au n ème lancer. L'espérance mathématique du gain est infinie puisque le jeu dure aussi longtemps que face ne sort pas, le joueur devrait être prêt à se ruiner pour avoir le droit de jouer. Pourtant, aucun acteur réel ne suivra ce que la théorie des probabilités lui recommande pourtant. L'explication de Daniel Bernoulli est la suivante : les joueurs ne se fondent pas sur l'espérance mathématique du gain monétaire mais bien sur l'espérance mathématique de l'utilité de ce gain, c'est-à-dire son utilité espérée. A chaque gain est donc associée l'utilité que le joueur lui accorde. L'utilité du gain croît de moins en moins au fur et à mesure que le gain augmente et le « meilleur pari » est celui qui maximise l'espérance mathématique de l'utilité d'une décision et n'est pas associée à une utilité espérée infinie (Kermisch, 2010, p. 12). L'adjectif « subjectif » est là pour rappeler que la mesure de probabilité est attribuée par le décideur et n'est pas une donnée objective du problème de décision.

²⁶⁹ Ce « comme si » nous permet de continuer à utiliser le formalisme de la décision parfaitement rationnelle.

²⁷⁰ *Consistency condition* (Rubinstein, 2008), nous traduisons.

²⁷¹ *Independence of irrelevant alternatives*, ibid. Nous traduisons.

Cela relève tellement du bon sens (Godard *et al.*, 2002) qu'il est parfois difficile d'en saisir la pertinence. En d'autres termes, éliminer les alternatives non choisies n'affecte pas le choix de $x \in A_1$ comme meilleure option ou encore, **si a est préféré à b dans un ensemble réunissant a et b, alors l'introduction d'un élément c élargissant cet ensemble ne peut pas rendre préférable b à a**. Le choix de l'optimalité vérifie cet axiome mais il en est de même d'un choix satisfaisant (*satisficing procedure*).

En effet, soient une règle d'ordonnancement²⁷² O telle qu'un ordre alphabétique ou chronologique par exemple, S l'ensemble des alternatives satisfaisantes tel que $S \subseteq A$ et une règle de bris de l'égalité²⁷³. Pour tout problème de décision A , les alternatives sont examinées séquentiellement selon la règle O jusqu'à rencontrer une alternative satisfaisante membre de l'ensemble S . Dès que c'est le cas, le décideur la choisit et s'arrête. Si aucune alternative de A n'appartient à S , la règle du bris d'égalité est appliquée en satisfaisant à l'axiome d'indépendance tel que choisir, par exemple, le dernier élément de A ²⁷⁴. L'ensemble de ce schéma de choix répond à l'axiome d'indépendance. En effet, si l'on suppose $A_1 \subseteq A_2$ et $C(A_2) \in A_1$, alors $C(A_2)$ est la première alternative satisfaisante de A_2 (selon la règle d'ordonnancement) et c'est aussi la première alternative satisfaisante de A_1 . Si $C(A_2) \notin S$, alors A_1 ne contient aucun élément de S et, parce que la règle de bris d'égalité satisfait l'axiome d'indépendance, on a $C(A_2) = C(A_1)$ (Rubinstein, 2008).

C'est un cas particulier qui nous intéresse ici et qui fait intervenir le niveau d'aspiration. Supposons l'ensemble S comme défini par une fonction V et un nombre v^* tel que $S = \{a \in A \mid V(a) \geq v^*\}$ où la fonction V assigne un

²⁷² On peut soutenir que la règle d'ordonnancement est également une règle de préférences. Cependant, nous rappelons que la règle de préférences est celle qui correspond à la fonction d'utilité à l'étude alors que l'ordonnancement est une règle appliquée préalablement.

²⁷³ *Tie-breaking rule* (Rubinstein, 2008). Nous traduisons. Il s'agit donc d'une règle de « tie-break » bien connue en sport par exemple et qui consiste à ordonner une épreuve complémentaire permettant de départager deux compétiteurs à égalité. Cette règle s'applique également dans d'autres domaines. Dans les examens de recrutement à l'administration belge par exemple, à score égal, le candidat le plus âgé sera prioritaire, recourant au même principe. Le tie-break peut être fixé sur l'âge du candidat ou alternativement sur la date d'introduction de son dossier.

²⁷⁴ En d'autres termes, si aucune alternative A n'appartient à S alors toutes les alternatives sont insatisfaisantes et à « égalité entre elles » et la règle du *tie-break* est appliquée.

nombre réel à chaque alternative potentielle et v^* désigne le niveau d'aspiration. Le décideur cherche donc une alternative dont la valeur est au-dessus du niveau d'aspiration fixé.

Un exemple simple permet de fixer les idées. Il s'agit de recruter quelqu'un à un poste pour lequel une note minimale v^* au test organisé est requise. $V(a)$ est la note obtenue au test et les candidats sont ordonnancés par ordre alphabétique. La résolution du problème par recherche d'optimum consistera à sélectionner le candidat ayant obtenu la note la plus élevée $\max V(a)$, $a \in A$ alors que la résolution par *satisficing* requiert de trouver le premier candidat sur la liste tel que $V(a) \geq v^*$, les deux méthodes de résolution étant rationnelles.

9.4 Les biais dans la prise de décision

La prise de décision face à un problème donné n'est pas nécessairement rationnelle. L'expérience de l'aventure humaine nous livre profusion d'exemples. Mais même lorsque la décision reste dans le champ de la rationalité, nous avons vu que cette dernière n'était pas toujours globale ou parfaite. Un choix dicté par une rationalité limitée satisfait la condition nécessaire et suffisante posée par l'axiome d'indépendance et n'en est donc pas moins rationnel. Il nous faut cependant également considérer les raisons principales pour lesquelles les choix humains s'écartent du paradigme de la rationalité, ceci afin de mieux circonscrire l'espace de la décision. Il y aurait principalement trois motifs sous-jacents aux procédures de décision qui se heurtent au paradigme de l'homme rationnel (Rubinstein, 1998)

9.4.1 Les effets de cadrage

La première distorsion du paradigme de la rationalité réside dans les effets de cadrage (*framing effects*) du problème, la manière dont celui-ci est présenté. Nous avons vu précédemment que le problème du choix revient à choisir un élément d'un ensemble. Partant de ce formalisme des ensembles, il n'y a pas de distinction possible entre des ensembles de type $A_1 = \{a, b, b\}$

et $A_2 = \{a, a, a, b, b, b\}$ puisqu'ils sont égaux²⁷⁵. En revanche, si le langage dans lequel ces ensembles sont définis est un langage de listes, dans lequel la répétition des éléments a et b est pertinente, il est possible de définir un problème du type : « choisir l'alternative qui apparaît le plus souvent dans la liste ». Si l'analyse du premier ensemble fait ressortir b comme solution, l'analyse du deuxième donnerait l'avantage à a. L'axiome d'indépendance est violé puisque si $A_1 \subseteq A_2 \subseteq A$, et si $C(A_2) \in A_1$ alors l'identité $C(A_1) = C(A_2)$ devrait être satisfaite, ce qui n'est pas le cas.

L'effet de cadrage peut être illustré par la célèbre expérience Tversky et Kahneman (Tversky et Kahneman, 1981) qui ont soumis des étudiants à des problèmes formellement identiques d'un point de vue logique mais présentés en des termes différents. C'est ce que les psychologues appellent l'effet de cadrage par équivalence²⁷⁶, un de ces pièges de la pensée plus connu sous le nom de biais cognitif²⁷⁷ (Heuer, 1999 ; Lebraty, 2004). Le problème est énoncé comme suit : une épidémie venue d'Asie menace de frapper les Etats-Unis, le nombre de morts est estimé à 600 personnes et deux programmes sont proposés afin de la combattre, A et B. Le programme A permet de sauver 200 personnes et donc corollairement d'en laisser mourir 400. Le programme B a 33% de chances de sauver les 600 personnes et 66% de risques de ne sauver personne. La majorité des répondants (72%) choisissent l'option A. Sur un plan probabiliste, ces deux schémas sont équivalents puisque le nombre de survivants attendus est le même. Toutefois, les répondants choisissent l'option A en raison du risque de ne sauver personne avec l'option B. L'expérience est retentée avec deux autres groupes en reformulant à nouveau le problème en ces termes : l'option A provoque la mort de 400 personnes et l'option B a 33% de chances que personnes ne meure et donc 66% que personne n'en survive. Cette fois, les répondants ont choisi l'option B. Tversky et Kahneman précisent que ces expériences ont été menées devant différents groupes d'étudiants, y

²⁷⁵ Deux ensembles A et B sont égaux lorsqu'ils ont exactement les mêmes éléments, il s'agit de la propriété d'extensionnalité : $A = B$ si et seulement si $\forall x (x \in A \leftrightarrow x \in B)$ où $\leftrightarrow$ désigne l'équivalence logique.

²⁷⁶ Par opposition à l'effet de cadrage par accentuation.

²⁷⁷ Il s'agit d'une erreur mentale causée par des stratégies de traitement simplifié de l'information (Heuer, 1999). Les biais cognitifs conduisent à une déviation des décisions des acteurs par rapport à leurs intentions (Lebraty, 2004).

compris des physiciens – sans doute réputés pour leur logique et leur connaissance des probabilités – avec les mêmes résultats. Il semble y avoir une aversion au risque lorsqu’il s’agit de penser aux gains potentiels (i.e. première phase de l’expérience où l’option A est présentée comme permettant de sauver 200 personnes et est donc privilégiée) et, *a contrario*, une acceptation de celui-ci lorsque l’on songe aux pertes potentielles (i.e. seconde phase de l’expérience où l’option A est présentée comme assurant 400 décès ce qui fait privilégier l’option B). Les effets de cadrage peuvent évidemment être utilisés sciemment dans la communication. Lorsqu’un effet de cadrage par équivalence n’est pas possible, un cadrage par accentuation est parfois utilisé afin de manipuler une opinion collective. Dans le cadre de l’industrie nucléaire, comme le souligne Christophe Piar dans son analyse de la communication d’EDF²⁷⁸, il pourrait être inefficace de jouer sur un cadrage par équivalence en tentant une persuasion directe qui consisterait à reformuler plus positivement certains aspects. Il pourrait être plus rentable, au contraire, de jouer sur les dimensions différentes de l’objet d’étude. Si les aspects économique et environnemental sont à l’examen, le choix du décideur dépendra de la pondération de chacun de ces aspects, optant, par exemple, pour l’énergie nucléaire s’il est convaincu par ses avantages économiques ou à l’inverse, décriant cette production d’énergie, si l’environnement le touche davantage et qu’il est par ailleurs convaincu que l’énergie nucléaire représente un danger significatif pour celui-ci.

9.4.2 Les effets de simplification

La deuxième distorsion réside dans la tendance à simplifier les problèmes de décision afin d’épargner des ressources de délibération. Utilisant le formalisme introduit dans la précédente section, on suppose une règle d’ordonnancement O et une règle de préférence $\succeq$ sur l’ensemble $\mathbf{A}$. Le problème de décision considéré consiste à sélectionner le premier et le dernier élément de l’ensemble A ($A \subseteq \mathbf{A}$) selon la règle O et à choisir le meilleur des deux selon la règle de préférence. En raison de la règle d’ordonnancement, le décideur ne considère pas tous les éléments de A pour

²⁷⁸ <https://www.ppa.fr/ecole-commerce-alternance/Leffet-de-cadrage-un-concept-essentiel-pour-elaborer-une-strategie-de-communication.pdf> [Consulté le 1^{er} juin 2020].

procéder à son choix mais bien uniquement ceux qui ont été présélectionnés. Il est aisé de voir que si l'on considère l'ensemble des alternatives $\{a, b, c\}$, une règle O d'ordonnement alphabétique sélectionnant le premier et le dernier élément de l'ensemble ainsi qu'une règle de préférence établissant $b \succeq a \succeq c$, alors a est choisi. Pourtant si nous avons considéré le sous-ensemble $\{a, b\}$, b aurait été choisi. L'axiome d'indépendance n'est pas satisfait puisque si $A_1 \subseteq A_2 \subseteq A$, et si $C(A_2) \in A_1$ alors l'identité $C(A_1) = C(A_2)$ aurait dû être satisfaite, ce qui n'est pas le cas puisque $b \neq a$.

L'effet de simplification peut s'illustrer facilement à chaque fois qu'une règle de screening préalable est envisagée. Celle-ci pourrait avoir, par exemple, pour objectif de procéder à une présélection d'alternatives sur la base de la connaissance immédiatement disponible ou sur les ressources d'investissement à allouer à la recherche d'autres alternatives éventuelles. Dans le cas d'étude dont il sera question ultérieurement, il s'agira d'évaluer les roches hôtes potentielles en Belgique afin d'accueillir un stockage de déchets radioactifs. Plutôt que d'envisager toutes les structures géologiques possibles sur le territoire national et de les comparer, quelques règles d'ordonnement peuvent *a priori* être proposées. L'une de celles qui fut historiquement avancée par l'ONDRAF était l'état effectif de la connaissance, supérieur pour l'argile de Boom – une argile faiblement indurée – à celui de toute autre roche. L'effort d'investigation d'autres roches potentielles complètement différentes de celle étudiée dans le laboratoire souterrain pouvant paraître rapidement déraisonnable, la sélection d'alternatives semblait pouvoir se limiter à un ensemble d'argiles de même nature, à savoir les argiles dites « peu indurées ». En pratique, ceci aboutit au choix de l'argile de Boom (BC) et de l'argile yprésienne (YC). Mais l'AFCN conteste la légitimité de cette règle implicite de présélection. Selon l'AFCN, le manque de connaissance des autres roches hôtes ne constitue pas une règle d'ordonnement valable. L'AFCN enjoint donc à l'ONDRAF d'étudier toutes les autres roches hôtes, ce qui, en simplifiant quelque peu, revient à

considérer également toutes les argiles indurées²⁷⁹. Sans discuter ici la pertinence de la critique réelle formulée par l'AFCN (nous y reviendrons dans l'analyse de l'étude de cas), traduisons cet exemple avec le formalisme de Rubinstein et Simon :

On considère l'ensemble {BC, YC, ARG} où ARG désigne une argilite indurée dont l'étude est recommandée par l'AFCN.

- Soit une règle de préférence (P) : $YC \succcurlyeq BC \succcurlyeq ARG$. Celle-ci se fonderait *a priori* sur les avantages des argiles peu indurées (e.g. propriétés de sorption, *self-sealing*) par rapport à ARG et sur le fait que les YC sont enfouies plus profondément en moyenne que BC. En d'autres termes, il y aurait donc ici deux critères en lien avec la sûreté qui justifieraient cette règle de préférence. Le premier fait prévaloir les argiles peu indurées (YC, BC) sur les argiles indurées (ARG) par rapport essentiellement à la capacité d'autocicatrisation des premières supérieure à celle des secondes. Le deuxième fait préférer l'argile yprésienne à l'argile de Boom car la plupart des occurrences de la première se trouvent à plus grande profondeur que la seconde.
- Sur le plan de la connaissance acquise aujourd'hui, il est incontestable que l'ordre suivant peut être établi : $BC > YC > ARG$ où $>$ signifie « mieux connu que », de sorte qu'il est possible de fonder une règle d'ordonnement O sur cette base. Soit O qui présélectionne les roches en opposant « le mieux connu » au « moins connu ».

Appliquons la règle d'ordonnement O à l'ensemble {BC, YC, ARG}. Cette règle nous conduit à sélectionner {BC, ARG}. En appliquant ensuite la règle de préférence P à cette sélection, nous obtenons BC. Si nous appliquons à présent la règle O sur le sous-ensemble {BC, YC} de {BC, YC, ARG}, cela conduit à une sélection identique à l'ensemble de départ soit {BC, YC}. Or,

²⁷⁹ Nous simplifions le propos en ne considérant ni les roches cristallines ni les roches évaporitiques. Il s'agit donc de considérer ici toutes les roches à dominante argileuses c'est-à-dire les pélites. Ces pélites incluent ce que l'on appelle communément les « schistes », terme impropre et vernaculaire. Sans entrer dans les subtilités pétrographiques à ce stade, et par opposition aux argiles peu indurées, nous désignons les pélites ne faisant pas partie de la catégorie des argiles peu indurées comme des argiles indurées.

sur le sous-ensemble des argiles peu indurées {BC, YC} la règle de préférence P conduit au résultat YC...

Le recours au formalisme permet de mieux se rendre compte du glissement qui s'opère (voir figure 9-1) :

$$A_2 = \{BC, YC, ARG\} \rightarrow (O) \rightarrow \{BC, ARG\} \rightarrow (P) \rightarrow BC$$

$$A_1 = \{BC, YC\} \rightarrow (O) \rightarrow \{BC, YC\} \rightarrow (P) \rightarrow YC$$

Remarquons que l'ensemble {BC, ARG}, obtenu après avoir appliqué la règle d'ordonnancement O à l'ensemble {BC, YC, ARG}, n'est pas l'ensemble A_1 . Par conséquent, la condition $A_1 \subseteq A_2 \subseteq A$ n'est plus respectée.

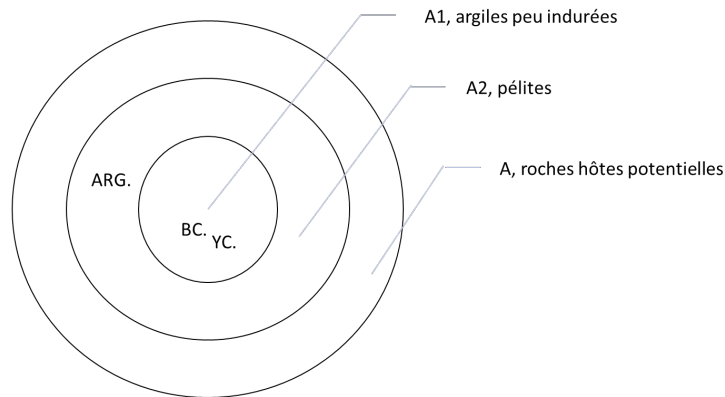


Figure 9-1 – Diagramme de Venn représentant l'ensemble A_1 des argiles peu indurées comme sous-ensemble de A_2 , ensemble des pélites, lui-même inclus dans A , l'ensemble de toutes les roches hôtes potentielles. Illustration de $A_1 \subseteq A_2 \subseteq A$.

En d'autres termes, nous appliquons la règle de préférence P, après avoir appliqué O, sur un ensemble {BC, ARG} dans le premier cas et sur un ensemble {BC, YC} dans le second cas, mais $\{BC, YC\} \not\subseteq \{BC, ARG\}$. Les conditions de l'axiome d'indépendance ne sont donc pas rencontrées et, dès lors, celui-ci ne peut s'appliquer. Par conséquent, $C(A_1) \neq C(A_2)$. Le recours à une règle d'ordonnancement O, en général en vue d'économiser des ressources calculatoires ou pour toute autre raison, a éliminé la meilleure solution possible (YC), sur la base de critères non liés à la règle de préférence. L'axiome d'indépendance s'applique à P, et non à O. La règle O, utilisée éventuellement en vue de simplifier le problème, a dérationalisé sa

recherche de solution. Notons bien que dans cet exemple, la relation de préférence P supposée n'est pas discutée. Est-il d'ailleurs possible d'établir *a priori* une telle relation ? Cette discussion est reportée à l'étude de cas.

9.4.3 Le biais des raisons procédurales

La troisième distorsion est la recherche de raisons procédurales²⁸⁰ pour faire un choix, c'est-à-dire le fait de rechercher des raisons dans les données du problème de décision lui-même afin de pouvoir préférer une option à une autre (Huber *et al.*, 1982 ; Rubinstein, 2008). En effet, les choix sont le plus souvent motivés par des raisons et si celles-ci sont tout à fait indépendantes du problème posé, il n'y a pas de conflit de rationalité. Cependant, le choix peut être conditionné par des raisons internes au problème, c'est-à-dire dépendantes de celui-ci et cela génère le plus souvent un conflit de rationalité. Analysons ce lien sur le plan formel. Si l'on considère une règle d'ordonnancement partiel D définie sur A telle que $a D b$ signifie « a domine clairement b ». On considère le problème de choix A tel que le décideur choisisse une alternative qui domine plus d'alternatives que toute autre dans l'ensemble A . Pour cela, il faut introduire une règle de comptage telle que pour chaque alternative $a \in A$, $N(a)$ compte le nombre d'alternatives de A qui sont « dominées » compte tenu de la règle D . Il faut dès lors choisir l'alternative a^* telle que $N(a^*) \geq N(a)$ pour tout $a \in A$. La raison de préférer une alternative plutôt qu'une autre est précisément le nombre d'alternatives qu'elle surclasse. Il s'agit bien ici d'une raison intrinsèque au problème posé, une raison interne qui est définie par les autres éléments de l'ensemble. Cette raison n'est pas indépendante du problème posé. L'axiome d'indépendance n'est évidemment pas rencontré ici puisque tout élargissement de l'ensemble va entraîner un choix différent, l'identité $C(A_1) = C(A_2)$ n'étant jamais satisfaite.

L'effet de recherche des raisons procédurales peut s'illustrer par l'expérience conduite par Tversky et Shafir (Tversky et Shafir, 1992), qui ont pu montrer que la recherche d'alternatives supplémentaires n'est pas uniquement

²⁸⁰ Il s'agit d'une traduction très libre de « *search for reasons* » que nous ne trouvons pas très explicite.

guidée par une volonté de trouver la meilleure option possible comme le suggérerait la théorie de la maximisation mais aussi par la difficulté de choisir entre les alternatives proposées. Quand un choix est difficile et engendre un certain conflit, les humains ont tendance à davantage chercher une autre option que celles à leur disposition. Tversky et Shafir rapportent l'expérience de leur ami Thomas Schelling parti chercher une encyclopédie pour ses enfants et, se rendant compte que deux encyclopédies de qualité et de prix similaires étaient disponibles, ne put s'en résoudre à en acheter une et rentra bredouille à la maison. Bien que toutes deux satisfaisantes, la difficulté du choix le fit renoncer à l'achat. Considérons l'expérience où il faille tirer deux cartes d'un paquet de cartes. Chaque carte tirée donne droit à un prix indiqué sur sa face. Le sujet qui se soumet à cette expérience doit « simplement » choisir une des deux cartes et donc un des deux prix. Une option lui est cependant laissée : s'il le souhaite, il peut payer une certaine somme afin de tirer une troisième carte et élargir ainsi son choix. Si la carte A est nettement plus avantageuse que la carte B, peu de gens accepteront de payer pour tirer une troisième carte. En revanche, si les cartes tirées, par exemple A et C, semblent équivalentes en termes de prix qu'elles proposent, le sujet sera plus enclin à aller jusqu'à mettre de sa poche pour avoir la possibilité d'élargir son choix (Rubinstein, 1998). Inversement, face au premier choix pourtant facile entre A et B où par hypothèse A est nettement plus avantageux que B, l'introduction d'un élément C, différent de A mais également attrayant peut engendrer un conflit et amener le sujet à différer son choix (Tversky et Shafir, 1992). Nous avons déjà tous été confrontés à ce type d'expérience, par exemple, dans un magasin de vêtements où la vendeuse ou le vendeur trop zélé aurait mieux fait de s'abstenir d'apporter un troisième article alors que nous étions sur le point décider entre les deux alternatives déjà proposées ! Ce comportement est contraire au paradigme de l'homme rationnel optimisant. L'axiome d'indépendance n'est d'ailleurs pas vérifié.

Pour finir de s'en convaincre, une expérience statistique fut entreprise par les deux chercheurs psychologie à l'université de Princeton sur deux échantillons de plus de 120 étudiants chacun. Il était question d'acheter à l'époque (1992) un lecteur de CD audio. Le premier groupe d'étudiants passe par un magasin proposant une remise exceptionnelle d'un jour sur un lecteur SONY au prix imbattable de 99\$. Deux tiers des étudiants décident d'acheter ce modèle alors que le tiers restant choisit d'en connaître davantage sur les

autres modèles de lecteurs. L'autre groupe d'étudiants voit la même offre mais aux côtés d'une autre, proposant un lecteur AIWA pour le prix tout aussi imbattable de 159\$. Le pourcentage d'étudiants décidant alors de s'abstenir d'acheter et d'attendre d'en savoir davantage sur les autres lecteurs disponibles s'éleva à 46% contre 34% dans le groupe d'étudiants n'ayant connu que la seule promotion sur le SONY. Formalisons : si x = l'achat du lecteur AIWA ; y = l'achat du lecteur SONY et z = l'attente d'en savoir davantage sur les autres modèles et si $P(z ; y)$ représente le pourcentage de sujets ayant choisi z dans la première expérience et $P(z ; y ; x)$ le pourcentage ayant également choisi d'attendre dans la seconde expérience, le choix par maximisation, c'est-à-dire le choix de l'acheteur parfaitement rationnel, devrait impliquer nécessairement que $P(z ; y) \geq P(z ; y ; x)$, le pourcentage de sujets choisissant l'expectative z quand il n'existe qu'une promotion étant supérieure ou au moins égal au pourcentage de sujets choisissant l'expectative alors qu'ils sont confrontés à deux propositions de ristourne. C'est la condition dite de régularité ou encore l'axiome d'indépendance selon lequel, en pratique, la part de marché d'un produit ne peut (jamais) être augmenté en élargissant l'ensemble des produits disponibles. Il n'est, en effet, pas rationnel de renoncer à acheter plus le nombre d'alternatives proposées augmente. Pourtant $P(z ; y) = 34\%$ et $P(z ; y ; x) = 46\%$, ce qui est tout à fait contre-intuitif dans un paradigme de rationalité pure ou rationalité parfaite. On en conclut donc que l'introduction d'une nouvelle alternative (le lecteur AIWA) a tendance à augmenter la probabilité de différer l'achat. L'étude de ces exemples plutôt familiers alors qu'ils violent l'axiome d'indépendance, et donc le paradigme de la rationalité, interpelle notre intellect qui se défendra pourtant de renoncer à toute rationalité alors qu'il est aux prises avec un problème de type « choix d'un lecteur de CD » ou « choix d'une chemise pour fêter Noël » !

C'est au fond ce que Simon, de façon plus générale, tend à nous faire comprendre avec cet exemple célèbre : deux soldats sont dans une tranchée et font face à des tirs nourris de mitrailleuses ennemies. L'un reste à l'abri. L'autre tente de détruire les mitrailleuses en lançant une grenade. Lequel de ces comportements est rationnel ? (Simon [1945] 1997)

Nous venons de voir quelques biais remarquables dans la prise de décision qui apparaissent comme autant de distorsions de la rationalité.

Précédemment, nous montrions comment la recherche d'une solution *satisficing* respecte l'axiome fondamental de la rationalité bien que l'optimum ne soit pas recherché. L'espace des rationalités est donc complexe, la frontière entre différents types de rationalités et les possibles distorsions étant minces. Le concept même de rationalité a évolué dans la pensée de Simon et il paraît essentiel à présent de tenter de faire le point en recoupant ses différents travaux et les critiques qu'ils ont suscitées. Cette question qui aborde notamment le rapprochement abusif entre rationalité procédurale et rationalité limitée est traitée dans la section suivante.

9.5 Rationalités substantive, limitée et procédurale : de l'économie à la psychologie

La critique de Simon sur l'optimisation en économie, concept qui, selon nous, est également au cœur d'une ambiguïté autour de la notion de sûreté, a révélé l'existence de plusieurs rationalités à l'œuvre dans la prise de décisions. Comme énoncé dans l'introduction de ce travail, nous formulons l'hypothèse qu'une différence de rationalités pourrait expliquer certaines divergences de vue entre l'ONDRAF et l'AFCN. Nous pouvons cependant difficilement imaginer que ces deux institutions incarnent respectivement deux polarités aussi distinctes que d'une part, une rationalité procédurale en recherche de *satisficing* et d'autre part, une rationalité substantive en quête d'optimisation. Nous pensons plus volontiers que l'ONDRAF et l'AFCN se déplacent sur un spectre continu de rationalités tendu entre ces deux extrêmes et que leurs positions mutuelles s'inversent peut-être parfois. Nous pensons aussi qu'une différence d'éthique peut également être à l'œuvre et conditionner les différences observées, nous y reviendrons (voir section 10.6). Afin de tester notre hypothèse de dissension de rationalités, il convient de bien définir l'espace de celles-ci par une remise en perspective des travaux de Simon sur le sujet.

La réflexion de Simon sur la rationalité est le plus souvent présentée selon un modèle dual, opposant le modèle économique de la rationalité à la rationalité mise en œuvre dans les comportements réels. Il y a donc une

rationalité parfaite, objective qui suppose un accès à l'entièreté de l'information disponible et pertinente pour une situation donnée ainsi qu'une capacité illimitée du décideur à traiter cette information – postulant ainsi l'omniscience de celui-ci (Quinet, 1994) –, cette rationalité étant encore dite « globale » (Simon, 1979) ; et une rationalité limitée (Simon, 1972) ou bornée (Simon, 1997 ; Rubinstein, 2008) qui sera à l'œuvre dans une théorie behavioriste de l'économie s'opposant ainsi au courant néo-classique en faisant entrer les limites cognitives dans le choix réel du décideur (Simon, 1997). Ce contrepoint du modèle économique classique reposant sur l'omniscience est introduit par Simon en 1957 (Quinet, 1994), voire plus tôt, dès 1952 (Le Moigne, 1994), ce qui le conduisit à formuler sa critique de l'objectif de maximisation – que l'économie prêtait jusque-là aux agents – en mettant en évidence la complexité de l'environnement. Ce point aura une importance capitale dans le développement de multiples domaines puisqu'il s'agira « *d'abandonner le mythe de la décision en toute connaissance de cause (...) l'individu ne recherche pas la maximisation mais la satisfaction dans l'exercice de ses choix* » (Saussois, 2007). Certains commentateurs de Simon comme Jean-Louis Le Moigne considéreront la distinction entre la rationalité substantive ou substantielle et la rationalité procédurale (Simon, 1982) comme une véritable *révolution scientifique* au sens de Thomas Kuhn (Kuhn, [1962] 1983). Signalons que la distinction que Simon opérera explicitement entre procédural et substantif ne s'adresse pas qu'aux économistes, même si ceux-ci sont visés en premier lieu, mais que ce sont bien toutes les activités scientifiques qui sont potentiellement concernées par cet appel (Le Moigne, 1994).

Mais il existe une autre distinction, encore plus subtile, qui connut d'abord une lente maturation au cours des premiers travaux sur la rationalité limitée. En effet, si les ouvrages plus récents de Simon semblent parfois établir quelque synonymie entre les rationalités procédurale et limitée, « *La rationalité limitée est procédurale et non substantive* » (Simon, 1997), il existerait bel et bien une distinction entre rationalité limitée et rationalité procédurale, selon Le Moigne (Le Moigne, 1994), et c'est la perspective historique qui permet d'en prendre la mesure.

La rationalité limitée ou bornée résonne comme une rationalité approximative ou approchée. C'est bien le constat de Simon lorsqu'il étudie

la prise de décision du joueur d'échecs dont les capacités cognitives restent limitées, même chez les plus grands maîtres, et qu'il étend ses observations au champ de l'économie où s'ajoute l'imprévisibilité des comportements humains. Face à l'imperfection de ce monde qu'on aurait bien envie de qualifier de sublunaire en référence à Aristote et incarnée par l'économie de nos sociétés modernes, les mathématiques, qui siègent pourtant si bien à l'astrophysique et qui incarnent le modèle de perfection rationnelle, font figure d'emplâtre sur une jambe de bois. Mais cette rationalité limitée pourrait bien aider les sciences économiques à se réhabiliter au sein des sciences exactes. Au fond, ce ne serait pas l'économie en tant que science qui serait en cause mais bien l'imperfection du sujet humain qui tient en échec tout essai rigoureux de mathématisation. Dans la première partie de ses travaux, de 1953 à 1973 (année où la distinction procédurale et substantive fera son apparition), la différence de rationalité qu'étudie Simon oppose d'une part, la rationalité limitée en tant qu'équivalent comportemental d'une rationalité approximative et d'autre part, la rationalité présumée parfaite (Le Moigne, 1994) qui renvoie à la logique mathématique. Notons que Simon lui-même, dans *Administrative behaviour*, (Simon, [1945] 1997) recommande l'emploi d'adverbes à adjoindre à l'adjectif rationnel, de façon à distinguer par exemple : l'objectivement rationnel (i.e. une maximisation de valeurs données dans une situation donnée) du subjectivement rationnel (i.e. la réalisation relative en fonction de la connaissance effective d'un sujet donné), le consciemment rationnel (i.e. si l'ajustement des moyens aux fins est un processus conscient) du délibérément rationnel (i.e. si le résultat de l'ajustement des moyens aux fins résulte d'une délibération individuelle ou collective au sein d'une organisation), l'individuellement rationnel (i.e. si ce sont les buts de l'individu qui sont poursuivis) de la rationalité organisationnelle (i.e. si ce sont, au contraire, les objectifs de l'organisation qui priment), etc. Face à cette pléthore de possibilités, Le Moigne parle de « rationalité complexe » mais toujours irréductible à la rationalité parfaite issue de la logique mathématique telle que consacrée par Whitehead et Russell dans leurs *Principia Mathematica*. A partir de 1973, à la faveur d'une communication lors d'un colloque pour le 25^e anniversaire de la Faculté d'économie de Groningen, Simon introduit la rationalité procédurale et la rationalité substantive mais sans abandonner les distinctions anciennes (Simon, [1973] 1992). Selon Le Moigne, l'erreur serait donc souvent commise d'identifier la

rationalité procédurale à la rationalité limitée et la rationalité substantive à la rationalité supposée parfaite (Le Moigne, 1994). Dans cette publication, Simon utilise les expressions de « rationalité substantive », afin de faire référence au concept développé en économie, et de « rationalité procédurale », pour se référer au concept tel qu'il s'est développé en psychologie.

Le premier concept désigne un comportement capable d'atteindre les buts donnés à l'intérieur de limites imposées par des conditions et contraintes données. La rationalité substantive du comportement ne dépend donc de l'acteur que par rapport aux buts qu'il poursuit, le reste étant déterminé par l'environnement. Avec l'hypothèse d'utilité ou de maximisation du profit ainsi que l'hypothèse de rationalité substantive, dit Simon, l'économie évolue indépendamment de la psychologie et donc des processus guidant le choix humain (Simon, [1973] 1992).

Le deuxième concept – le comportement rationnel procédural – est le résultat d'une réflexion appropriée et la rationalité procédurale dépend donc du processus qui l'a générée. Cette rationalité procédurale n'est cependant ni approchée ni approximative. La limitation vient éventuellement (et dans la réalité, certainement) des capacités cognitives limitées du sujet mais ces limitations ne limitent pas nécessairement la qualité du raisonnement. Il n'y a pas de rationalité de référence à laquelle un raisonnement de type procédural pourrait être comparé. En revanche, deux raisonnements procéduraux peuvent être comparés entre eux. Comment cette comparaison peut-elle avoir lieu si tous deux aboutissent au même résultat ? La comparaison portera sur la consommation de ressources pour parvenir à ce résultat (Le Moigne, 1994). En programmation informatique, on parlera de complexité algorithmique (Baudinet, 1993) ou d'efficacité computationnelle (Simon, [1973] 1992), qui recouvre le temps ou l'effort computationnel. La recherche d'efficacité computationnelle est une recherche de rationalité procédurale dont les mathématiques afférentes – les mathématiques computationnelles – sont une théorie normative de ce type de rationalité. Dans ce type de cadre normatif, la prescription d'une solution substantivement rationnelle qui ne serait pas accompagnée d'une procédure permettant de limiter l'effort computationnel serait donc sans aucun intérêt.

L'exemple classique du problème du voyageur de commerce²⁸¹ illustre parfaitement cette difficulté puisqu'il connaît une explosion combinatoire de possibilités. En effet, sa résolution par recherche exhaustive de tous les chemins possibles pour 25 villes serait plus longue que l'âge de l'univers²⁸². Cette recherche exhaustive des chemins procède de la recherche de l'optimum par rationalité substantive et si elle donne un résultat exact, elle n'est d'aucun intérêt pratique. La théorie de la rationalité pour de tels problèmes est donc nécessairement une théorie de la rationalité procédurale par opposition à la théorie des meilleures solutions. Le raisonnement qui génère la solution est donc au cœur de l'attention (rationalité procédurale) et un glissement s'opère, en outre, de l'optimum vers l'intérêt pour de bonnes solutions, c'est-à-dire la recherche du *satisficing* (Simon, [1973] 1992). Dans l'impossibilité de résoudre de tels problèmes de façon optimale, notons qu'il n'y a pas non plus de « bon » résultat qui permette « *d'évaluer de manière universelle la qualité extrinsèque du raisonnement* » (Le Moigne, 1994). La rationalité procédurale n'est donc pas une sous-rationalité. Comme le précise Simon, la recherche opérationnelle développée après-guerre a eu à cœur de trouver des procédures efficaces pour calculer de vraies solutions par rapport à des problèmes concrets de prise de décision. Ainsi une solution résultant d'un modèle de calcul peut être optimale dans le monde du modèle sans pour autant qu'on se berce de l'illusion qu'il est l'est aussi dans le monde réel. Une solution optimale dans l'espace du modèle doit « simplement » mener à une bonne décision dans le monde réel (Simon [1973] 1992). La solution n'est donc pas substantivement optimale mais elle résulte d'une optimisation formelle dans le modèle de programmation qui est lui-même une technique procédurale efficace pour prendre des décisions acceptables

²⁸¹ Etant donné n points (des « villes ») et les distances séparant chaque point, trouver un chemin de longueur totale minimale qui passe exactement une fois par chaque point et revienne au point de départ. Il s'agit d'un problème NP-difficile. On qualifie de NP-difficiles les problèmes d'optimisation (dont la réponse est de type numérique). A un problème d'optimisation NP-difficile, on peut associer un problème de décision NP-complet dont le but est de déterminer s'il existe une solution pour laquelle la fonction objectif soit supérieure (ou inférieure ou encore égale) à une valeur donnée. Les problèmes NP-complets sont des problèmes NP-difficiles plus difficiles que les autres, il s'agit de problème décisionnel dont la réponse est binaire (vrai/faux ; oui/non ; 0/1). Sans entrer dans plus de détails car cela ne servirait pas notre propos, aucun problème NP-complet n'a pu être résolu, à ce jour, par un algorithme polynomial (Boussaïd, 2013).

²⁸² Sur la base d'un calcul de chemin de l'ordre de la microseconde.

ou satisfaisantes. Ainsi un possible plaidoyer pour la rationalité procédurale consacrerait une « *rationalité qui privilégie le raisonnement plutôt que le calcul déductif, la délibération et l'argumentation plutôt que la preuve ou la vérification, l'intelligence plutôt que la ratiocination*²⁸³ » (Le Moigne, 1994)

Simon note ainsi deux types de déviations par rapport à la recherche d'optimum classique (au sens substantif) : soit une simplification du modèle pour lui permettre l'atteinte d'un optimum « réalisable », compte tenu de limites computationnelles, soit la recherche directe d'une solution « satisfaisante » (*satisficing*) plutôt qu'optimale. Quelle que soit la nature de cette déviation, Simon considère ces deux comportements « satisfaisants » plutôt que d'optimalisation.

Notons que cette différence de rationalités que Simon identifie *ab initio* comme relevant soit de l'économie (néo-classique) pour la rationalité substantive, soit de la psychologie pour la rationalité procédurale soulève encore une autre question. Est-ce que ces différences sont propres aux disciplines qui y recourent. En d'autres termes, comme le questionne Le Moigne, a-t-on une rationalité différente lorsque l'on est économiste ou ingénieur, psychologue ou physicien ?

La question est d'envergure et s'y pencher dans le cadre de la présente recherche ne relève pas de la digression. En effet, s'il est permis de penser que la rationalité limitée peut s'expliquer par les fins et moyens spécifiques de chaque acteur en jeu, tant l'ONDRAF que l'AFCN y recourent. Mais s'il existe néanmoins une bipolarisation de la rationalité entre ces deux acteurs, cela interroge, au sein de la rationalité limitée, l'existence d'un paradigme de pensée lié aux disciplines scientifiques mêmes. Malgré l'intérêt général de cette question, nous ne l'aborderons pas, sachant que de part et d'autre de la table des interactions entre l'AFCN et l'ONDRAF, ce sont des ingénieurs qui siègent principalement et que nous ne pensons donc pas que le biais puisse

²⁸³ Argumentation exagérément subtile. Argutie(s) (d'après le *Petit Robert*, 1986 et Le Robert et Google <https://www.lerobert.com/google-dictionnaire-fr?param=ratiocination> [Consulté le 24 août 2021]).

venir de différences de formations universitaires²⁸⁴. En revanche, si des divergences d'opinions subsistent, la similitude des formations des différents acteurs pourrait bien être un frein à la résolution des dissensions. En effet, il est possible que la recherche de la solution demande une autre rationalité, fidèle en cela à cette citation d'Einstein : « *Un problème créé ne peut être résolu en réfléchissant de la même manière qu'il a été créé* »²⁸⁵ (Le Parisien, 2022).

9.6 Rationalité, raisonnement et comportement

Pour Simon, nous dit Le Moigne :

« Un comportement est substantivement rationnel lorsqu'il est approprié à l'accomplissement de buts donnés dans les limites imposées par des conditions et des contraintes données. Un comportement est procéduralement rationnel lorsqu'il est le résultat d'une délibération appropriée. Cette rationalité procédurale dépend du raisonnement qui l'engendre. » (Le Moigne, 1994)

Dans le premier cas, comme déjà mentionné, une fois les buts choisis par l'acteur, le comportement rationnel ne dépend que de l'environnement. Cette rationalité est celle des « sciences dures » qui se donnent pour but la « norme du vrai » (Le Moigne, 1994, p. 134), quelle que soit d'ailleurs la dose d'arbitraire qui y soit liée. Les raisonnements de type substantif font appel à la déduction ou aux règles syllogistiques.

²⁸⁴ Nous sommes conscients qu'il s'agit d'une simplification forte. A l'ONDRAF, des diplômés de la Faculté des sciences accomplissent des tâches similaires à celles des ingénieurs civils et inversement. Il en est de même du côté de l'AFCN. A titre d'exemple, au sein de l'ONDRAF, la coordination scientifique est assurée par un ingénieur civil mais le management de la recherche est assuré par un géologue. Néanmoins, les réunions d'interaction dites de l'addendum 11 (en référence à l'addendum à la convention organisant les interactions entre ces deux institutions) réunissent et ce, de façon quasi systématique, 80% d'ingénieurs civils (et parmi eux entre 80 et 100% d'ingénieurs civils des mines).

²⁸⁵ https://citation-celebre.leparisien.fr/auteur/albert-einstein?theme=probleme_ [Consulté le 26 avril 2022].

Dans le deuxième cas, c'est le processus particulier de la pensée qui raisonne qui est mis en évidence, peu importe le caractère auto-référentiel de la définition. Cette rationalité se prête à l'observation d'un raisonnement en termes de processus : lors de la résolution de problèmes (*problem solving*), en utilisant des raisonnements par tâtonnements essais-erreurs ; lors de situations d'apprentissage ou encore, en situation de formulation de concepts (Simon, 1977 ; Le Moigne, 1994).

Quand un sujet soumis à une difficulté ou un problème à résoudre ne peut raisonner de façon substantive, il serait abusif de dire qu'il se met pour autant à déraisonner. Il utilise simplement d'autres règles que celles de la déduction logique. Le sujet va transformer le problème en vue de se l'approprier afin de le résoudre. Pour Simon, résoudre un problème revient à trouver une séquence d'opérations qui transforme la situation de départ en une situation de but. Si la résolution de problème se modélise par un arbre où les nœuds sont des états d'affaires ou de situations et les branches sont des opérations qui transforment une situation en une autre, résoudre revient à trouver le chemin partant du nœud initial au nœud but (Simon, 1977). La résolution peut évidemment se faire par déduction, c'est-à-dire substantivement mais passe en général par une simplification. Cette simplification vise à réduire le problème à une forme déductible. La résolution peut emprunter également le chemin d'une complexification du problème afin de lui reconnaître son caractère multi-dimensionnel. La première forme de résolution fait la part belle au principe de *raison suffisante* leibnizien²⁸⁶ qui est présenté comme la modélisation analytique et relève du paradigme de la résolution par réduction. La deuxième forme de résolution, celle du raisonnement par complexification, relève de la modélisation systémique et fait nécessairement appel aux modes procéduraux de la rationalité (Le Moigne, 1994). Cette construction autour de la situation mobilise, quant à elle, le principe de *raison intelligente* (Le Moigne, 1994, p. 136) ou encore le principe d'*action intelligente* (Le Moigne, 2009, p. 32) qui vise, par définition, à élaborer une « *action ou un comportement intelligent* », une posture intellectuelle qui refuse la

²⁸⁶ Rien n'arrive sans cause ou une raison déterminante. Le principe de raison suffisante et le principe de contradiction sont les deux grands principes de notre raisonnement selon Leibniz (Lalande, 1951).

réduction à une forme déductible qui serait, le plus souvent, par trop simplificatrice. Le *principe de raison intelligente* vise à reconnaître le caractère multidimensionnel d'une situation à problème et à entreprendre sa résolution « raisonnée », allant même jusqu'à transformer le problème si nécessaire (Le Moigne, 1994). Ces modes de raisonnement différents²⁸⁷ de la « *démonstration par déduction* » relèvent de l'*ingenium*²⁸⁸ de Cicéron qui relie la compréhension à l'action (Vico G. B., 1708 [1981] dans Le Moigne, 1994, p. 136 ; Le Moigne, 2009, p. 30).

Avec Simon, le mathématicien G. Polya restaure, dès 1945, la « mathématique du raisonnement plausible » qui prépare le terrain à l'avènement (ou est-ce la restauration ?) de la rationalité procédurale. Les méthodes heuristiques ont joué un rôle considérable dans le développement de l'intelligence artificielle (Simon [1969]2004) et la rationalité procédurale a gagné toute légitimité dans le « *bon usage de la raison humaine* », plus souvent délibérative²⁸⁹ que strictement déductive²⁹⁰ (Simon [1969] 2004, p. 382) (Le Moigne, 1994).

Dans *les sciences de l'artificiel*, Simon souligne les démarches de rationalité procédurale mises en œuvre dans les entreprises, par différentes branches des sciences appliquées. Il compare ainsi la démarche de l'intelligence artificielle à celle de la recherche opérationnelle. La recherche opérationnelle établit des algorithmes traitant des problèmes de décision multidimensionnels tenant parfois compte de l'incertain (e.g. programmation linéaire, files d'attente, etc.). Ces algorithmes exigent un

²⁸⁷ Le Moigne évoque notamment l'induction, l'abduction (« syllogisme dont la majeure est certaine mais la mineure seulement probable, la conclusion n'ayant qu'une probabilité égale à la mineure » d'après Aristote ; « tout raisonnement dont la conclusion est seulement vraisemblable » d'après Peirce, cité dans Lalande, 1951), la transduction (raisonnement généralement utilisé par les enfants afin de tirer une conclusion : par analogie, différence ou par identité (Lalande, 1951)), etc.

²⁸⁸ Lorsqu'il se rapporte à l'homme, *ingenium* (ou *euphuia* en grec) désigne « l'élément inné en lui de productivité, de créativité, de capacité de dépasser et de transformer le donné, qu'il s'agisse de la spéculation intellectuelle, de la création poétique et artistique, du discours persuasif, des innovations techniques, des pratiques sociales et politiques » (Cassin, 2019). Cicéron en disait notamment ceci : « il faut un *ingenium* puissant pour détacher son esprit des sens, et détacher sa pensée de l'habitude » (Tusculanes, I, 16, 38 dans Cassin, 2019).

²⁸⁹ Et donc procédurale (pour Simon).

²⁹⁰ Et donc substantive (pour Simon).

structuration mathématique forte du problème à traiter et donc une simplification de la situation. L'ordinateur est programmé pour calculer une solution optimale et le prix à payer pour cette optimisation sont des hypothèses extrêmement lourdes. La plus évidente de ces hypothèses est l'hypothèse de globalité qui suppose que la recherche d'une décision optimale parmi toutes les actions potentielles permettra de désigner une action unique comme la meilleure. Ceci implique qu'il faut présumer que toutes les actions potentielles comprennent tous les aspects de la question et qu'elles sont mutuellement exclusives alors qu'elles pourraient être complémentaires ou partielles (Ben Mena, 2000). La décision optimale ainsi obtenue est celle du monde simplifié du modèle et est évidemment distincte de la solution optimale du problème réel (probablement à jamais inconnue), mais elle est acceptable. L'intelligence artificielle fournit, quant à elle, des méthodes alternatives sous la forme d'heuristiques de recherche, c'est-à-dire des recherches sélectives par tâtonnements, qui permettent de trouver des solutions assez bonnes ou satisfaisantes (*satisficing*). Les modèles de l'intelligence artificielle travaillent également avec des représentations approximatives de situations réelles mais, en général, avec plus de détail et de précision que la recherche opérationnelle (Simon [1969] 2004). L'arbitrage entre l'intelligence artificielle et la recherche opérationnelle revient donc à choisir entre une solution satisfaisante d'un modèle quasi réaliste (fourni par l'intelligence artificielle) et la solution optimale d'un problème très simplifié (fourni par la recherche opérationnelle). Sans doute est-il intéressant de constater ici que tant recherche opérationnelle qu'intelligence artificielle ont mis en valeur la rationalité procédurale (Simon [1969] 2004) et d'obtenir ainsi la preuve que, chez Simon, il serait donc abusif, comme mentionné précédemment par Le Moigne, de réduire la rationalité procédurale au seul *satisficing*, c'est-à-dire à la rationalité limitée (Le Moigne, 1994).

9.7 Optimisation et sûreté : concepts polémiques pour une rationalité partagée

Dans la définition même du *safety case*, il est implicitement reconnu que d'autres voies de raisonnement que la démonstration par déduction doivent être utilisées afin de « démontrer » la sûreté (NEA, 1999 ; NEA, 1991)²⁹¹. La critique d'utopie souvent faite à l'égard de la « démonstration de sûreté » ne vaut que si l'on s'en tient à la seule démonstration par déduction, c'est-à-dire à la rationalité substantive. Si la définition du *safety case* permet la « collection d'arguments et de preuves » (IAEA, 2012), elle accueille l'argumentation, l'analogie, l'inférence et tout autre schème de raisonnement qui sera capable d'inspirer ultimement la confiance des tiers.

Une des exigences de l'optimisation que ne partage pas le *satisficing* est que toutes les alternatives envisagées doivent être mesurables dans les termes d'une commune fonction d'utilité (Simon, [1969] 2004). Or, nous pensons que, contrairement à la protection radiologique dont l'indicateur unique est la dose²⁹², la sûreté n'est pas réductible à une fonction d'utilité. C'est la raison pour laquelle il est dangereux, selon nous, de passer impunément²⁹³ de la protection radiologique à la sûreté des stockages en élargissant la portée du principe d'optimisation initialement élaboré dans le champ de la protection radiologique.

La recherche d'une solution optimale, à la manière de la recherche opérationnelle, reviendrait à simplifier le système du stockage. Si l'approche est défendable pour certains aspects du développement – en tant qu'éléments de démonstration de la sûreté –, l'optimisation globale du système, de par la complexité de celui-ci, est aussi illusoire que d'obtenir une

²⁹¹ « The term 'demonstration of safety', (...), is not intended to imply a rigorous proof of safety, in a mathematical sense, but rather a convincing set of arguments that support a case for safety » (NEA, 1999). Remarquons que même s'il n'est nullement fait mention de rationalité dans le présent avertissement de l'AEN, il semble évident que la preuve de sûreté dont parle l'AEN doit être entendue au sens du raisonnement déductif, résultat d'une rationalité substantive.

²⁹² Il peut s'agir également du risque radiologique dans le cas d'expositions potentielles (ICRP, 2013).

²⁹³ Sans devoir fournir de justification rigoureuse au préalable.

solution substantive au problème du voyageur de commerce. Il y aurait une explosion combinatoire entre l'optimum à rechercher pour chaque élément de conception, le choix de la roche, les caractéristiques du déchet, etc. Quand bien même un optimum pourrait être trouvé dans l'espace d'un modèle, il serait abusif, comme nous l'avons vu à la section précédente, de le considérer comme optimum dans le monde réel. Comme le dit encore Le Moigne :

« Elles [les situations comportementales] sont presque toujours multicritères, lesquels ne sont pas tous aisément quantifiables fut-ce par classement ordinal, et ces critères d'optimisation sont eux-mêmes évoluant. Ce qui interdit toute démonstration générale d'optimisation par recherche mono gradient. » (Le Moigne, 2009, p. 32)

Mais il est cependant vrai que les calculs d'optimisation peuvent être des *« heuristiques exploratoires locales qui peuvent suggérer de nouvelles alternatives »* (Le Moigne, 2009, p. 32). Nous pensons que c'est pourtant bien à cette croyance en l'obtention d'un optimum dans le monde réel que la généralisation de l'optimisation de la protection à la sûreté encourage, en partant du principe ALARA de la CIPR et en l'érigeant comme principe directeur de la sûreté.

Nous ne prétendons évidemment pas devoir insuffler un changement aussi révolutionnaire à la sûreté que celui infligé par Simon à l'économie néo-classique, nous soulignons seulement une possible analogie, toutes proportions gardées, dans le fait que la gestion à long terme des déchets nucléaires oblige à penser la sûreté bien au-delà de la seule protection radiologique. Les outils d'optimisation ont été validés en radioprotection, il pourrait être indu de les transposer à la question plus générale de la sûreté, surtout dans le cas de la gestion à long terme des déchets radioactifs par stockage géologique, stockage qui combine barrières naturelles et barrières ouvragées.

Nous pensons que les textes internationaux de la CIPR ou de l'AIEA en tête mais aussi les autres documents de la doctrine internationale ont sous-estimé, voire ignoré, que cet élargissement du domaine de validité du principe d'optimisation conduirait à d'insurmontables difficultés dans sa mise en œuvre pour la sûreté. Il est symptomatique pourtant de constater

qu'à l'heure d'écrire ces lignes, l'AEN propose la tenue d'un workshop ayant pour thème « *Optimisation : Rethinking the Art of reasonable* », dénotant l'existence d'un malaise²⁹⁴.

Une certaine habitude de pensée autour du concept de sûreté, qui n'est plus suffisamment interrogé pour ce qu'il est censé signifier, constitue très certainement un *obstacle épistémologique*. Face au malaise qui en résulte, malaise logé dans l'interprétation tacite de la sûreté et trop volontiers expliqué par la complexité inhérente à la grande technicité du stockage géologique, les subjectivités s'affrontent d'autant plus facilement qu'aucune règle ne semble venir réguler le débat.

Cet espace intersubjectif et dialectique qui articule connaissances et ignorances est le siège d'un glissement, voire d'une confrontation de rationalités que nous nous proposons de mettre au jour, par une étude de cas.

9.8 Introduction à l'étude de cas : l'ONDRAF et l'AFCN en tant qu'acteurs en mouvement dans un espace multidimensionnel de rationalités

L'étude de cas présentée dans le prochain chapitre sert à la fois de prospective et de test d'hypothèse. Elle est prospective car c'est par son truchement qu'un glissement de rationalités a été supposé à l'entame de ce travail de thèse. Elle est aussi un test d'hypothèse dans la mesure où, une fois les bases théoriques du raisonnement rationnel connues, revisiter la question de l'optimisation appliquée au choix de la roche hôte pour un stockage géologique permet de confirmer ce qui n'était au départ qu'une supposition, tout en permettant d'affiner les positions des acteurs.

L'étude de cas a un caractère nécessairement pratique et il convient dès lors de souligner la dimension décisionnelle et organisationnelle de la question

²⁹⁴ Le *workshop* s'est tenu à Lisbonne, en janvier 2020.

posée par l'optimisation. Si un cadre théorique accompagne évidemment celle-ci, l'enjeu n'est pas tant dans une discussion mathématique du concept que dans ses implications en matière de « gestion de projets ». La réflexion sur l'optimisation et son interprétation n'est donc pas que théorique ou spéculative, sans visée pratique, elle doit se concevoir comme partie d'un objet sociotechnique qu'est le stockage de déchets radioactifs. Les acteurs « pensants » sont des organisations institutionnelles qui gèrent le développement d'un projet industriel de grande envergure. Ils ne dissertent pas, ils adoptent un comportement agissant et prennent des décisions. C'est la raison pour laquelle l'approche de Simon a retenu notre attention en ce que celle-ci part du comportement décisionnel des acteurs d'un marché, comportement décisionnel que nous tenons pour analogue à celui adopté par l'ONDRAF et l'AFCN dans la réalisation de la solution technique au problème de gestion à long terme des déchets radioactifs. Cette analogie rend pertinente la *psychologie des décisions administratives* et la *planification substantive et procédurale* que Simon développe dans son ouvrage *Administrative behavior* (Simon, [1945] 1997).

Sur le plan décisionnel d'une organisation, la rationalité à l'œuvre conditionne comportement et planification (Simon, [1945] 1997). On distingue donc, tout comme dans le cas de la rationalité, une planification substantielle et une planification procédurale.

La *planification substantielle* d'une organisation correspond aux prises de décisions par rapport aux valeurs poursuivies par les activités de cette organisation, aux méthodes généralement utilisées pour atteindre ces valeurs et à l'information nécessaire pour prendre ces décisions dans les limites des politiques fixées. La *planification procédurale* construit l'environnement psychologique de la décision c'est-à-dire qu'elle correspond aux mécanismes déployés afin de diriger l'attention, canaliser l'information et la connaissance de façon à soutenir la prise de décisions quotidienne, en accord avec le plan défini substantivement. Ce plan est ensuite exécuté au travers des décisions quotidiennes et des activités qui rentrent dans le cadre ainsi défini par les planifications substantive et procédurale.

Lors de la construction d'un ouvrage d'art comme la construction d'une route reliant deux villes ou d'un barrage, l'ingénieur identifie préalablement une série d'options possibles en appliquant des critères assez généraux afin de

guider son choix. Dans le cas de la construction d'une route entre deux villes, il établit quelques itinéraires plausibles et décide, pour chacun d'eux, le plan d'action le plus approprié. Finalement, il ne développera de plans assez détaillés que pour deux ou trois itinéraires au maximum afin de permettre au décideur de choisir ce qui lui semble le plus opportun. Ainsi, l'ingénieur aura appliqué des critères généraux de type relief, urbanisation existante, terres agricoles à préserver, etc. et le décideur (politique) utilisera d'autres critères de discrimination comme la possibilité d'expropriation, le gain économique apporté par la nouvelle voie de transport, etc. Ce processus de fonctionnement contraste immanquablement avec celui menant au choix unique après l'examen de toutes les routes possibles. L'examen de toutes les voies possibles est dicté par la logique et constitue la seule procédure qui puisse vraiment garantir le choix final de la meilleure solution mais son impossibilité pratique est, comme le dit Simon, « évidente » (Simon [1945] 1997). La procédure dite de « planification » est donc un compromis où seules les options les plus plausibles sont examinées en détail²⁹⁵.

L'analogie avec l'ONDRAF et l'AFCN est, en première approche, criante. Dans l'étude de cas qui retient notre attention, l'AFCN demande à l'ONDRAF – qui avait déjà étudié en détail depuis une trentaine d'années l'option du stockage géologique dans l'argile de Boom – de reconsidérer toutes les options possibles, à commencer par le choix de la roche hôte pour ce stockage. Alors que la solution proposée initialement par l'ONDRAF était jugée satisfaisante et même prometteuse et que rien donc ne semblait invalider la qualité des investigations menées jusqu'alors, l'AFCN demande un réexamen en vue d'une recherche de la meilleure solution... L'impossibilité pratique évoquée par Simon ne semble donc pas si « évidente ». Mais sommes-nous réellement dans un cas de figure en tous points analogues à celui de la construction d'une route ou d'un barrage ? Tout d'abord, le stockage géologique n'est pas un ouvrage d'art « routinier » pour lequel l'état de l'art pourrait compter sur de nombreux exemples. Bien que chaque barrage soit une construction unique, il existe bel et bien des certificats de spécialisation universitaires qui en enseignent la construction. Il n'en existe pas d'équivalent pour des stockages géologiques de déchets

²⁹⁵ L'évaluation des modes de « raisonnements plausibles » est ce que Simon appelle le raisonnement procédural ou délibératif (Le Moigne, 2009, p. 39).

radioactifs pour la bonne et simple raison qu'il n'existe que très peu d'installations actuellement en fonctionnement et qu'aucune d'elles ne constitue un stockage géologique de déchets hautement radioactifs²⁹⁶. Les incertitudes sont donc grandes et elles le sont, qui plus est, pour des échelles de temps inédites.

Vu ce contexte, on pourrait formuler l'hypothèse que le processus de planification décrit supra, s'il est pourtant entendu théoriquement par les deux acteurs ONDRAF et AFCN, se serait déployé chez les deux acteurs selon des modalités différentes. Une planification procédurale est de mise pour l'ONDRAF, futur artisan de l'ouvrage, alors que l'AFCN, de par son rôle de régulateur, procède à l'examen du dossier au niveau de la planification substantive, mettant ainsi en avant les valeurs normatives telles que la sûreté et la protection radiologique. L'AFCN requiert des éléments rigoureux de justification pour délimiter les alternatives jugées plausibles (et qui sont imputables à la planification procédurale) mais sur les seules bases de la connaissance scientifique et des valeurs éthiques de protection (qui sont des valeurs relevant de la planification substantive). Les contraintes financières et de gestion quotidienne propres à la planification procédurale des activités sont par définition étrangères à l'AFCN. Cette piste, bien que probante, nous paraît évidemment à ce stade quelque peu grossière. Il paraît intuitivement évident que l'AFCN ne peut pas être perçue comme un acteur désincarné du processus alors que l'ONDRAF est aux commandes.

L'objectif du cas d'étude est donc précisément d'affiner cette analyse tout en confirmant les hypothèses théoriques avancées initialement jusqu'ici, à savoir une différence de rationalité déployée à la faveur d'une application du principe d'optimisation, elle-même rendue ambiguë par la doctrine internationale. Enfin, cette étude de cas nous sert également de tremplin à une investigation non exclusivement épistémologique. Dans quelle mesure

²⁹⁶ Il existe bien le stockage géologique du WIPP aux Etats-Unis abritant des déchets transuraniens militaires, le stockage de Bataapáti en Hongrie pour les déchets faiblement et moyennement radioactifs et un stockage de combustibles usés est actuellement en construction en Finlande (source : ENSREG : <https://www.ensreg.eu> [Consulté le 24 août 2021]).

les aspects épistémiques d'une différence de rationalités sont-ils liés à une différence de visées éthiques ? Ce point sera abordé ultérieurement.

9.9 Conclusions du chapitre 9

Nous avons précédemment montré que les positions de l'AFCN et de l'ONDRAF étaient conditionnées par une doctrine internationale dont nous avons critiqué l'ambiguïté à certains égards. La sûreté, qui échappe à toute tentative de définition rigoureuse et dont la démonstration s'établit dans la confiance, constitue un terrain propice aux interprétations multiples. Le rôle du principe d'optimisation pour la protection radiologique et la sûreté a, lui aussi, un statut discutable et nous avons retracé les méandres de son histoire. Nous avons conclu au chapitre 8 que les différents glissements conceptuels observés au cours de l'évolution du principe d'optimisation avaient créé une aporie et qu'il en résultait une ambivalence d'interprétations. D'une part, l'optimisation en grand, méta-processus de développement des systèmes impliquant une approche compartimentée et séquentielle et d'autre part, l'optimisation en petit, optimisation radiologique selon le principe ALARA. Consacré avant tout comme un état ou une disposition d'esprit par la CIPR, le principe d'optimisation donne donc lieu à différentes manières de raisonner, c'est-à-dire à différentes rationalités.

Afin d'approfondir ce premier constat et lui fournir un cadre d'analyse théorique, nous avons eu recours aux travaux de Herbert Simon sur les insuffisances théoriques et pratiques du principe d'optimisation. Simon montre que l'optimisation est consubstantielle d'une rationalité substantive supposée parfaite alors que la recherche de solutions satisfaisantes (*satisficing*) témoigne de la mise en œuvre d'une rationalité procédurale ou limitée. La rationalité procédurale dépend du processus qui l'a générée, elle résulte d'une délibération appropriée et n'est pas nécessairement approchée ou approximative. En pratique cependant, il existe des limitations à la quantité d'informations disponibles ainsi qu'à la capacité cognitive du sujet à traiter celles-ci.

La norme du vrai telle qu'entendue en sciences de la nature²⁹⁷ étant le but de la rationalité substantive, le comportement qui en résulte dépend donc entièrement de l'environnement du problème, c'est-à-dire des limites et contraintes qui sont imposées. Le comportement est approprié au but poursuivi en faisant fi de la psychologie du sujet. La rationalité procédurale, quant à elle, est attachée au raisonnement en termes de processus et fait référence notamment aux raisonnements par essais et erreurs ainsi qu'aux situations d'apprentissage.

Le *satisficing* se distingue de l'optimisation en ceci qu'il n'exige pas que toutes les alternatives envisagées dans le cadre du problème du choix puissent se décliner et se mesurer en une commune fonction d'utilité. Nous avons précédemment émis de nombreuses réserves à l'encontre d'une tentative de simplification de la sûreté en une fonction d'utilité. En ce sens, approcher la sûreté par l'optimisation semble être contre-nature même si certains calculs d'optimisation peuvent servir d'heuristiques exploratoires locales. Ajoutons que la recherche d'optimum dans un système multicritères se heurte à la quantification des alternatives de même qu'aux critères d'optimisation évoluant et que l'optimum obtenu dans l'espace d'un modèle aux hypothèses mathématiques fortes ne constitue pas toujours un optimum dans le monde réel qu'il représente.

La requête de l'AFCN d'appliquer le principe d'optimisation au développement de l'ensemble du système de stockage en commençant par la roche hôte nous paraît donc l'héritière d'une rationalité substantive dont la mise en pratique pose question. L'ONDRAF, qui reste partisan de l'optimisation mais dans le champ restreint de la protection radiologique seulement, semble aborder la question de la roche hôte par la recherche d'une solution satisfaisante, non nécessairement optimale. Nous lui associerons donc, à ce stade, une rationalité procédurale.

²⁹⁷ C'est en soi tout un débat que nous ne souhaitons pas ouvrir ici. Les sciences de la nature sont entendues comme : physique, chimie, sciences de la vie (Soler, 2019, p. 27). Aux sciences de la vie (biologie), nous associerions volontiers celles de la Terre (géologie). Nous ne souhaitons pas exclure non plus, de notre propos, les sciences formelles, hypothético-déductives (mathématiques, physique théorique). Nous distinguons simplement cet ensemble, des sciences de l'homme et de la société (psychologie, sociologie, ...) selon la distinction que suggère Léna Soler (Soler, 2019).

Deuxième partie : étude de cas

Chapitre 10 Le principe d'optimisation appliqué au choix de la roche hôte

10.1 Contexte

La question de l'optimisation du choix de la roche hôte trouve son origine dans une requête de l'AFCN qui a été exprimée à maintes reprises et sous différentes formes, depuis la publication par l'ONDRAF, de son « Plan Déchets » (ONDRAF, 2011a ; ONDRAF, 2011b). L'AFCN enjoint à l'ONDRAF de ne pas se contenter d'étudier l'argile de Boom dans la région de Mol comme unique roche hôte afin d'accueillir à terme le stockage géologique (AFCN, 2011a ; AFCN, 2014a ; AFCN, 2015a). L'avis de l'AFCN a été étudié *in extenso* par l'ONDRAF afin d'en circonscrire toutes les exigences pratiques (Depaus, 2016a ; Depaus, 2016b ; Depaus, 2016c ; Depaus, 2017a ; Depaus, 2017b ; ONDRAF, 2017b ; ONDRAF, 2019c). L'ONDRAF doit donc renoncer à considérer le choix de la roche hôte comme acquis et le dossier de sûreté qu'il souhaite produire ne pourra plus envisager l'argile de Boom et, par extension, les argiles peu indurées qu'à titre d'hypothèse (voir section 3.3.4). En outre, en l'absence de décision politique sur le principe même du stockage géologique, l'ONDRAF qui envisageait de soumettre son premier dossier de sûreté en 2013 (ONDRAF, 2009a) doit se raviser et publier, en lieu et place, un état de l'art de sa recherche qu'il nomme « Plan R&D » (ONDRAF, 2013).

Contrainte par la loi du 3 juin 2014 « *modifiant l'article 179 de la loi du 8 août 1980 relative aux propositions budgétaires 1979–1980 en vue de la transposition dans le droit interne de la Directive 2011/70/Euratom du*

Conseil du 19 juillet 2011 établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs » (ci-après « loi du 3 juin 2014 »), la Belgique publie son premier *programme national* via un Comité spécialisé dont le secrétariat est assuré par l'ONDRAF (CPNPC, 2015). Sur l'ensemble de ces documents parus depuis le Plan Déchets et y compris celui-ci, l'AFCN émettra des avis à l'intention de l'ONDRAF ou prendra spontanément des positions officielles (via une note de positionnement) qui seront communiquées ensuite à l'ONDRAF (AFCN, 2011a ; AFCN, 2013a ; AFCN, 2014a ; AFCN, 2015a ; AFCN, 2015b ; AFCN, 2016*). Nous baserons l'étude de cas essentiellement sur ces avis ainsi que sur le travail de dialogue mené en parallèle dans le cadre de « l'addendum 11 » qui désigne l'annexe au protocole réglant la concertation entre les deux organismes (AFCN/ONDRAF, 2003)²⁹⁸, consacrée aux discussions sur la gestion à long terme des déchets B&C. Le travail mené dans ce groupe que nous coordonnons au niveau de l'ONDRAF vise notamment à harmoniser autant que possible les vues sur l'interprétation des principes de sûreté et à rendre compte de l'état d'avancement des travaux de recherche respectifs des deux institutions (AFCN/ONDRAF, 2020).

²⁹⁸ « art. 2 – objet du protocole

Le présent protocole règle les relations que les deux organismes entretiendront ensemble dans le cadre de l'exercice de leurs compétences respectives en matière de gestion des déchets radioactifs, des substances fissiles excédentaires, des installations nucléaires à démanteler et en démantèlement et des passifs nucléaires potentiels, en exécution de l'article 23, 2ième alinéa, de la loi sur l'AFCN et de l'article 33 du RGPRI (M.B., 2001). Ces relations peuvent prendre la forme d'un échange mutuel d'informations, d'une consultation réciproque ou d'activités communes.

art. 3 – élaboration des nouvelles réglementations

Sans préjudice des prérogatives de leurs autorités de tutelle respectives, chaque organisme s'engage à informer l'autre organisme et, si possible, à le consulter lorsqu'il prend connaissance de l'élaboration d'une nouvelle réglementation susceptible d'influencer l'autre organisme dans l'exercice de ses compétences ou lorsqu'il y prend part et ce, tant au niveau national, européen, supranational qu'international.

art. 4 – addenda

L'objet, les objectifs et les modalités de l'échange réciproque d'informations, de la consultation réciproque et des éventuelles activités communes seront fixés, pour les divers domaines, dans des addenda séparés qui seront joints à ce protocole. Un addendum sur les domaines suivants sera établi (...) »

(Extrait du Protocole entre l'Agence fédérale de Contrôle nucléaire (AFCN) et l'Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies (ONDRAF), (AFCN/ONDRAF, 2003)).

Dans le cadre des travaux de l'addendum 11, l'ONDRAF et l'AFCN ont produit, en 2013, une note de convergence (de vues) sur le principe d'optimisation, une note prudente qui tente de rassembler les points d'accord du moment et qui est appelée à une révision régulière (AFCN, 2013b).

10.2 Analyse des avis de l'AFCN, de la note de positionnement de l'AFCN et de la note de convergence sur l'optimisation²⁹⁹

10.2.1 Avis de l'AFCN sur le Plan Déchets de 2011 et le SEA associé

Lorsque l'ONDRAF présente son Plan Déchets (ONDRAF, 2011a) au monde politique avec le SEA qui lui est associé (Aerts *et al.*, 2010), il espère obtenir de la part du gouvernement une décision de principe sur la solution qu'il préconise, à savoir le stockage géologique dans l'argile de Boom. A cette époque, on ne parle pas de politique nationale au sens consacré par la loi du 3 juin 2014 qui transpose la directive 2011/70/Euratom (EC, 2011) puisque celle-ci n'existe pas encore, mais il s'agit bel et bien d'une proposition déposée en vue d'obtenir une décision politique.

L'avis de l'AFCN sur ces documents – le Plan Déchets et son SEA – a été formulé en application de la loi SEA (AFCN, 2011a). L'AFCN, qui ne faisait pas partie du Comité d'avis prévu dans la procédure légale, a été proposée par l'ONDRAF, conformément à l'article 12 de la loi précitée, comme organe

²⁹⁹ Cette section s'appuie (tout en les dépassant) sur certains travaux antérieurs effectués en 2016 et 2017 (Depaus, 2016a ; Depaus, 2017b). Ces travaux procédaient à l'analyse des avis de l'AFCN en vue d'orienter le futur programme de recherche de l'ONDRAF, ils n'avaient cependant aucune visée philosophique.

d'avis dans le cadre de la procédure d'évaluation³⁰⁰. L'avis de l'AFCN porte sur les aspects de sûreté radiologique et nucléaire relatifs à la gestion à moyen et à long terme des déchets radioactifs (Depaus, 2017b).

Dans cet avis, l'AFCN s'accorde tout d'abord avec l'ONDRAF pour exclure toute autre solution que le stockage géologique pour la gestion à long terme des déchets B&C. Déjà à cette époque, l'AFCN est très claire sur l'exclusion de l'entreposage de longue durée pour des raisons de sûreté³⁰¹ ainsi que sur l'exclusion, sur la base d'arguments légaux ou de faisabilité, d'options telles que le rejet en mer ou le stockage dans une calotte glaciaire. En ce qui concerne le choix de la roche hôte, l'AFCN est plus circonspecte et formule plusieurs observations :

- Le choix d'une formation hôte requiert une argumentation technique et scientifique qui démontre de manière univoque la faisabilité technique, les avantages et les inconvénients de la formation dans son environnement compte tenu de la sûreté opérationnelle et à long terme et compte tenu des aspects économiques, sociaux et éthiques ;
- Une décision plus poussée comprenant le choix de la roche hôte et de l'implantation doit d'abord reposer sur une évaluation technique et

³⁰⁰ Cela peut sembler étonnant de constater que l'AFCN n'est pas considérée comme une instance qu'il faut impérativement consulter mais il ne faudrait pas oublier qu'il s'agit ici d'une loi visant les études d'incidences environnementales liées à des plans et programmes (dont les projets de politique font partie). Ainsi la loi prévoit de consulter les Régions (compétentes en matière d'environnement) ainsi que le Conseil fédéral du développement durable, comme son article 12 le stipule : « *L'auteur du plan ou du programme soumet également pour avis le projet de plan ou de programme et le rapport des incidences environnementales au Conseil fédéral du développement durable, aux gouvernements des Régions, ainsi qu'à toute instance qu'il juge utile* ». L'AFCN n'est donc consultée que parce que l'ONDRAF le « juge utile ». On n'imagine cependant mal comment il pourrait en être autrement, dans le cadre d'un plan ou programme portant sur des matières nucléaires ou des déchets radioactifs. Toutefois, l'AFCN pourrait très bien aussi remettre son avis dans le cadre de la consultation publique, sans demande expresse de l'ONDRAF et comme toute autre partie prenante. Si la procédure ne l'interdit pas, la bonne pratique veut cependant que l'AFCN soit informée en même temps que les Régions et le Conseil fédéral du développement durable.

³⁰¹ A cette époque la directive 2011/70/Euratom n'existe pas encore et en son absence, l'AFCN ne peut invoquer que des arguments de sûreté et pas encore d'arguments légaux. Aujourd'hui, en Belgique, malgré l'interdiction légale émanant du droit international et l'opposition de l'AFCN, certains parlementaires persistent néanmoins à proposer l'entreposage comme solution définitive.

scientifique des formations géologiques potentiellement appropriées et de la faisabilité, en privilégiant la sûreté passive ;

- Il est conseillé de mener des études directrices sur ces formations hôtes potentielles moins connues, comme le suggérait déjà le comité de lecture SAFIR 2 ;
- Aucune approche systématique n'a été mise en œuvre dans le Plan Déchets et le SEA vis-à-vis des caractéristiques intrinsèques des formations géologiques potentielles ;
- Un premier screening des formations potentielles pourrait se faire sur la base des caractéristiques intrinsèques (homogénéité, capacité de confinement, etc.) et d'autres paramètres tels que l'épaisseur, la profondeur, etc. Un programme de R&D pourrait être mis au point pour les formations hôtes restantes : argile yprésienne, formations pélitiques indurées... (AFCN, 2011a ; Depaus, 2017b)

L'avis de l'AFCN est en réalité assez favorable au plan rédigé par l'ONDRAF mais se montre en revanche assez critique sur sa complétude, dénonçant une série de manquements dont l'inexistence d'une comparaison systématique de l'ensemble des roches hôtes potentielles. L'AFCN reproche donc implicitement le biais historique trop prononcé de l'ONDRAF qui étudie exclusivement l'argile de Boom. Dans ses conclusions, l'AFCN dit qu'il est actuellement impossible de se prononcer sur le choix d'une roche hôte dans la mesure où l'argile de Boom ne bénéficie d'aucun point de comparaison, tout en reconnaissant les qualités prometteuses de cette dernière :

« En ce qui concerne le dépôt géologique, il n'est actuellement pas possible de prendre une décision sur la formation hôte. En effet, même si aucun argument ne remet en question la capacité de confinement de l'argile de Boom, il n'existe aucune argumentation technique et scientifique similaire pour d'autres formations hôtes potentielles ... » (AFCN, 2011a)

Elle conclut qu'il est donc prématuré d'avancer « les argiles peu indurées » comme (seules) formations hôtes potentielles pour un stockage géologique des déchets B&C mais ne semble toutefois pas prétendre que les conclusions

définitives ne viendront quand même pas confirmer ce que l'ONDRAF avance déjà :

« Il est conseillé de poursuivre la recherche afin de confirmer les résultats dans l'argile de Boom compte tenu du fait que l'étude parallèle d'autres formations hôtes potentielles n'aboutira pas nécessairement à un résultat fondamentalement meilleur. » (AFCN, 2011a)

Il n'est nullement fait allusion, du moins explicitement, au principe d'optimisation de la protection.

Une autre critique importante de l'AFCN porte sur la sous-estimation de l'importance de la capacité d'isolation du système de stockage (et donc pas uniquement de son confinement) et pointe la présence de nombreux aquifères dans le voisinage de l'argile de Boom (AFCN, 2011a, § 3.2.7). C'est un argument qui, plus tard, reviendra souvent, notamment à la faveur des formations péliques indurées (schistes) dont les profondeurs, épaisseurs et localisations permettent d'accroître la capacité d'isolation en comparaison de l'argile de Boom³⁰².

10.2.2 La note de positionnement de l'AFCN

La note de positionnement de l'AFCN est, a contrario de l'avis précédent, un document rédigé à l'initiative de l'AFCN, en dehors de toute procédure légale (AFCN, 2014a). Elle a manifestement été écrite en prévision d'une future politique nationale – pour laquelle l'ONDRAF a un pouvoir d'initiative et de proposition – ainsi que de l'élaboration du programme national conformément à la loi du 3 juin 2014 (Depaus, 2017b). Les messages de

³⁰² Dans la région précise de Mol.

l'AFCN sont renforcés et un caractère plus légaliste distingue la note de l'avis de 2011. Ces messages peuvent être résumés comme suit :

« Arguments 'processus décisionnel per se' :

- *Les décisions dans le cadre des politiques nationales doivent se fonder sur un processus décisionnel par étapes et sur une acceptation sociétale :*
 - *Sélection d'une ou plusieurs formations hôtes ;*
 - *Sélection du site ;*
 - *Décisions associées au processus d'autorisation.*

(...)
- *La sélection de la formation hôte dans un premier temps et le choix du site ensuite constituent des étapes importantes du processus décisionnel dont les conséquences sur la sûreté d'un stockage géologique sont capitales.*

(...)
- *L'AFCN ne pourra remettre d'avis (dans le cadre de la loi du 3 juin 2014, art. 4 §6) que sur la base d'un dossier de sûreté dont la structure aura été convenue au préalable et qui inclura notamment une évaluation de sûreté montrant le caractère approprié de la formation hôte. » (Depaus, 2017b)*

Le choix de la formation hôte devient un message récurrent et l'AFCN espère ainsi prévenir l'adoption éventuelle d'une politique nationale qui ne consacrerait pas suffisamment d'importance à la discussion de ce choix. En effet, l'ONDRAF a un pouvoir d'initiative dans l'adoption des politiques nationales, conformément à la loi du 3 juin 2014 et, en 2010, l'ONDRAF souhaitait qu'une décision de principe soit prise sous la forme d'un arrêté royal en faveur du choix non seulement d'un stockage géologique mais aussi d'un stockage dans l'argile de Boom. Bien que l'avis de l'autorité de sûreté n'ait pas été négatif, le fait de demander l'investigation d'autres roches et de questionner la capacité d'isolation du site de référence de l'argile de Boom (localité de Mol³⁰³) suscite un vif émoi au sein de l'ONDRAF qui voit ainsi ses trente dernières années de recherche remises en question. L'AFCN entend,

³⁰³ Où est construit le laboratoire souterrain HADES.

en effet, formuler très tôt ses réserves sur un éventuel choix de site pour le stockage géologique et l'ONDRAF se montrera quelque peu réticent à rouvrir le champ des possibles³⁰⁴.

Dans le cadre de la procédure d'institution des politiques nationales par la loi du 3 juin 2014, l'avis de l'AFCN n'est pas un avis *conforme*³⁰⁵ et n'a donc pas de force directement contraignante sur l'ONDRAF :

« §6. Par arrêté délibéré en Conseil des ministres, sur proposition de l'Organisme et après avis de l'autorité de réglementation compétente, le Roi institue et maintient des Politiques nationales en matière de gestion des déchets radioactifs ... » (M.B., 2014, art. 4)

Or, ces politiques contiennent le choix des sites de stockage :

« §6 (...) Les politiques nationales contiennent le choix des sites des installations de stockage sur proposition de l'Organisme qui consulte l'autorité de réglementation compétente. » ((M.B., 2014, art. 4)

L'AFCN est donc consciente que bien qu'elle soit l'autorité de sûreté, une partie de la procédure pourrait lui échapper. Il est en effet possible, en théorie, que l'ONDRAF force l'adoption d'un site de stockage (et donc d'une roche) s'il bénéficie d'un accord politique favorable. Bien entendu, l'AFCN pourrait, dans ce cas, ne pas délivrer le permis de construction et d'exploitation mais elle ne pourra notifier son refus, sur la base d'arguments de sûreté, que fort tard dans la procédure et sans incriminer directement le

³⁰⁴ Ce climat de suspicion se développe sur un passif. En effet, le choix du site de Dessel pour le stockage de surface des déchets faiblement radioactifs a fait l'objet d'une décision politique sans que l'AFCN n'ait vraiment eu son mot à dire. Point de manœuvre de l'ONDRAF pour éviter cette consultation de l'AFCN mais simplement une configuration institutionnelle malheureuse. Si l'AFCN existe depuis 1994, son arrêté d'exécution lui clarifiant ses missions se fait attendre et n'arrive qu'en 2001. L'AFCN, pendant cette période de 7 ans, ne dispose pas des pleins pouvoirs et ne revêt pas le statut qui lui est reconnu aujourd'hui. Les décisions ministérielles de 1998 et 2006 qui confirment le choix du site de Dessel pour le projet de stockage de surface ont été prises sans que l'AFCN ait été dûment consultée.

³⁰⁵ Un avis *conforme*, à la différence de l'avis (simple ou consultatif), est un avis contraignant qui doit être suivi par son destinataire (le demandeur). Le terme *conforme* désigne le caractère impératif de l'avis émis (Conseil d'Etat, 2008 ; Urban Brussels, s.d. [https://urbanisme.irisnet.be/lepermisurbanisme/la-demande-de-permis/consultation-des-administrations-et-instances#:~:text=L'avis%20est%20consultatif%20\(non,avis%20est%20conforme%20\(contraignant.](https://urbanisme.irisnet.be/lepermisurbanisme/la-demande-de-permis/consultation-des-administrations-et-instances#:~:text=L'avis%20est%20consultatif%20(non,avis%20est%20conforme%20(contraignant.) [Consulté le 25 août 2021].

choix du site statué par arrêté royal. Dans cette hypothèse, l'ONDRAF obéirait à un choix de site statué par une instance supérieure par voie d'arrêté et n'aurait plus alors qu'à se contenter d'optimiser la sûreté compte tenu de conditions aux limites qui lui seraient imposées. Si une réserve par rapport à la sûreté globale du système de stockage devait être émise par l'AFCN en incriminant le choix du site, il s'agirait de toute évidence d'une opposition « tardive » et l'autorité de sûreté devrait alors attaquer la légitimité d'une décision antérieure prise par le gouvernement. On peut penser que ce genre de contestation serait particulièrement risquée, même pour une autorité de réglementation compétente³⁰⁶. En conclusion, le fait que l'AFCN ait le pouvoir d'accorder ou non les permis n'est pas totalement suffisant en l'espèce pour arrêter un processus de construction, surtout si celui-ci doit prendre des décennies et qu'une forte pression sociétale se fait sentir. Il est permis de penser que c'est ce dont l'AFCN cherche à se prémunir en déclarant, en amont de toute adoption de politique nationale portant sur un choix de site, qu'une discussion préalable doit avoir lieu³⁰⁷.

Notons qu'un tel scénario où l'ONDRAF aurait tenté d'utiliser une conjonction politique à son avantage pour outrepasser un avertissement du régulateur ne s'est jamais produit, que du contraire. Mais c'est sans doute aussi et surtout grâce à cet avertissement très tôt formulé que les deux instances ont dû trouver un terrain d'entente, l'ONDRAF acceptant finalement de revenir en arrière dans sa proposition de politique. En effet, dans la nouvelle proposition de politique nationale de 2020, l'ONDRAF propose une solution générique du stockage géologique sur le territoire belge, sans précision ni de site ni de roche hôte (ONDRAF, 2020b).

Il nous paraît intéressant de relever que cette démarche anticipatrice fait écho à une problématique identifiée depuis longtemps dans la dynamique de participation publique sur des héritages technologiques, il s'agit de la « thèse de l'inanité » (Hirschman, 1991), un concept que Y. Barthe reprend

³⁰⁶ L'AFCN est ainsi désignée par la loi du 3 juin 2014 modifiant la loi du 08/08/1980 (M.B., 2014).

³⁰⁷ Ce risque n'existe en théorie que s'il existe également par ailleurs, un climat politique volontariste. Actuellement, le monde politique a tendance à renvoyer l'ONDRAF et l'AFCN face à face pour se garder de prendre une décision tant que l'accord entre les deux institutions n'est pas total, au mépris parfois de leurs devoirs respectifs d'indépendance.

dans une discussion sur le projet d'enfouissement français des déchets radioactifs. En effet, des projets technologiques contestés aujourd'hui résultent en réalité de choix passés pour lesquels des instruments légaux sont apparus et où des situations de « verrouillage » technique ont ainsi été créées au fil de l'histoire. Ces *faits accomplis* rendent la discussion politique et citoyenne un peu artificielle puisque celle-ci n'aurait pour objectif que d'entériner des choix passés, jouant un simulacre de démocratie où le débat public arrive bien « après la bataille » (Barthe, 2002). Cette thèse de l'inanité, discutée par Barthe est, selon lui, par trop réductrice car elle néglige notamment leur portée politique pouvant produire des effets inattendus sur le déroulement et l'issue des situations conflictuelles mises à l'examen et ce, en dépit de leur décalage dans le temps (Barthe, 2002). Si nous partageons ce point de vue, nous souhaitons surtout pointer ici l'occurrence inattendue de ce phénomène au sein de l'interaction ONDRAF et AFCN, c'est-à-dire dans l'intimité de la chambre des experts. D'autres chercheurs en sciences humaines ont également relevé ce renforcement systématique des choix « techno-politiques » antérieurs, créditant ainsi la thèse d'inanité. Ainsi que le précise Céline Parotte :

« les experts publics et privés du domaine nucléaire ont présenté le dépôt sur un plan technique presque comme un 'fait accompli', ancré dans une forme d'expertise nationale et internationale et présentée comme consensuelle de longue date. » (Parotte, 2016)

Si le stockage géologique récolte effectivement les suffrages de bon nombre d'experts, y compris les régulateurs, le syndrome du « fait accompli » (Callon *et al.*, 2001) est aussi ce dont les experts de première ligne³⁰⁸ eux-mêmes semblent vouloir se prémunir³⁰⁹.

³⁰⁸ Dans l'introduction générale de cette thèse, nous avons dénommé ainsi les experts des institutions publiques ONDRAF et AFCN par opposition aux expertises académiques. L'expertise de première ligne est celle associée institutionnellement à l'action (autorisation, politique, développement de solutions) mais pas forcément à la décision.

³⁰⁹ Manfred Schrauben, Chef du département surveillance et contrôle à l'AFCN, communication personnelle, 2013.

Ce que l'AFCN demande, dans cette note de positionnement, c'est une analyse systématique des formations hôtes potentielles, attestant de la bonne application du principe d'optimisation :

« Dès lors, selon l'AFCN, la sélection de la formation hôte doit résulter de la mise en œuvre du principe d'optimisation de la protection conformément au RGPRI [5] et aux recommandations internationales [9,10].

Ainsi le processus d'optimisation de la protection commence avec le choix de la formation hôte. Cela signifie que les formations géologiques (et sites) présentant les caractéristiques les plus favorables pour assurer la sûreté d'un stockage doivent être sélectionnées sur base d'une évaluation technique et scientifique des formations disponibles et plus particulièrement de leur performance attendue d'isolation et de confinement [11].

Les formations les plus optimales du point de vue de la sûreté doivent être identifiées à partir d'une comparaison systématique des formations potentiellement favorables sur base d'attributs clairement identifiés. Les exigences relatives à la formation hôte données par l'AFCN dans le guide technique intégré dépôt géologique [7] constituent la référence pour l'établissement de ces attributs. » (AFCN, 2014a)

Les références sur lesquelles s'appuie l'AFCN dans cet extrait sont l'arrêté royal de 2001 qui institue le RGPRI³¹⁰ (M.B., 2001) mais aussi et surtout les recommandations internationales issues des publications SSR-5 de l'AIEA (IAEA, 2011b) et 122 de la CIPR (ICRP, 2013) précédemment étudiées ainsi que la guidance intégrée de l'agence pour le stockage (AFCN, 2014b). Comme nous l'avons vu précédemment, l'AFCN peut se créditer des travaux internationaux de la CIPR et l'AIEA en vue de défendre une approche séquentielle et chronologique du principe d'optimisation.

³¹⁰ Règlement Général de la Protection de la population, des travailleurs et de l'environnement contre le danger des Rayonnements Ionisants

L'optimum est présenté par rapport à la sûreté sur la base de formations qui seraient des candidates favorables, sélectionnées sur base d'attributs clairement identifiés.

Le message de l'AFCN est fondamentalement le même que celui émis quelques années auparavant dans l'avis sur le Plan Déchets mais la note de positionnement s'est enrichie d'un contenu théorique puisque le principe d'optimisation est invoqué afin de justifier la nécessité de procéder à une analyse systématique. Nous pensons que l'AFCN, en mobilisant le principe d'optimisation, cherche à établir la légitimité de sa demande en traduisant celle-ci comme une nécessité de sûreté, domaine qui relève de sa compétence ultime. En effet, sans cet argument, l'avis de l'AFCN serait discutable puisque l'agence n'a pas pour mission de s'immiscer dans la méthodologie de développement du système de stockage tant que celle-ci n'affecte pas immédiatement la sûreté. L'indépendance de l'AFCN se paie en effet au prix d'un renoncement à un co-développement de la solution de gestion des déchets avec l'ONDRAF.

Il s'agit pour nous d'un fait remarquable qui doit éveiller notre attention. Pourquoi cet argument du principe d'optimisation de la protection (et de la sûreté) ne pouvait-il pas être évoqué déjà en 2011, lors de la parution du Plan Déchets ? Plusieurs hypothèses peuvent être formulées.

La première, de peu d'intérêt, est que l'AFCN n'a pas jugé utile d'asseoir son avis sur la base de la doctrine internationale avant de se rendre compte de la frilosité de l'ONDRAF à l'égard d'un élargissement éventuel de ses investigations en matière de roches hôtes.

La deuxième hypothèse tient de la parution, en 2013, de la publication 122 de la CIPR qui confirme l'application du principe d'optimisation selon une approche intégrée, incluant le choix de la roche hôte :

*« The stepwise decision process (...) constitutes the framework for the optimisation process. As a central component, optimisation and the application of Best Available Techniques have to cover all elements of the disposal system in an **integrative approach** [i.e. site (**including host rock formation**), facility design, waste package design, waste characteristics] as well as all relevant time periods. »* (ICRP, 2013, nous soulignons)

Et,

*« (...) First of all, stepwise **optimisation decisions mainly have to be taken in chronological order (e.g. the decisions on the choice of a host rock and on one or a limited number of sites are often prior to decisions on a detailed design).** For the selection of a site, a balance has to be struck between technical criteria (...) and local or supralocal economic and societal factors ...» (ICRP, 2013, **nous soulignons**)*

Ces travaux de la CIPR n'étaient pas encore référencables en 2011 et il aurait été difficile pour l'AFCN d'établir, sans discussion, un lien entre le principe d'optimisation et le choix de la roche hôte, autrement que par une interprétation plus libre et donc plus discutable de la publication 81 de la CIPR. L'extrait ci-dessous aurait sans doute servi de justification :

*« judgmental process with social and economic factors being taken into account and should be conducted in a structured, essentially qualitative way. The goal is to ensure that reasonable measures have been taken to reduce future doses to the extent that required resources are in line with these reductions. The optimization principle should be applied in an iterative manner during the disposal system development process and should particularly cover **both**³¹¹ the site selection and the repository design phases. » (ICRP, 1998, §50, **nous soulignons**)*

Remarquons que la sélection du site peut être entendue, dans cet extrait, *comme intervenant à partir du moment où la roche hôte a été choisie* ou encore *comme englobant le choix de celle-ci*. Si cette interprétation n'est pas univoque, elle n'est pas impossible et il nous paraît donc curieux que l'AFCN n'ait même pas tenté d'en faire mention à l'examen du Plan Déchets de 2011.

La troisième hypothèse est en lien avec le processus décisionnel. En effet, la grande différence entre 2014 et 2011, outre l'évolution de la doctrine de sûreté, est le pouvoir qu'acquiert l'ONDRAF d'initier des politiques nationales. Même si l'AFCN, en tant qu'autorité de réglementation

³¹¹ « *both* » occupant la place d'adverbe dans la définition ci-dessus, il prend bien la signification de « à la fois, ensemble » et non celle de « l'un et l'autre » (signification qu'il aurait eu s'il avait été utilisé comme pronom).

compétente, doit être consultée, elle n'est pas à la manœuvre. Pour que son avis produise un maximum d'effet et soit incontournable au niveau du processus d'élaboration des politiques, il est impératif qu'il soit question de sûreté. Une proposition de politique nationale qui s'écarterait des recommandations de sûreté émises par l'AFCN n'aurait en effet aucune chance d'aboutir³¹². En revanche, pour ce qui ne relèverait pas exclusivement de sa compétence, l'avis de l'AFCN reste, comme nous le précisons ci-avant, un avis consultatif, non conforme, donc sans valeur directement contraignante. Il nous paraît raisonnable de supposer que l'AFCN, intervenant en seconde ligne dans l'élaboration des politiques, pourrait chercher à se réapproprier la part décisionnelle qui lui revient³¹³. La motivation de l'AFCN pourrait être l'évitement du *fait accompli*, phénomène plutôt fréquent dans le domaine nucléaire – si l'on en croit certains commentateurs (Parotte, 2016 ; Laes *et al.*, 2009) – et construit par les experts. Mais nous formulons l'hypothèse qu'il pourrait également s'observer au sein même de la communauté d'experts. Toute autorité de réglementation compétente qu'elle soit, l'AFCN semble en effet avoir été

³¹² Ce point de vue se base sur la prééminence de la sûreté sur toute autre considération. Même s'il peut exister une possibilité de contourner l'avis de l'autorité de sûreté sur un plan juridique, ce contournement serait, aujourd'hui, inacceptable sur tout autre plan. Comme le résume bien Grégoire Lits à propos de la Commission WANO (*World association of nuclear operators*) : « L'erreur n'est pas possible, non seulement parce que, si elle est très importante, elle détruit durablement l'environnement, mais également, parce que, même si elle est de très faible amplitude, elle affecte durablement le support (ou la confiance) du public envers la technologie nucléaire dans son ensemble » (Lits, 2015, p. 405). On n' imagine mal un gouvernement même volontariste prendre une décision qui irait à l'encontre de l'avis de l'autorité de sûreté sur une matière qui concerne strictement celle-ci.

³¹³ Mais lui revient-elle ? C'est toute la question. L'indépendance de l'AFCN est essentielle et c'est en son nom que l'agence est souvent tenue à l'écart de la première ligne décisionnelle. Cette indépendance – sujet de dissertation en soi – devrait selon nous, être rapprochée de celle pensée à l'origine pour l'ONDRAF (Lits, 2015, p. 397) et pourtant contestée (Parotte et Fallon, 2020, p. 64)

quelque peu laissée pour compte par la loi du 3 juin 2014³¹⁴, malgré la volonté initialement exprimée par le Parlement de laisser l'AFCN et l'ONDRAF coordonner les initiatives de transposition (Chambre des représentants, 2011), en collaboration avec le SPF Economie chargé de préparer les textes législatifs et l'exposé des motifs (Chambre des représentants, 2012)³¹⁵.

Si cette hypothèse était avérée, l'utilisation du principe d'optimisation et son interprétation divergente entre l'ONDRAF et l'AFCN n'aurait pas qu'une origine épistémologique se référant à une lecture différente de la doctrine internationale, elle pourrait aussi avoir une origine plus structurelle et politique. Cet angle d'analyse sort toutefois de notre question de recherche. Dans la décision de l'AFCN de recourir au principe d'optimisation pour étayer son point de vue, nous tenons cette troisième hypothèse comme ayant pu jouer un rôle mais celui-ci reste, selon nous, marginal³¹⁶. En revanche, nous sommes convaincus que la deuxième hypothèse est non seulement la plus riche sur le plan épistémologique mais également la plus probante.

³¹⁴ Nous avons participé à la transposition de la directive européenne 2011/70/Euratom en droit belge dont le résultat est la loi du 3 juin 2014 modifiant l'article 179 de la loi du 8 août 1980 (M.B., 1980). Alors que cet exercice fut initialement confié au SPF Economie, département Energie sans aboutir, la main a été ensuite donnée par le ministre des Affaires étrangères, sous la pression d'une infraction européenne, à un comité construit sur base *ad hoc* et regroupant l'ONDRAF, Synatom et Engie-Electrabel. Ce comité est parvenu à transposer la directive en un temps record. L'AFCN et le SPF Economie/Energie n'ont pas été conviés à l'exercice. Lors de la transposition, il a été décidé de créer un comité du programme national, le CPNPC, présidé par le SPF Economie/Energie, dont le secrétariat est assuré par l'ONDRAF et dans lequel siège également Synatom en tant que membre régulier. L'AFCN n'est pas membre du CPNPC...

³¹⁵ Nous en avons été témoins. Le SPF avait en effet tenté de produire, à la faveur de la transposition de la directive, une loi consolidée sur la gestion des déchets nucléaires. Le texte était ambitieux et a rencontré trop d'oppositions pour aboutir. Toutefois, cette épreuve préliminaire a servi de base à la transposition effective de la directive, texte plus simple qui n'a pas cherché à combler les lacunes du cadre législatif et réglementaire existant.

³¹⁶ Il ne s'agit que d'une impression mais elle nous vient de la pratique. Les défenseurs, à l'AFCN, de l'omniprésence du principe d'optimisation sont des ingénieurs réfléchissant aux aspects techniques des stockages. Il nous serait difficile de croire qu'ils n'agiraient que pour accomplir une mission stratégique en lien avec la défense du pouvoir réglementaire de l'AFCN.

10.2.3 L'avis sur le programme national belge

Dans l'avis que remet l'AFCN sur le programme national belge (AFCN, 2015a), l'agence de sûreté se dit favorable au stockage géologique pour la gestion à long terme des déchets radioactifs en précisant toutefois que les décisions relatives à la formation hôte doivent résulter de la mise en œuvre du principe d'optimisation conformément au RGPRI (M.B., 2001) et aux recommandations internationales. L'AFCN concède la possibilité aux aspects socio-économiques d'influencer le choix final de la roche hôte et du site « *pour autant que la roche hôte satisfasse aux exigences de sûreté* » (AFCN, 2015a). On ne manquera pas de relever l'ambiguïté de l'avis de l'AFCN sur la question du choix de la roche hôte qui doit à la fois résulter d'un optimum (de sûreté) tout en satisfaisant au minimum à des exigences de sûreté non explicitées. Est-ce que la roche hôte doit à tout le moins satisfaire à des exigences précises mais qui ne sont pas libellées par l'AFCN, ou doit-elle résulter d'un optimum de sûreté après « *comparaison systématique des formations potentiellement favorables sur base d'attributs de sûreté clairement identifiés* » (AFCN, 2015a) ? Dans quelle mesure les aspects sociotechniques peuvent-ils infléchir cet optimum ? Serait-ce à dire que celui-ci ne constituerait qu'un exercice de style dès lors qu'il est reconnu que les aspects socio-économiques peuvent totalement changer la donne ? Le double langage se prolonge tout au long de l'avis, ainsi par exemple :

*« Les décisions relatives à ces étapes [les étapes du processus décisionnel] doivent être supportées par un dossier de sûreté dont la structure aura été convenue au préalable avec l'AFCN. En ligne avec les recommandations internationales, ce dossier de sûreté doit notamment inclure une évaluation de sûreté montrant le **caractère approprié** de la formation hôte et de son environnement géologique ainsi que le processus d'optimisation de la protection qui a mené à la sélection de la formation hôte et/ou du site. »* (AFCN, 2015a, **nous soulignons**)

Le caractère approprié de la formation hôte fait référence à des critères implicites au sens d'un minimum à satisfaire et le choix de conjonction « et/ou » laisse penser que le principe d'optimisation pourrait ne s'appliquer qu'au choix du site après la sélection préalable d'une roche hôte. Mais cette lecture du *satisficing* de Simon (Simon, 1979 ; Simon, 1997) qui serait très

personnelle est toutefois battue en brèche par la déclaration plus générale de l'avis de l'agence de sûreté : « la *solution de gestion à long terme préconisée par l'ONDRAF ne résulte pas d'un processus d'optimisation de la protection* », estimant en effet que la sélection de la roche « *argile peu indurée* » n'a pas fait l'objet d'une analyse de sûreté (AFCN, 2015a).

Cet optimum de la sûreté doit s'apprécier à l'aune des capacités d'isolation et de confinement des formations hôtes potentielles, ainsi que de leur environnement géologique, précise l'avis. En outre, poursuit l'AFCN, la connaissance limitée sur d'autres types de roches que les argiles peu indurées ne peut constituer un argument décisif d'orientation du choix, l'état de la connaissance n'étant pas une *circonstance existante*³¹⁷ :

« Entre autres, le fait que les connaissances actuelles pour un certain type de formation soient limitées ne peut pas constituer un argument décisif dans la sélection d'une catégorie de formations hôtes. »
(AFCN, 2015a)

L'AFCN conteste ici l'état de la connaissance en tant que moteur de sélection et réclame implicitement une mise à niveau des connaissances sur l'ensemble des possibilités existantes. Cette requête, qui ne peut cacher son caractère de rationalité substantive, exige en effet d'établir l'optimum au sein de toutes les solutions possibles.

Le bagage théorique sur lequel l'AFCN base son avis est évidemment l'application du principe d'optimisation de la protection sans pour autant fournir les références internationales sur lesquelles l'agence semble s'appuyer. Ce bagage s'enrichit explicitement du concept de « circonstances existantes » auxquelles l'AFCN identifie les « aspects sociétaux et économiques » :

« Les aspects sociétaux et économiques font partie des 'circonstances existantes' du processus d'optimisation de la protection et font intervenir plusieurs parties prenantes comme par exemple la société

³¹⁷ La notion de « circonstance existante » de l'AFCN correspond à celle de « *prevailing circumstances* » dans la publication 101 de la CIPR (ICRP, 2006).

civile, les populations locales (e.g. les partenariats) et les industries »
(AFCN, 2015a)

L'avis de l'AFCN ne fournit pas la définition des *circonstances existantes*. La simple lecture du vocable nous invite à penser que les circonstances existantes font référence à un *déjà là* qui sert, de toute évidence, de contraintes au processus d'optimisation :

« L'objectif est d'atteindre le meilleur niveau de protection compte tenu des circonstances existantes (...). Les contraintes liées aux circonstances existantes doivent être identifiées et leurs implications sur la stratégie de sûreté évaluées. » (AFCN, 2014b).

Bien que les circonstances existantes ne soient pas définies dans l'avis, l'AFCN exclut *de facto* l'état de la connaissance dans le *déjà là* sur lequel appuyer le principe d'optimisation. La note de convergence ONDRAF-AFCN, dont l'analyse fait l'objet de la section suivante, rappelle que les circonstances existantes constituent *« l'ensemble des éléments qui ne font pas l'objet d'une optimisation de la protection proprement dite mais qui doivent néanmoins être pris en compte pour celle-ci »* (AFCN, 2013b)

L'AFCN n'ignore évidemment pas les inévitables contraintes du principe d'optimisation sans lesquelles la notion même d'optimisation ne pourrait exister mais elle cantonne celles-ci dans une sphère extérieure à celle du processus technique : les aspects socio-économiques. Il s'agit de contraintes sociétales que l'on conçoit volontiers comme indépendantes de la construction de la solution³¹⁸. L'AFCN semble ainsi ne pas vouloir reconnaître le caractère limité de la connaissance ou les possibilités limitées de traiter l'information même si celle-ci était tout entière disponible. Derrière un message d'une légitimité sans faille pour une autorité de sûreté, qu'il nous serait possible de résumer comme le refus de considérer l'ignorance comme limitant la recherche de solution, se cache une ambition à laquelle il n'est peut-être tout simplement pas possible de répondre. En effet, ce que l'AFCN semble requérir ici est le recours à une rationalité parfaite s'exerçant sur l'entière de l'information existante, comme nous l'évoquions

³¹⁸ Cette « indépendance » est un point hautement contesté d'un point de vue sociologique (Laes, 2007 ; Parotte, 2020).

précédemment (voir section 9.5), en présentant les travaux de Simon (Simon [1945]1997 ; Simon, 1956 ; Simon[1969]2004 ; Simon[1973]1992 ; Simon, 1977 ; Simon, 1979 ; Simon, 1982 ; Simon, 1997) sur les rationalités substantive, procédurale et limitée ainsi que les commentaires à ce sujet, de Le Moigne (Le Moigne, 1994 ; Le Moigne, 2009), Quinet (Quinet, 1994) et Rubinstein (Rubinstein, 1998).

Mais ce que conteste l'AFCN, en refusant d'emblée le recours à la limitation de la connaissance pour orienter le choix de la solution vers les options déjà connues, n'est peut-être pas tant le recours, pour l'ONDRAF, à une rationalité limitée ou procédurale³¹⁹ que le refus d'un biais lié à un ordonnancement préalable dans une prise de décision procédurale. En d'autres termes, la critique de l'AFCN n'est peut-être pas de remettre en question la recherche, par l'ONDRAF, d'une solution satisfaisante résultant d'une réflexion (délibération) appropriée qui ne serait ni approchée ni approximative. En revanche, ce qui pourrait être reproché par l'AFCN, c'est plutôt un biais décisionnel de simplification, ce que nous avons précédemment identifié comme la deuxième distorsion en tant que biais dans la prise de décision (voir section 9.4). En effet, la présélection d'alternatives peut conduire, nous l'avons vu, à bousculer les préférences. Alors que l'ONDRAF utilise, pour procéder à son screening préalable, la connaissance déjà acquise grâce à son laboratoire souterrain, l'AFCN conteste la légitimité d'une telle approche car elle exclut *de facto* les argiles indurées. Que la rationalité à l'œuvre soit substantive ou procédurale, le choix demeure rationnel. En revanche, dans le cas d'une distorsion, l'option choisie ne procède plus nécessairement d'un choix rationnel, l'axiome d'indépendance étant violé. C'est ce que nous nous proposons d'illustrer à présent.

³¹⁹ Pour la présente discussion, nous nous contentons de la synonymie entre rationalité procédurale et rationalité limitée, établie par Simon lui-même : « La rationalité limitée est procédurale et non substantive » (Simon, 1997) tout en étant conscient que la réciproque de cette affirmation n'est pas nécessairement vraie et que le commentaire historique de Le Moigne sur les travaux de Simon nous a montré la distinction à opérer (voir section 9.5).

10.2.4 Distorsion, ordonnancement et règle de préférences

Reprenons la stylisation proposée à la section 9.4 avec BC désignant l’argile de Boom étudiée depuis 40 ans par l’ONDRAF, YC désignant l’argile yprésienne – apparentée en tant qu’argile peu indurée et donc volontiers considérée par l’ONDRAF comme possible alternative – et ARG, les autres argiles dites indurées³²⁰ (par opposition aux précédentes), que l’AFCN propose d’investiguer.

L’ensemble des possibilités est donc : {ARG, BC, YC}. Une règle d’ordonnancement basée sur la qualité de la connaissance proposera une présélection conduisant au sous-ensemble {BC, YC} mieux connu que ARG. Une règle de préférence basée sur la sûreté – si une telle règle existe vraiment – proposera tantôt $BC \succeq YC$ tantôt $YC \succeq BC$ car à ce jour³²¹, rien ne permet de le dire. Dans tous les cas, l’ONDRAF avancera une solution correspondant à l’une des options envisagées dès le départ, à savoir une argile peu indurée (i.e., BC ou YC).

Ce que fait l’AFCN, ce n’est pas tant d’ajouter ARG à l’ensemble des possibilités puisque ces roches ont toujours existé et ne sont pas ignorées de l’ONDRAF mais bien d’attaquer une règle d’ordonnancement qui consisterait à écarter un pan éventuellement avantageux de solutions. L’application d’une présélection sur base de la connaissance exclut *de facto* et à jamais toute option nouvelle nécessairement moins connue qui viendrait élargir l’ensemble des possibilités. La discussion et la pomme de discorde tournent donc autour d’une règle de préférence supposée dans le chef de l’AFCN qui établirait : $ARG \succeq BC \succeq YC$ ou indifféremment $ARG \succeq YC \succeq BC$, soit sous forme agrégée $ARG \succeq \{BC, YC\}$ sans préférence assumée dans l’ensemble {BC, YC}. En effet, l’AFCN reproche à l’ONDRAF de ne pas avoir investigué les argiles indurées qui, en Belgique, existent sous la forme de schistes. Cette option

³²⁰ A ce stade de la discussion, nous n’entrons pas dans les spécificités pétrographiques établissant notamment les distinctions entre argilites, shales, slates, ardoises et schistes, tous pouvant ici être considérés dans ARG.

³²¹ 2022.

permettrait, selon l'AFCN, d'envisager un stockage plus profond de minimum 400 mètres (AFCN, 2016*)³²².

Examinons quelles seraient les implications de cette règle de préférence.

- Si cette règle de préférence n'est pas avérée et que par conséquent $\{BC, YC\} \gtrsim ARG$, la requête de l'AFCN aura simplement retardé le projet sans autre bénéfice que celui d'avoir œuvré à une plus grande complétude scientifique.
- Si la règle de préférence de l'AFCN était avérée, encore faudrait-il que la différence observée entre ARG et $\{BC, YC\}$ soit suffisamment significative pour la sûreté pour justifier le retard d'un programme de recherche afin d'investiguer l'autre option jusque-là délaissée. La requête de l'AFCN pourrait paraître d'autant plus ambitieuse, qu'en raison de ce manque de connaissance, il serait difficile d'inférer la supériorité de ARG sur les autres options étudiées jusqu'ici. Les analogues internationaux sont peu informatifs puisqu'aucune étude n'a vraiment cherché à comparer les solutions d'un pays à l'autre, en termes de sûreté globale. Même si cette différence n'est pas significative pour la sûreté, il serait certainement plus confortable de se rapprocher d'une solution proposée par un autre pays afin de se sentir moins seul dans la course et bénéficier d'un retour d'expérience utile. Toutefois, cela ne peut en aucun cas servir d'argument suffisant pour privilégier telle ou telle option *a priori*, et ce, dans un contexte où même les pays avancés doivent encore faire leurs preuves³²³.

³²² Dans la lettre de l'AFCN à la Commission des Provisions Nucléaires, l'autorité de sûreté se montre très explicite par rapport à ses préférences (AFCN, 2016*). Elle fonde son argumentaire notamment sur les analogues étrangers. Nous ajoutons à cet état de fait que l'AFCN mène un programme de recherche indépendant et utilise pour ce faire, le laboratoire suisse du Mont Terri afin d'y mener des expériences. Ce dernier est construit dans l'argile indurée Opalinus. Certains schistes belges pourraient présenter des propriétés similaires, propriétés également rencontrées en France dans l'argilite Callovo-Oxfordienne. Enfin, notons qu'il est également possible de descendre à 400 mètres avec des argiles peu indurées (BC, YC) mais le nombre de sites potentiels se réduit. Avec les schistes, de nouveaux sites peuvent être considérés et le plus souvent, à des profondeurs plus grandes.

³²³ En effet, il n'y a pas encore eu de validation factuelle des démonstrations de sûreté avancées par lesdits pays tels la Finlande, la Suède ou la France.

- Si la règle de préférence était avérée et que le gain de sûreté à long terme était significatif (et démontrable), la requête de l'AFCN devrait certainement être suivie. Toutefois, adopter une solution certes plus sûre qu'une autre (déjà sûre) ne pourrait être rendu légitime qu'en démontrant que le retard d'implémentation de la solution de stockage est compensé par le gain de sûreté fourni par la solution finale. Mais cette compensation ne peut être directe puisque les bénéfices escomptés pourraient sauter une ou plusieurs générations et qu'ils privilégieront certains acteurs plutôt que d'autres ; par exemple, en favorisant le bien-être d'une société appréhendée globalement par opposition à celui de communautés résidant au voisinage d'installations d'entreposage dont il faudrait prolonger l'existence. Cette discussion éthique fera l'objet de la section 10.6.

Un autre risque est révélé par l'exercice de comparaison. En approfondissant l'analyse systématique des roches hôtes par le truchement de ARG, une question mise temporairement sur le côté refait surface : celle de la différence de connaissance entre BC et YC. En effet, le programme de recherche de l'ONDRAF porte depuis une quarantaine d'années sur BC et le programme sur YC est principalement obtenu par transposabilité (Van Baelen *et al.*, 2012). Le niveau de connaissance de BC est donc en réalité supérieur à YC, comme nous l'écrivions précédemment (voir section 9.4), car il bénéficie directement du résultat des expériences alors que la connaissance sur YC est principalement obtenue par inférence. Par conséquent, sur le plan de la connaissance acquise aujourd'hui, il est incontestable que l'ordre suivant peut être établi : $BC > YC > ARG$ où « > » signifie « mieux connu que », ce qui correspond à la règle d'ordonnement réelle, basée sur la connaissance.

Dès lors, un critère de présélection basé sur la connaissance pourrait conduire à certains biais dans la prise de décision telle que nous l'avons montré au chapitre précédent. Une règle d'ordonnement opposant l'option la plus connue à l'option la moins connue conduirait, pour les argiles peu indurées, à préférer BC à YC. La règle de préférence, s'il est réellement possible de l'établir en fonction de critères définis, est dictée par des considérations de sûreté globale. Quelle qu'en soit la nature, elle mènera à des possibles distorsions dans la prise de décision si un critère

d'ordonnancement basé sur la connaissance et visant à opposer ce qui est mieux connu à ce qui est moins connu est appliqué préalablement. Un tel ordonnancement résulterait de la mise à exécution de la recommandation de l'AFCN qui exhorte l'ONDRAF à mener des investigations sur les argiles indurées, pour des raisons de plus grande profondeur et d'éloignement des aquifères :

« Hieruit blijkt dat België (Klei van Boom en Klei van Ieper) en Nederland (Klei van Boom) de enige landen zijn die enkel weinig verharde (plastische) klei beschouwen als gastgesteente. Daarnaast beschouwen een aantal landen zoals Frankrijk, Zwitserland en Duitsland berging in een verharde klei. Dit is een mogelijkheid die ook in België bestaat en die ons inziens (sic) verder bestudeerd dient te worden om aldus meer opties open te houden. De optie verharde klei (in België "schiste") kan toelaten om een geologische berging te ontwikkelen in een dieper gastgesteente dat niet direct in contact staat met grondwaterlagen, of er een grotere afstand tot heeft dan in het geval van weinig verharde klei. Voor de veiligheidsautoriteit zijn dit belangrijke elementen die de lange termijn veiligheid van een berging mee bepalen. »³²⁴ (AFCN, 2016)*

Pour y répondre et, le cas échéant, défendre son premier choix, l'ONDRAF devrait donc opposer ce qu'il connaît bien (BC ou YC) à ce qu'il connaît peu (ARG). Formalisons avec, pour rappel, une règle d'ordonnancement basée sur la connaissance et une règle de préférences basée sur la sûreté.

- Avec une règle d'ordonnancement O, opposant l'option la plus connue à l'option la moins connue, appliquée à l'ensemble {BC, YC, ARG}, on obtient le sous-ensemble {BC, ARG}. Si on applique ensuite une règle de

³²⁴ « Ceci montre que la Belgique (Argile de Boom et argile yprésienne) et les Pays-Bas (Argile de Boom) sont les seuls pays qui ne considèrent que les argiles peu indurées (plastiques) comme roche hôte. En outre, plusieurs autres pays tels que la France, la Suisse et l'Allemagne considèrent un stockage dans une argile indurée. C'est une possibilité qui existe également en Belgique et qui, de notre point de vue, mériterait d'être davantage étudiée afin de disposer de plusieurs options. L'option argile indurée (en Belgique « schiste ») peut permettre de développer un stockage géologique dans une roche hôte plus profonde qui ne serait pas directement en contact avec les aquifères, ou qui en serait plus éloignée que dans le cas de l'argile peu indurée. Pour une autorité de sûreté, il s'agit d'éléments importants qui peuvent être déterminants pour la sûreté à long terme. » (Nous traduisons)

préférence $YC \succsim BC \succsim ARG$ à ce résultat, nous obtenons BC. Or, cette règle de préférence appliquée sur le sous-ensemble des argiles peu indurées $\{BC, YC\}$ aurait conduit au résultat YC. En appliquant une règle d'ordonnancement préalable, tout se passe comme si l'adjonction d'une troisième option « ARG » modifiait la préférence relative entre BC et YC et violait ainsi l'axiome d'indépendance. C'est un artefact puisque la préférence n'a sans doute pas été réellement modifiée mais tout se passe pourtant comme si c'était le cas et, par conséquent, cela conduit à une décision non rationnelle. Ce qui se cache derrière cette distorsion pourrait donc s'exprimer de la façon suivante : bien que nos connaissances sur YC soient un peu inférieures à celle sur BC, nous en savons suffisamment du point de vue des considérations de sûreté globales que pour préférer YC comme roche hôte pour un stockage. Mais dès lors que nous sommes contraints d'envisager également d'autres roches hôtes telles ARG, nous nous mettons soudainement à préférer BC (plutôt que YC). Pour quelle raison ? Eventuellement, parce que nous savons que cette option nous permettra de revendiquer un état de connaissances tellement supérieur qu'il viendra *ipso facto* disqualifier ARG en dénonçant son caractère spéculatif. Si telle était effectivement notre attitude, l'introduction de la troisième option ARG dans notre processus de choix conduirait à changer l'ordre de nos préférences entre BC et YC. Ce choix serait effectivement « non rationnel »³²⁵ du point de vue strict des qualités intrinsèques (supposées) des différentes options.

- De façon similaire au point précédent, c'est-à-dire en obtenant le sous-ensemble $\{BC, ARG\}$ après avoir appliqué la règle d'ordonnancement mais cette fois en suivant ensuite la règle de préférence $ARG \succsim BC \succsim YC$, nous obtiendrions ARG. Appliquée au sous-ensemble des argiles peu indurées $\{BC, YC\}$, la règle de préférence conduirait au résultat BC. La préférence des éléments du sous-ensemble $\{BC, YC\}$ n'étant pas modifiée par l'ajout de ARG dans l'ensemble principal, la décision demeure

³²⁵ Bien qu'il ne soit pas dépourvu de toute rationalité... S'il y a bien une incohérence qui viole l'axiome d'indépendance, cette attitude peut néanmoins relever d'un raisonnement d'un autre type, comme un raisonnement stratégique ou politique, par exemple. Nous reviendrons sur cette éventualité dans la section consacrée à la rationalité ordinaire (voir section 10.5.3.).

incontestablement rationnelle puisque l'axiome d'indépendance est respecté.

- Avec une règle de préférence $ARG \succsim YC \succsim BC$ dans la même configuration, nous obtiendrions à nouveau ARG. Sur le sous-ensemble des argiles peu indurées {BC, YC}, la règle de préférence conduit au résultat YC. La préférence des éléments du sous-ensemble {BC, YC} n'étant pas modifiée par l'ajout de ARG, la décision demeure incontestablement rationnelle puisque l'axiome d'indépendance est respecté.
- Avec une règle de préférence $BC \succsim YC \succsim ARG$ dans la même configuration, on obtient BC. Sur le sous-ensemble des argiles peu indurées {BC, YC}, la règle de préférence conduit au résultat BC. Il s'agit ici à nouveau d'une décision rationnelle puisque l'axiome d'indépendance est respecté.

Puisque le niveau de connaissances de YC est essentiellement obtenu par transposabilité des connaissances sur BC, examinons le cas particulier où le niveau de connaissance de YC est similaire à celui de ARG, $BC > YC$ et $BC > ARG$ avec une égalité entre YC et ARG, soit avec une notation abrégée $BC > (YC = ARG)$. Une règle de *bris d'égalité* doit être appliquée (*tie-breaking rule*). Cette règle pourrait être l'utilisation de l'analogie afin d'économiser les ressources de recherche. Il pourrait tantôt s'agir d'établir la transposabilité³²⁶ des connaissances acquises pour l'argile de Boom à l'argile yprésienne – méthodologie déjà utilisée par l'ONDRAF (Van Baelen *et al.*, 2012 ; ONDRAF, 2013) – ou d'utiliser, comme analogue à certains ARG, les argiles indurées de Suisse ou de France (Sintubin *et al.*, 2017 ; ONDRAF, 2017b).

Comme ces deux méthodes pourraient être jugées de valeur équivalente, leur application pourrait encore nécessiter l'application d'une règle de bris d'égalité. Un critère de territorialité nationale pourrait certainement être appliqué et viserait à privilégier un analogue géologique provenant du même pays par rapport à un analogue étranger. Ce critère serait, par exemple,

³²⁶ Il s'agit de l'application des données scientifiques acquises sur une formation hôte dans le cadre d'évaluation de sûreté effectuées pour d'autres formations jugées similaires. Il s'agit d'un cas particulier de la transférabilité qui procède à l'application des données acquises dans une zone particulière de la formation hôte à une autre zone de la même formation (ONDRAF, 2009b).

fondé sur la possibilité de renforcer la pertinence de l'utilisation d'un analogue avec des recherches de caractérisation *in situ*, fussent-elles réduites (Van Marcke and Laenen, 2005).

Remarquons que dans le premier cas évoqué plus haut qui avait conduit à changer la préférence relative de BC et YC, c'était précisément ce que nous cherchions à éviter. Eviter que le caractère légèrement spéculatif de YC lié à un état de connaissances obtenu principalement par transposabilité puisse être assimilé au caractère plus fortement spéculatif de ARG pour lequel le niveau de connaissances est significativement plus bas. Afin d'éviter toute discussion sur l'appréciation quantitative de la part spéculative de l'une ou l'autre option, il aurait pu être décidé de couper court à toute polémique en opposant la « certitude » à la « spéculation ». Bien que le non-respect de l'axiome d'indépendance dans ce cas nous amène à penser que ce choix aurait été non rationnel, force est de reconnaître qu'il recourt en réalité à un autre niveau de raisonnement, un choix en opportunité qui se substitue au choix uniquement basé sur les qualités intrinsèques des solutions à l'examen.

Résumons. Nous cherchons à comprendre dans quel cas il pourrait avoir une éventuelle distorsion dans l'exercice du choix. Nous avons vu qu'en fonction de la règle de préférence qui serait d'application, le screening préalable pourrait mener à une décision en apparence non rationnelle. En effet, après application de la règle d'ordonnancement fondée sur la connaissance acquise et privilégiant le plus connu au moins connu : $BC > YC > ARG$, le résultat du screening donne $\{BC, ARG\}$. En considérant les règles de préférence successives,

- $YC \succeq BC \succeq ARG$,
- $ARG \succeq BC \succeq YC$,
- $ARG \succeq YC \succeq BC$,
- $BC \succeq YC \succeq ARG$,

nous obtenons respectivement comme résultats : BC ; ARG ; ARG et BC. Les mêmes règles de préférence appliquées à l'ensemble de départ $\{BC, YC\}$ auraient donné respectivement : YC ; BC ; YC et BC.

Le premier cas oppose BC et YC dénotant une violation de l'axiome d'indépendance puisque l'élargissement de l'ensemble {BC, YC} avec l'élément ARG, donnant {BC, YC, ARG}, change la préférence relative de BC et YC dans le choix final. Le deuxième cas ne change pas les préférences de l'ensemble initial même si l'application du screening change le choix final, il en va de même du troisième cas. Enfin le quatrième cas conduit à un choix identique en raison d'une règle de préférence équipollente à celle de l'ordonnement. Seul le premier cas conduit donc à une déviation du choix par rapport au paradigme de rationalité.

La question qui s'ensuit pourrait sembler éristique³²⁷ mais elle nous semble pourtant fondamentale. Dans l'opposition entre l'AFCN et l'ONDRAF, à quoi avons-nous affaire ? A une différence de rationalité ou à une distorsion du choix rationnel ? En d'autres termes, est-ce que l'AFCN cherche à éviter un biais dans la prise de décision dans le chef de l'ONDRAF qui, s'il n'était pas levé, rendrait la défense de la solution choisie difficile face à la société civile et aux (autres) autorités ? Ou est-ce que l'AFCN entend plutôt une évaluation stricte et rigoureuse de toutes les options contenues dans ARG par rapport à YC et BC, de manière à garantir la meilleure solution parmi toutes les options possibles ?

Dans le premier cas, il s'agirait de considérer ARG, même si le gain de sûreté éventuel ne serait que minime voire inexistant, en vue de garantir la qualité de l'évaluation entreprise par l'ONDRAF et l'acceptabilité future de l'option choisie. L'AFCN viserait à garantir la prise de décision rationnelle tout en souscrivant à la recherche d'un *satisficing*, et son rôle se limiterait à veiller simplement à la qualité du processus mis à l'œuvre, en prévenant une possible distorsion du jugement. Dans le second cas, l'AFCN est bien à la recherche d'un optimum global, représentatif d'une rationalité substantive, et remet fondamentalement en question le processus mis à l'œuvre par l'ONDRAF. En d'autres termes, soit l'AFCN est convaincue par la solution proposée par l'ONDRAF mais veille à la qualité de la démonstration, soit elle n'est pas convaincue par cette solution et questionne la construction même de cette solution.

³²⁷ Dans son sens péjoratif assumé (art de la dispute et du débat).

Autrement dit, dans le premier cas, il y a bien une rationalité procédurale partagée par les deux institutions mais un différend sur la consommation des ressources pour asseoir le résultat escompté ; dans le second, il y aurait bien une différence de rationalités fondamentale.

Notons que, même s'il existe une différence de rationalités, il reste à savoir si la meilleure solution est trouvable, au sens proprement épistémologique. La quête de « la meilleure roche » pourrait, à l'instar du problème du voyageur de commerce qui connaît une explosion combinatoire des options à envisager, n'avoir comme solution parfaite qu'une solution à jamais inconnue.

En outre, il y a fort à parier que la recherche d'un optimum classique, au sens de la rationalité substantive, requiert tellement de simplifications dans l'évaluation qu'elle ne vaille pas substantiellement mieux que la recherche directe d'une solution satisfaisante. Car en effet, dans l'impossibilité de résoudre de tels problèmes de façon optimale, il n'y a pas de bon résultat qui permette « *d'évaluer de manière universelle la qualité extrinsèque d'un raisonnement* » (Le Moigne, 1994), comme nous le mentionnions déjà précédemment (voir section 9.5) en concluant que la rationalité procédurale n'est pas une sous-rationalité.

Cette réflexion doit nous mener au-delà de l'épistémologie seule. Dans quelle mesure n'est-il pas du rôle d'une agence de contrôle de sûreté d'exiger d'emblée l'impossible, quitte à se raviser ensuite devant la résistance du réel ? N'est-ce pas d'ailleurs ce que l'AFCN reconnaît elle-même lorsqu'elle écrit dans son avis sur le Plan Déchets :

« L'AFCN estime préférable de continuer la recherche visant à confirmer le caractère approprié de l'argile de Boom, compte tenu du fait que l'étude parallèle d'autres formations hôtes potentielles n'aboutira pas nécessairement à un résultat fondamentalement meilleur. » (AFCN, 2011a)

Y a-t-il une idéologie, une morale ou une éthique qui conditionne la recherche de la solution substantive en matière de sûreté ? Nous aborderons cette question dans la section 10.6.

Avant de conclure cette section, il nous faut cependant encore approfondir un peu les raisons du différend entre l'AFCN et l'ONDRAF, en recadrant légèrement la question des « circonstances existantes ».

Si la limitation de la connaissance sur certaines roches hôtes potentielles s'explique par le parcours historique du programme de R&D de la Belgique mené jusqu'ici, elle ne peut constituer une circonstance existante au sens de l'AFCN, bien que constituant un incontestable *déjà là*. Ce qu'il faut sans doute comprendre dans ce refus de l'autorité de sûreté est que la limite de la connaissance soit considérée, par l'ONDRAF, comme une limite indépassable du problème soumis à l'examen. En effet, la connaissance peut s'accroître et fournir une solution non envisagée d'emblée. Ce qui est à l'œuvre ici, c'est l'état de la connaissance disponible au moment de prendre une décision sur le choix de la roche hôte. La limite ou la condition aux limites de l'exercice ne tient pas dans l'état de la connaissance que l'AFCN veut envisager comme une variable du problème mais bien dans la contrainte socio-économique qui imposerait une prise de décision à un moment précis. Au moment considéré, il y aurait une décision prise sur un état de connaissance mais ce n'est pas ce dernier qui peut dicter arbitrairement le moment de la décision ni la solution. Si le manque d'information ne peut servir à excuser l'exclusion de certaines roches hôtes, l'accroissement de la connaissance afin de prendre la décision la plus avisée au moment opportun constitue bien un débours à charge des aspects socio-économiques. C'est cette perspective que nous avons défendue très tôt, lors de précédents travaux, afin de sortir de l'impasse de ce qui pouvait ou non être assigné à des circonstances existantes. Ainsi, nous avons proposé de reporter les efforts de R&D dans la partie « coûts » de l'optimisation plutôt que comme condition aux limites (Depaus, 2017b ; Depaus et Capouet, 2013) :

« Il semblerait que l'AFCN puisse comprendre les raisons qu'a l'ONDRAF de préférer les argiles peu indurées à d'autres roches (schistes) mais qu'elle ne peut souscrire à la seule justification de la « connaissance acquise » d'un côté et au défaut de connaissance de l'autre (argument souvent avancé oralement, lors des réunions d'interaction). Même si ce critère peut intervenir dans une approche générale de type « coûts-bénéfices » (quel effort de caractérisation pour quel gain de protection escompté ?), il ne peut intervenir seul et une comparaison de certaines propriétés de base devrait venir étayer

l'argumentaire (ex : propriétés pétrographiques, self-sealing, etc.) (...).

En d'autres termes, l'argument « historique » des « 30 ans de recherche et d'expérience » ne constitue pas un argument en soi, pour privilégier telle ou telle option. Ce passé devrait être revisité dans la perspective méthodologique actuelle (optimisation) en vue de confirmer les choix faits jusqu'ici. » (Depaus et Capouet, 2013)

Ce léger recadrage consistant à ouvrir le débat sur ce qui peut ou doit être considéré comme circonstance existante – débat duquel il n'aurait pas été possible de sortir sinon, sans un argument d'autorité – permet de procéder à une évaluation du coût sociétal de cette connaissance à bâtir, en vue d'égaliser le niveau d'informations relatives aux différentes roches potentielles. Il découple le *déjà là* du concept de « circonstance existante » en tant que condition aux limites. Certes, les circonstances existantes constituent un *déjà là* mais la réciproque n'est pas vraie. La discussion qui paraît, ici aussi, relever de la ratiocination de prime abord s'ouvre en fait sur une réflexion éthique autour des limites de l'acceptabilité d'un débours sociétal en regard d'une promesse de meilleure solution (Kermisch et Depaus, 2020).

10.2.5 La note de convergence sur l'optimisation

La note de convergence sur l'optimisation (AFCN, 2013b) est le résultat d'intenses interactions entre l'ONDRAF et l'AFCN sur l'interprétation du principe d'optimisation et sur ses conséquences pratiques pour les deux institutions, tant dans le développement de la solution de stockage pour l'ONDRAF que dans l'évaluation formelle de celle-ci pour l'AFCN. La note s'appuie largement sur les travaux de la CIPR et, en particulier, sur la publication 122 de la CIPR (ICRP, 2013) portant sur les stockages géologiques qui venait juste de paraître.

Plusieurs observations s'imposent. Parmi elles, le fait qu'aucune distinction n'est faite entre protection et sûreté et la note, qui se réfère à la

publication 103 de la CIPR (ICRP, 2007), renvoie l'optimisation de l'une à la maximisation de l'autre :

« L'optimisation de la protection radiologique nécessite la préoccupation permanente que le meilleur a été réalisé pour la sûreté compte tenu des 'circonstances existantes', et que tout ce qui était raisonnable d'entreprendre a bien été mis en œuvre. » (AFCN, 2013b)

Une deuxième observation est que la note reconnaît le déploiement du principe d'optimisation dès la sélection de la roche hôte et jusqu'à la levée du contrôle réglementaire, c'est-à-dire la fin de la phase de contrôle institutionnelle au moment où le système de stockage est rendu totalement passif. Les auteurs évitent ainsi l'écueil de l'objet de l'optimisation : l'optimisation s'applique dès la sélection de la roche mais s'applique-t-elle sur le choix de celle-ci ? La note ne fournira pas la réponse.

Le principe d'optimisation suit une approche coûts-bénéfices conformément aux prescrits de la publication 103 de la CIPR (ICRP, 2007) tout en précisant que, tant dans les coûts que dans les bénéfices, l'acception monétaire doit être évidemment dépassée³²⁸ et que les ressources humaines et le temps doivent entrer dans l'équation de la protection. Même s'il n'existe pas de dose minimum en deçà de laquelle l'optimisation devrait s'arrêter, conformément à la publication 103 de la CIPR (ICRP, 2007, §218), l'optimum pourra « être considéré comme atteint lorsque le gain de protection devient minime en regard des moyens (financiers, humains, ...) mis en œuvre » (AFCN, 2013b). La notion d'attribut (de sûreté) revient régulièrement dans la note sans qu'une définition claire n'en soit donnée et une ambiguïté au sein de la CIPR³²⁹ concernant la distinction entre la notion d'attribut et celle de circonstance existante est soulevée :

« L'approche nécessite la définition d'attributs permettant de juger du gain de protection associé à une option. Un exemple de liste non exhaustive d'attributs pouvant intervenir dans l'analyse coûts-bénéfices est fourni dans l'ICRP-101 (Optimisation of Radiological

³²⁸ C'est-à-dire la notion de man-sievert

³²⁹ Rappelons que la notion de « circonstance existante » de l'AFCN correspond à celle de « prevailing circumstances » dans la publication 101 de la CIPR (ICRP, 2006). Toutefois, ni l'attribut ni les circonstances existantes ne sont définies par la CIPR.

*Protection : Broadening the process, table 3.1). Ces attributs illustrent les différentes composantes à évaluer dans le bénéfice général de la protection, en tenant compte que ceux relatifs à la dose concernent davantage la protection radiologique à court terme. **L'exemple doit cependant être considéré avec prudence dans la mesure où des circonstances existantes sont incorrectement considérées comme attributs.** » (AFCN, 2013b, nous soulignons)*

La distinction entre l'attribut et la circonstance existante n'est pas discutée et relève, *in fine*, d'une décision prise en amont sur ce qui entrera ou pas dans l'optimisation proprement dite. Comme la connaissance géologique relève de la compétence technique, elle ne pourra pas être considérée comme « circonstance existante » par l'AFCN. L'ONDRAF n'aura pas d'autre choix que de se plier à cette lecture malgré la part d'arbitraire de cette interprétation.

Face à l'angoisse exprimée par l'ONDRAF de la difficulté sinon de l'impossibilité pratique d'établir un niveau de connaissance équivalent pour toute formation géologique envisageable, une précision est ajoutée :

« Considérer des options alternatives n'implique pas nécessairement que le même niveau de R&D doive être mené de front pour chacune de ces options. L'effort de R&D peut en effet se concentrer sur l'option considérée comme 'optimale'. » (AFCN, 2013b)

La concession ainsi accordée prend toutefois une tonalité douce-amère puisque les efforts pourront se concentrer sur la solution optimale, c'est-à-dire une fois que celle-ci aura été identifiée... Mais sur quelle base ? Sur une base de connaissances permettant une comparaison non biaisée. L'AFCN concède qu'une fois la solution optimale trouvée, les efforts de caractérisation des solutions laissées-pour-compte peuvent se réduire !

Se créditant de la publication 122 de la CIPR (ICRP, 2013, §74), les circonstances existantes sont plurielles. On y reconnaît en tête les contraintes socio-économiques évoquées précédemment par l'AFCN, c'est-à-dire les considérations sociétales locales (sous réserve qu'elles n'empiètent pas sur la sûreté), les contraintes budgétaires mais aussi les contraintes réglementaires nationale et internationale, ou encore l'état de l'art, reconnaissant la part irréductible d'incertitudes liée à la connaissance

humaine à un moment de son histoire. Une brèche est ainsi ouverte puisque l'état de la connaissance peut faire partie des circonstances existantes. Toutefois, elle se distingue de l'état de la connaissance attaché à un programme de R&D particulier. L'état de l'art, point ajouté par l'ONDRAF³³⁰, ne fait référence qu'à ce qu'il est possible de connaître à un moment donné et non à ce qui pourrait l'être si les efforts suffisants étaient déployés. Cette ambivalence de l'état de la connaissance rappelle la distinction entre d'une part, la nature ontique des incertitudes au sens de Knol (Knol *et al.*, 2010) et d'autre part, la nature épistémique de celles-ci, part d'incertitude en principe réductible par la recherche³³¹ (NEA, 2020 ; Bolado *et al.*, 2009). En ajoutant l'état de l'art à la liste des circonstances existantes, le lecteur a davantage l'impression de lire l'expression d'une réserve d'usage – à l'impossible nul n'est tenu – qu'un véritable engagement à considérer l'état effectif de la connaissance à un moment donné d'un programme de recherche particulier. L'emphasis des auteurs est d'ailleurs mise sur la nécessité de rapporter de façon transparente les demandes diverses des preneurs d'enjeu, soulignant derechef l'acception principale des circonstances existantes entendue par eux, à savoir les facteurs socio-politico-économiques :

« Les contraintes associées aux 'circonstances existantes' doivent être identifiées et leurs implications sur la sûreté évaluées.

La variété des demandes émanant des stakeholders peut être à l'origine de circonstances existantes très diverses. Il est donc important qu'elles soient identifiées de manière transparente vis-à-vis des différents stakeholders (ICRP122 – 74)³³² (sic.). » (AFCN, 2013b)

La note de convergence traite spécifiquement l'articulation entre l'application du principe d'optimisation et l'évolution des circonstances existantes. Cette articulation révèle la tension existant entre le fait que

³³⁰ Nous sommes parmi les auteurs de la note de convergence et en avons tracé l'évolution.

³³¹ Bolado, Bandea et Poole sont cependant plus prudents dans leur affirmation. Si l'incertitude ne peut être réduite, une fonction de densité de probabilité (subjective) sera utilisée en vue de la borner. Habituellement cependant, les incertitudes épistémiques sont considérées comme réductibles pour peu qu'on y mette les moyens financiers et humains. De notre expérience, l'incertitude véritablement irréductible en raison de sa nature ontologique est peu abordée dans les programmes scientifiques internationaux.

³³² Publication 122 de la CIPR (ICRP, 2013, §74) cité dans (AFCN, 2013b).

l'optimisation reste un « *forward-looking process* » tel que le définit la publication 103 de la CIPR (ICRP, 2007) et la nécessité de revisiter des décisions antérieures si un réel besoin s'en faisait sentir. Pour l'ONDRAF, l'éventualité d'un retour en arrière dans le processus décisionnel crée une instabilité qui pourrait être ingérable en pratique. L'ONDRAF se retrouve en effet comme un bâtisseur de cathédrales mais à une époque où les changements de société se sont considérablement accélérés. L'idée de voir son ouvrage remis en question à chaque changement de circonstances existantes rend le processus *a priori* extrêmement précaire. Pour l'AFCN, l'éventuel retour à un point de décision antérieur est une conséquence naturelle de l'application du principe d'optimisation qui se lie avec la notion de flexibilité :

*« The optimisation process has to be seen as an intrinsic part of a step-wise decision-making process leading to a licence application and, in the end, to the implementation of an optimal option (...) This means that over time, decisions may be overruled and the process reversed for one or more steps if enough evidence is provided to do so. The capability and the willingness to re-assess earlier decisions and the ability to reverse the course of action or decision to a previous stage are called 'flexibility'. (...) This reversal in process step(s) may be of different origin: it may be purely political, societal or economical, technical or environmental (e.g. political decision, significant evolution of 'costs' associated to options, ...) or it might be related to the safety (e.g. **option offering a higher level of protection**, observation of a non-conformity observed during or after emplacement, ...). »* (AFCN, 2013c, annexe 1, **nous soulignons**)

Cette interprétation maximisante du principe d'optimisation a suscité tellement de désaccords qu'elle a dû être retirée du texte final de la note de convergence :

« Une proposition de texte (annexe 1) rédigée par l'AFCN a été soumise à l'ONDRAF. Cette proposition reprend notamment les réflexions de l'AFCN présentées à la conférence de Reims 2010 [2]. L'ONDRAF marque un désaccord sur plusieurs points du texte (voir annexe 1). L'ONDRAF propose de sortir la section sur la flexibilité de la première version de la note étant donné qu'il sera difficile de

trouver un consensus sur l'ensemble des points évoqués dans les mois qui suivent. » (AFCN, 2013c).

Les objections de l'ONDRAF, formulées dans la marge de la proposition se résument essentiellement aux considérations suivantes :

« Flexibility is broader than that. Flexibility can cover change of directions while the action is on-going. IAEA, SSG-14 defines the flexibility as an ability provided by the step by step process so that the programme can be adapted in response to new technical information. The step by step process facilitates the consideration of reversibility in the development of a disposal facility and, at each step, enables a decision to be made on proceeding to the next step, to wait for additional information before making a decision, or to reverse a decision. To reverse an action is therefore a very particular case among others » (...)

« Attention, if the directive 2009/71 enhances a continuous improvement of the safety, the directive 2011/70 sets out “only” a high level of safety is achieved, there is no obligation to still improve it and even less to reverse the action. » (AFCN, 2013c, annexe 1)

L'ONDRAF fait donc observer que la flexibilité d'un processus décisionnel ne se résume pas au seul retour en arrière qui implique le passage vers les mêmes points de décision mais recouvre plutôt la possibilité d'en créer de nouveaux. Plus important encore, l'ONDRAF s'appuie sur la directive 2011/70/Euratom (EC, 2011) pour réaffirmer le fait qu'une fois un haut niveau de sûreté atteint, il n'est pas nécessaire de remettre en question les choix du passé en vue d'améliorer le niveau de sûreté. L'ONDRAF entend ainsi d'une part, dénoncer une récupération du concept de flexibilité, qui s'applique au seul processus décisionnel pour l'interprétation du principe d'optimisation (Depaus *et al.*, 2020) et d'autre part, l'abus consistant, selon lui, à revenir sur une étape décisionnelle antérieure dès qu'il y aurait une possibilité technique d'améliorer la sûreté alors que le niveau de celle-ci est déjà élevé.

Ces discussions en coulisses de la note de convergence révèlent, selon nous, une motivation stratégique dans le chef de l'AFCN derrière sa lecture du principe d'optimisation. En effet, il y a un rapprochement évident entre le

processus décisionnel et le principe d'optimisation. Si l'AFCN a le pouvoir du dernier mot dans toute discussion touchant à l'optimisation puisque celle-ci relève de la sûreté, son rôle est nettement plus discret dans l'élaboration du processus décisionnel, comme nous le faisons précédemment remarquer (voir section 10.2.2). Alors que l'ONDRAF plaide pour un processus décisionnel par étapes, avec jalons fixés et phases formelles, l'AFCN semble vouloir garder ouvert le processus afin d'accueillir toute possible amélioration technique de la solution. Cette tension est perceptible dans l'extrait suivant de la note de convergence :

« A chaque phase formelle P_i , le caractère « optimal » de l'option/des options choisies tenant compte de l'évolution des circonstances existantes (entre P_{i-1} et P_i) est argumenté dans le safety case.

L'analyse de l'impact de l'évolution des circonstances existantes ($\Delta CE = CE_i - CE_{i-1}$) entre deux phases formelles (P_{i-1} et P_i) peut mener :

- à confirmer des décisions prises antérieurement*
- à reconsidérer des décisions prises antérieurement sans modifier les actions passées*
- à reconsidérer des décisions prises antérieurement en modifiant des actions passées*

Par action il faut entendre toute opération liée à l'implémentation du dépôt (e.g. : construction, mise en place ...).

Si, en règle générale – et ce, d'autant plus que le processus d'optimisation aura été bien mené – l'analyse de l'impact de l'évolution des circonstances existantes ne portera que sur les décisions prises entre P_{i-1} et P_i , on ne peut toutefois exclure de reconsidérer des décisions plus anciennes, relatives à des étapes antérieures à P_{i-1} si les circonstances existantes ont significativement changé (ex : processus sociétaux, progrès technique majeur...) ou si un vice rédhibitoire pour la sûreté a été découvert.

Il est à noter que par « décision » il faut entendre les jalons importants du processus de développement du système de stockage, faisant généralement l'objet d'un dialogue préalable FANC-ONDRAF. Les hypothèses de travail tels que des choix techniques, technologiques -

sans effet direct sur la sûreté- n'entrent pas ici en ligne de compte. Un choix de matériau ou de design, un choix d'un type de technologie, etc. peuvent être à tout moment ré-envisagés, indépendamment de la phase formelle dans laquelle on se trouve. Ex : une technique de scellement de puits, même envisagée lors d'une étape conceptuelle pourrait être finalement sélectionnée dans une étape ultérieure et très avancée du projet. Ce dernier exemple illustre « l'effort continu » d'optimisation. » (Depaus, et al., 2013)

La lecture de cet extrait rend explicite une volonté de baliser les remises en question de façon prudente et d'éviter de revenir sur des choix pris lors des étapes antérieures à Pi-1, à moins d'avoir d'impérieux motifs pour ce faire. Cette préoccupation provient de l'ONDRAF³³³. Toutefois, un effort continu d'optimisation doit être consenti et il porte sur un ensemble large de techniques (scellement de puits, choix de matériaux, etc.).

Nous venons de voir différentes tentatives d'assimilation du processus décisionnel – entendu au niveau de l'élaboration des politiques nationales – à l'application du principe d'optimisation. Il nous semble pertinent à présent de tenter de dresser un profil de l'AFCN au travers des différents avis remis à l'ONDRAF, en classant leurs principales caractéristiques en fonction de leur nature (i.e. épistémologique, sociologique, ...). C'est ce que nous entreprenons dans la section suivante.

10.2.6 Réflexions transversales sur les avis de l'AFCN

L'analyse des avis de l'AFCN des sections précédentes a révélé différentes tendances que nous souhaitons synthétiser ici avant d'aller plus loin. Nous épinglons les avis en fonction de leur spécificité propre, tout en gardant à l'esprit qu'ils se recouvrent largement pour les autres aspects. Nous proposons d'appeler « indices » ce qui rend spécifique chacun des avis de l'AFCN par rapport à la problématique posée, en référence au raisonnement qui, à la manière d'une enquête policière, mènerait à l'élucidation des

³³³ Ayant coordonné l'écriture de cette note, nous pouvons retracer les ajouts des uns et des autres.

raisons à l'origine de la différence de postures, y compris les différences de rationalités, entre l'ONDRAF et l'AFCN, sur la question du choix de la roche hôte.

Nous retenons de *l'avis sur le Plan Déchets* une inquiétude de l'AFCN par rapport à la complétude du dossier soumis à l'examen et, à sa suite, le côté prématuré de la décision qu'il prétend soutenir. Le premier indice est donc celui de la complétude de la connaissance avant un passage à l'acte (politique) du choix. *Ce premier indice est de nature épistémologique.*

La *note de positionnement* se démarque essentiellement par son contenu théorique, le principe d'optimisation y est mobilisé afin de fonder la légitimité de l'investigation d'autres roches hôtes que les argiles peu indurées étudiées jusqu'alors. Mais la note de positionnement est doublement remarquable car sa temporalité – un avis spontané émis en prévision de futures politiques nationales à venir – révèle une volonté d'anticipation sur un processus décisionnel régi par la loi du 3 juin 2014. En effet, la loi de transposition de la directive européenne 2011/70 (EC, 2011) ne permet pas à l'AFCN d'intervenir avant qu'une proposition de politique nationale ne soit déjà sur la table des autorités. Même si le feu vert de l'agence de sûreté sera en pratique toujours requis, c'est une crainte du *fait accompli* qui semble motiver cette proactivité du régulateur. Nous associons donc à la note de positionnement deux indices distincts, en complément de celui établi précédemment. *Le deuxième indice d'ordre épistémologique* en regard du principe d'optimisation qu'il mobilise et *le troisième indice est de nature socio-politique* par la volonté de contrôler ou moduler le processus décisionnel au nom de la sûreté.

L'avis sur le programme national pose, quant à lui, toute l'étendue de la différence existant entre la rationalité substantive à laquelle l'AFCN aurait recours pour justifier sa requête d'investigation et la rationalité procédurale mobilisée par l'ONDRAF pour justifier son choix en tant qu'hypothèse de travail. Mais cet avis pose aussi la question de la possible distorsion dans le processus de décision où, même si une rationalité procédurale était partagée par les deux institutions, une règle de préférence ou un recours à un ordonnancement préalable pourrait les séparer. Dans ce dernier cas, ce serait la rationalité elle-même qui serait l'enjeu et l'AFCN veillerait à ce que la prise de décision ne sorte pas du champ de la rationalité sous peine de

compromettre le principe de démontrabilité, en tant que principe de sûreté, et l'acceptation sociétale. Choc de rationalités ou distorsion du choix rationnel ?

L'interprétation du concept de circonstances existantes fait pencher la balance vers une lecture substantive de l'avis de l'AFCN puisque la connaissance disponible semble ne pas pouvoir servir de conditions aux limites contrairement aux contraintes socio-économiques. Cet avis connaît un prolongement dans la *note de convergence* (bien que celle-ci ait été écrite antérieurement) et l'interprétation de ce qui peut ou non constituer un *déjà là*. Il s'agirait donc plutôt d'un choc de rationalités entre l'ONDRAF et l'AFCN. Nous pensons que la perception des contraintes socio-économiques par l'AFCN soulève la question de l'expertise et du modèle selon lequel celle-ci s'exerce (i.e. technocratique, wébérien, pragmatico-politique, ...) (Feltz, 2013). Rappelons brièvement ces modèles. Le *modèle technocratique* fait entièrement reposer le pouvoir de décision dans les mains des experts au mépris éventuel des conséquences sociétales qui auraient dû s'apprécier en tenant compte de facteurs socio-économiques ou psychologiques. Le *modèle wébérien* distingue les fins et les moyens (Feltz, 2013, p. 75) et laisse la détermination des premières aux politiciens et le choix des seconds aux techniciens. Ces deux premiers modèles sont héritiers d'une conception *forte* de la science. Le modèle *pragmatico-politique*, dans la ligne de Habermas, prend une certaine distance avec le modèle wébérien (Feltz, 2013) et permet aux citoyens de se réapproprier un certain niveau de connaissances (Delmas, 2011, p. 36). Quittant le registre de la certitude scientifique, il est fait place, le cas échéant, à une démarche de précaution. Ce modèle met également en évidence l'absence de neutralité axiologique dans le déploiement de la technique et celui-ci requiert donc un contrôle démocratique donnant lieu à une « négociation continue » dont les conférences citoyennes constituent le parfait exemple (Feltz, 2013, p. 77). Le *modèle postmoderne* pousse à son paroxysme la relativisation de la notion de vérité scientifique (Delmas, 2011) et la nouvelle sociologie des sciences développée notamment par Bruno Latour ne reconnaît plus de rationalité spécifique à la science (Feltz, 2013 ; Delmas, 2011). Nous reconnaissons donc à ce stade à la fois un *quatrième indice* portant sur la rationalité elle-même et *de nature proprement épistémologique* et un *cinquième indice, d'ordre sociologique*, relevant du ou des modèle(s) d'expertise au(x)quel(s) se réfèrent l'ONDRAF et l'AFCN.

Dans l'étude de cas, objet du présent chapitre, nous nous restreindrons aux indices épistémologiques en lien avec le concept de rationalité.

Nous laissons donc, avec quelque regret, aux sociologues l'exploration des indices socio-politiques mais non sans formuler une réflexion à leur sujet. *L'avis sur le programme national* et la *note de convergence* sur l'optimisation, en particulier dans ce qui peut être ou non assigné à une circonstance existante, renvoient à un modèle particulier d'expertise. Le modèle de l'AFCN semble être de type wébérien pour ce qui concerne la sûreté, avec une distinction claire entre les *fins* politiques et les *moyens* techniques, un modèle compatible avec une conception forte de la science comme nous le précisons à l'instant. En effet, pour peu que le fin mot de la sûreté demeure l'exclusivité de l'AFCN puisque son volet technique est légalement contrôlé par elle, il peut également être plus aisé pour celle-ci d'aller à la rencontre de la société citoyenne pour le surplus (e.g. choix du site, modalités de surveillance, récupérabilité). Son adhésion à des projets internationaux à visée sociétale tel SITEX³³⁴ relève peut-être davantage d'une investigation sociologique commentant les faits que d'une implication dans la co-construction d'une assise sociétale pour un projet de stockage particulier (Dettleux *et al.*, 2021). En revanche, l'ONDRAF doit partager le développement de sa solution avec les preneurs d'enjeu réels, issus du terrain propre au projet à l'examen. Qu'il s'agisse des initiatives de politiques nationales que le gouvernement choisira ou non d'approuver ou encore des consultations sociétales accompagnant les études d'incidences environnementales (SEA), l'ONDRAF doit abandonner son exclusive. Avec les conférences citoyennes de 2010, la consultation publique de 2020 et un débat sociétal en préparation³³⁵, il abandonne le modèle wébérien des années 1980³³⁶ et progresse vers un modèle d'expertise *pragmatico-*

³³⁴ *European network of experts on radioactive waste management* involving TSOs (Technical Support Organisations), Regulators and Civil Society Experts.

³³⁵ En préparation en août 2021.

³³⁶ En 1983, l'ONDRAF publie une carte de Belgique avec tous les sites potentiels d'enfouissement des déchets, sur la base unique de données géologiques favorables. Cette carte, relayée par les médias, suscite un tollé et des protestations de rue. Bernard Feltz suppose que ce modèle peut rendre compte de situations anciennes comme la conquête spatiale (1960), les politiques énergétiques et les grands projets d'infrastructures autoroutières des années 1970 (Feltz, 2013, p. 76). Nous inscrivons les premières tentatives de choix de site de l'ONDRAF (1983) dans ce même modèle.

politique de type habermassien où l'incertitude scientifique est reconnue et la neutralité axiologique de la science abandonnée (Feltz, 2013).

Nous pouvons encore compléter cette vision des choses en utilisant la notion d'expérience dans le monde réel (*real-world experiment*) que propose Céline Parotte afin d'interpréter la gestion des déchets radioactifs et les processus décisionnels qui s'y rapportent. Il s'agit d'une expérience concrète, en vraie grandeur, confrontée aux contraintes du monde et qui n'a donc pas lieu dans un laboratoire (Parotte, 2020). Parotte distingue deux états d'esprits possibles pour l'expérimentateur : l'ouverture, que l'auteure attribue, par comparaison, au gestionnaire de déchets canadien et la fermeture qui, selon elle, pourrait expliquer les lignes de conduite, en matière de processus participatifs, des gestionnaires français (ANDRA) et belge (ONDRAF) jusqu'à présent³³⁷. Ces derniers adopteraient systématiquement une position extérieure à l'expérience en cours du processus participatif. Les résultats du processus dépassant leur contrôle apparaissent alors comme de nouveaux défis à relever et de nouveaux problèmes à surmonter. Un état d'esprit ouvert permettrait, au contraire, de se sentir acteur du processus et d'agir en vue d'en moduler le cours³³⁸. Dans le jeu d'*ouverture* et de *fermeture* en *vraie grandeur* ainsi théorisé (Parotte, 2020), nous ajouterions volontiers un acteur : l'AFCN. Alors que l'ONDRAF pourrait se montrer réticent à l'idée de prendre part à tel *programme expérimental* dont l'issue pourrait lui échapper, l'AFCN pourrait, quant à elle, reconnaître l'aspect expérimental du processus de gestion et se montrer davantage modulatrice que contrôleuse.

³³⁷ Même si, comme le reconnaît l'auteur, l'ONDRAF a bien abordé le « tournant participatif », il a tendance aujourd'hui à se refermer à nouveau (Parotte, 2020).

³³⁸ Un exemple typique de fermeture serait d'emmener dans la discussion, avec les parties prenantes, une solution préétablie, avec un design et un planning déjà décidés. Un exemple d'ouverture serait de reconnaître qu'en dehors de la phase conceptuelle, les modalités d'implantation du stockage sont toutes ouvertes et que le processus lui-même reste ouvert à toute option nouvelle (Parotte, 2020). Dans la particularisation de cet exemple où nous ajoutons volontiers l'AFCN, nous constatons, en effet, que l'ONDRAF cherche à obtenir, lors des préparatifs du débat sociétal, un accord sur sa solution de stockage géologique et se montre très réticent à débattre de toute autre question au prétexte que cela pourrait rapidement dépasser ses prérogatives. Pourtant, en refusant l'ouverture de la discussion sur l'ensemble de la thématique nucléaire, au risque de voir son propre rôle éventuellement remis en question, l'ONDRAF oriente fortement les discussions et semble chercher à influencer la réflexion.

Mais si l'AFCN prend cette liberté, c'est peut-être aussi parce qu'elle ne se sent pas menacée...

10.3 Analytique de l'optimisation : application du cadre d'analyse de la rationalité de Simon à la question du choix de la roche hôte

La sélection des éléments à considérer comme contraintes et le rejet d'autres dans le modèle rationnel du choix implique des hypothèses implicites portant d'une part, sur les variables que l'acteur rationnel contrôle et peut donc optimiser et d'autre part, sur celles qui doivent être considérées comme fixes, nous dit Simon (Simon, 1979). Une façon de sélectionner les variables à optimiser parmi celles qui doivent rester fixes est de distinguer le sujet de son environnement, ce dernier imposant ce qui doit rester fixe. Simon va au-delà de cette évidence et précise que l'environnement peut aussi résider dans la peau même du sujet. Ainsi par exemple, l'évaluation de la vitesse maximale à laquelle un organisme peut bouger dépend des contraintes physiologiques de cet organisme. Par conséquent, Simon distingue les contraintes internes et les contraintes externes qui définissent le problème de rationalité (Simon, 1979).

Dans le cas d'étude qui nous occupe, ce qui constituera ou non une circonstance existante procède de la même distinction. Le refus de l'AFCN de

considérer l'état de la connaissance comme une circonstance existante³³⁹, bien que constituant un inévitable *déjà là*, revient à récuser les contraintes internes comme définissant les contours du problème soumis à l'examen et à ne garder que ce qui appartient à l'environnement externe de celui-ci, à savoir les contraintes socio-économiques. La limitation de vitesse à la course d'un organisme dans l'exemple que nous donne Simon pourrait en effet s'apparenter à la limitation de la connaissance du sujet dans le cas qui nous occupe. Mais cette limitation de la connaissance n'est évidemment pas une limite physiologique. La connaissance de toutes les autres roches en Belgique est *a priori* accessible et son niveau limité à un moment donné est dépassable, à l'exception des quelques aspects frappés par des incertitudes

³³⁹ Il nous faut établir ici une mise en garde. Récemment, la branche technique de l'AFCN, la filiale Bel V, coordinatrice du projet UMAN consacré à la gestion des incertitudes dans le programme européen de recherche sur la gestion des déchets radioactifs (EURAD – European Joint Programme on Radioactive Waste Management) a présenté, dans ce cadre, ce qui appartenait aux circonstances existantes (*prevailing circumstances*) : l'état de la connaissance (*state of knowledge*) ; l'inventaire des déchets, les ressources disponibles, les politiques nationales, le cadre législatif et réglementaire, les « stakeholders conditions » (Lemy, 2021). Cette déclaration très générale ne doit toutefois pas surprendre et ne contredit pas l'origine de la polémique identifiée dans le cas belge et ce, pour deux raisons d'inégale importance. La plus faible d'entre elles tient dans le fait que le projet européen doit refléter un consensus des membres mais celui-ci n'empêche pas les différences nationales, à savoir que le l'AFCN ne considère pas que le peu de connaissances sur les roches autres que les argiles peu indurées, appréhendées en tant que roches hôtes potentielles, soit une limitation à imputer aux circonstances existantes. La deuxième raison, plus forte, est d'ordre épistémologique. Ce qui est sous-entendu par « *state of knowledge* » ne désigne pas nécessairement la même limitation que celle entendue dans le programme belge. Le flou profite au lecteur mais l'état de la connaissance dont il est question dans UMAN s'entend plutôt comme la limitation de celle-ci à un moment décisionnel particulier, sur un sujet donné, *étant entendu que la recherche est en cours*. Dans le cas belge en revanche, il s'agirait de décider d'arrêter la recherche sur une question donnée (le choix de la roche hôte) car on en saurait suffisamment sur une option pour rendre toute exploration d'alternatives inutile (et surtout trop coûteuse sur tous les plans) et sans garantie de trouver mieux. La distinction est donc au niveau du curseur décisionnel. L'état de la connaissance est nécessairement une limitation indéniable mais elle est éventuellement passagère et est de ce fait, une circonstance existante en tant que condition limite momentanée. Mais, tant que l'objectif fixé, quel qu'il soit et, éventuellement, au niveau d'un idéal de sûreté, n'est pas atteint, la connaissance nécessaire pour y parvenir peut être considérée comme non aboutie et requérir toujours plus de recherche. La distinction relève également de la nature de cet état de connaissances. Ignorer quelque chose parce cela n'a pas (encore) été investigué ne peut être invoqué comme « circonstance existante » entendue comme fatalité devant précipiter le processus décisionnel. En revanche, un phénomène qui résiste à la connaissance en dépit des efforts de recherche auxquels on consent, est d'une tout autre nature. C'est de cette dernière dont il est question dans UMAN.

ontiques (Knol *et al.*, 2010). Mais est-ce que cette connaissance escomptée peut se ramener à une simple collecte d'informations ? Il n'est pas certain qu'une collecte adéquate de toutes les caractéristiques pétrographiques des formations géologiques belges permette jamais d'établir une comparaison sur le plan d'une sûreté intrinsèque de toutes les roches soumises à l'examen. Est-il à jamais possible d'identifier ce que serait la *meilleure roche* sur le plan de la sûreté ? Une fois certains critères d'exclusion évidents appliqués, comment hiérarchiser les roches lauréates ?

Selon Simon, qui utilise volontiers l'exemple du maître d'échecs³⁴⁰ ou celui de la représentation du cube de Necker³⁴¹ pour décrire l'environnement, l'expérimentateur n'a pas de possibilité d'agir sur l'environnement externe et c'est l'environnement interne qui définit l'espace du problème (Simon, 1972, pp. 56-57, p. 85). En effet, l'environnement externe constitue les alentours de l'objet à l'étude – Simon parle d'artefact pour désigner cet objet – alors que l'environnement interne désigne la substance ou l'organisation de l'artefact lui-même (Simon [1969] 2004, p. 33). Dans le cas d'un avion en plein vol, l'avion est l'artefact, la production d'énergie nécessaire à son vol fait partie de l'environnement interne et les caractéristiques de l'atmosphère constituent l'environnement externe. Lorsque l'environnement interne est adapté à l'environnement externe, l'artefact peut remplir son but. L'atteinte d'un but ou d'un objectif dépend seulement de quelques caractéristiques de cet environnement externe. Heureusement, nous ne devons pas tout connaître de l'atmosphère pour faire voler un avion. Cette distinction entre environnement interne et environnement externe nous permet quelques constats. Des environnements internes assez différents mais aux buts similaires peuvent évoluer dans des environnements externes similaires. La production d'énergie (i.e. environnement interne) de l'oiseau est différente de celle de l'avion, leur environnement interne est donc différent. Ils ont un but similaire : voler. Leur environnement externe est identique, il s'agit de l'atmosphère. Simon fait un autre constat. Dans l'étude d'un système naturel

³⁴⁰ En observant un maître d'échecs sur un échiquier, on apprend quelque chose sur la structure de l'espace du problème lié au jeu d'échecs. Il s'agit de l'environnement de la tâche, c'est-à-dire de l'environnement couplé à un but, un problème ou une tâche pour lequel la motivation du sujet est supposée.

³⁴¹ Le cube de Necker est un cube dessiné sur une feuille : soit on le voit en deux dimensions, soit en trois. L'expérimentateur, pas plus que le sujet n'a accès à l'environnement externe.

ou artificiel, il est possible, au départ de son but et de quelques caractéristiques de l'environnement externe, de prédire son comportement en formulant des hypothèses minimales sur son environnement interne (Simon [1969] 2004, p. 36). Pour Simon, c'est l'économie qui fournit les exemples le plus représentatifs. En effet, il appartient à la rationalité de répartir ce qui est rare et c'est aussi l'objet d'étude principal de l'économie. L'environnement externe est représenté par le comportement des autres : autres acteurs, autres marchés, autres économies. Cela donne les courbes de coûts et de revenus. L'environnement interne est défini, dans ce contexte, par le but poursuivi des acteurs et par leur capacité à adapter leur comportement. Pour un acteur économique, il s'agira de maximiser la différence entre recettes et dépenses. Il y a donc interaction entre milieu interne et milieu externe et le « *processus d'ajustement d'un système intelligent à son environnement externe (rationalité substantive) est limité par sa capacité cognitive et computationnelle à élaborer des comportements adaptatifs appropriés (sa rationalité procédurale)* » (Simon [1969] 2004, p. 62). En d'autres termes, au sein de l'environnement lui-même, c'est-à-dire la chose en soi kantienne « *Ding an sich* », il faut distinguer d'une part, la représentation interne de l'environnement de la tâche par le sujet (ce qui définit l'espace du problème) et d'autre part, la description objective théorique de cet environnement (Simon, 1972). Nous comprenons, de cette explication kantienne donnée par Simon, que de l'environnement nouménal, nous n'avons que deux approches phénoménales qui nous disent quelque chose de cet environnement : l'environnement externe dont nous pouvons appréhender quelques propriétés utiles à notre propos (e.g. les caractéristiques atmosphériques pour le vol de l'avion) et l'environnement interne de l'artefact (e.g. la production d'énergie permettant à l'avion de voler). Pour Simon, la séparation entre environnement interne et externe, l'« interface » (Simon [1969] 2004, p. 33) est comme la peau du dirigeant d'entreprise. A l'extérieur de lui, il y a son usine qui appartient à l'environnement externe et dont il ne peut dégager que quelques propriétés alors que son cerveau, aidé éventuellement par des ordinateurs, appartient à l'environnement interne (Simon [1969] 2004, p. 398).

La logique des méthodes d'optimisation peut se présenter en termes de jonction entre l'environnement interne et l'environnement externe de la façon suivante : l'environnement interne du problème de conception (un

stockage géologique dans le cas qui nous occupe) est caractérisé par une série de variables définissant les domaines à considérer. L'environnement externe est constitué de certains paramètres connus avec certitude ou appréhendés par des fonctions de distribution de probabilités. Les buts de l'adaptation de l'environnement interne à l'environnement externe sont définis par une fonction d'utilité. Cette fonction est parfois complétée par des contraintes liant les variables et certains paramètres de l'environnement (par exemple sous la forme d'inéquations). Le problème de l'optimisation est un problème de recherche d'un ensemble admissible de valeurs à donner aux variables et qui, compatible avec les contraintes, maximise la fonction d'utilité pour des valeurs données des paramètres décrivant l'environnement (Simon [1969] 2004).

Afin de bien comprendre l'articulation de ces différents éléments, Simon nous invite à considérer des exemples simples comme celui du régime alimentaire. Dans cet exemple, une liste d'aliments est donnée *in extenso* et les variables sont les quantités consommées de chacun d'eux dans le régime. Les *paramètres* de l'environnement sont le prix des aliments mais aussi leurs valeurs nutritionnelles en apport énergétique, en vitamines et minéraux. La fonction d'utilité peut être le prix du régime. On peut y ajouter des *contraintes* comme, par exemple, celle de ne pas dépasser 2000 calories par jour si on est une femme sédentaire ou encore celle de contenir un minimum de vitamines et minéraux par semaine, etc. Le problème d'optimisation revient donc à sélectionner les quantités de chacun des aliments telles qu'elles satisfassent aux exigences nutritionnelles, au coût le plus bas (minimisation de la fonction d'utilité), compte tenu des prix du marché. Ce problème diététique s'exprime donc de façon logico-mathématique en considérant les quantités des divers aliments comme étant les variables (les « moyens »), le prix et les valeurs nutritives comme étant les paramètres (les « lois ») et les exigences nutritionnelles comme les contraintes (les « fins ») et le coût final comme la fonction d'utilité. Les *contraintes* constituent l'*environnement interne* alors que les *paramètres* constituent l'*environnement externe* (Simon [1969] 2004).

L'application du principe d'optimisation au choix de la roche hôte est un problème qui présente une anatomie similaire à celle du régime alimentaire avec, cependant, une différence de vue entre l'AFCN et l'ONDRAF, différence

d'autant plus marquée que pour ce dernier, l'optimisation de la roche hôte est un problème mal posé³⁴².

Pour l'AFCN, la fonction d'utilité serait la sûreté à long terme du stockage géologique et celle-ci doit être maximisée. L'environnement externe est constitué des circonstances existantes identifiées globalement comme des contraintes socio-politico-économiques (AFCN, 2013b ; AFCN, 2015a) et que nous nommerons paramètres socio-économiques en adoptant la terminologie de Simon, c'est-à-dire les lois auxquelles il faut se soumettre. Dans ce contexte, un changement de paramètres est, par exemple, un changement du cadre législatif. L'élaboration d'une solution pouvant devenir passive à long terme est un élément du cadre législatif et constitue par conséquent un paramètre. Parmi les contraintes qui définissent l'environnement interne, citons la territorialité belge (car elle n'est pas légalement obligatoire) : la solution passive peut, par défaut³⁴³, être postulée comme déployée sur le territoire belge. En pratique, il s'agit donc d'un stockage géologique dans une roche hôte en Belgique. Cette contrainte de territorialité est aussi la condition nécessaire d'existence de l'AFCN comme unique régulateur dans la problématique soumise à l'examen. Dans le cas d'une solution de type « stockage partagé », c'est-à-dire un stockage situé dans un pays étranger ou sur le territoire national mais accueillant les déchets d'un ou plusieurs pays, l'AFCN devrait partager elle aussi sa fonction d'autorité de sûreté avec celle du pays d'accueil ou d'expédition. Il s'agit donc d'une contrainte extrêmement minimale pour l'AFCN puisqu'elle se réduit à sa condition d'existence. La variable est le choix de la roche hôte. Notons immédiatement qu'il s'agit de la variable d'intérêt dans le problème qui nous occupe. Si la fonction d'utilité de l'AFCN demeure identique tout au long du processus de développement de la solution – à savoir la maximisation de la sûreté –, les variables d'intérêt varient nécessairement en fonction de leur pertinence pour la sûreté : compartimentalisation du stockage, nombre de puits d'accès, etc.

³⁴² Au sens du mathématicien J.S. Hadamard (voir section 10.4.6) puisque l'unicité de la solution est remise en question par l'ONDRAF.

³⁴³ En l'absence de politique nationale.

Avant d'analyser la position de l'ONDRAF par rapport à ce problème d'optimisation, il est utile de regarder ce qu'il représente d'abord pour les producteurs d'énergie et de déchets qui financent la solution de gestion selon le principe du pollueur-payeur. Le contraste est éloquent. La fonction d'utilité est le coût qu'il faut minimiser. L'environnement externe (les paramètres) se limite au cadre législatif³⁴⁴ tandis que l'environnement interne, à savoir les contraintes du problème, sont la sûreté dont découlent les critères d'acceptation des déchets, ce qui signifie leur admissibilité au stockage. Les producteurs ayant financé un programme de R&D depuis une quarantaine d'années considèrent les acquis de celui-ci comme autant d'éléments permettant la réduction avisée des coûts en tenant compte des incertitudes résiduelles. Le programme de R&D relatif au stockage constitue donc, pour les producteurs, l'environnement de la tâche comme le serait l'échiquier pour le joueur (Simon, 1972). Il s'agit de l'environnement interne et donc d'une contrainte.

Les variables du problème sont celles qui sont discutées au cours de l'exercice dit de « *costing* », consistant à chiffrer monétairement toutes les composantes du futur stockage, à savoir la profondeur d'enfouissement, le nombre de galeries de stockage, leur longueur, le nombre de puits d'accès, etc. Nous reprendrons l'ensemble de ces variables sous le vocable technique qui le désigne en anglais : le « *layout* ».

Pour l'ONDRAF, c'est un niveau d'aspiration qui serait défini et non une fonction d'utilité. Ce niveau d'aspiration est exprimé en termes de sûreté, celle-ci devant satisfaire différents critères donnés par la réglementation nationale et internationale définissant notamment des contraintes et limites de doses pour toute une série de scénarios d'évolution envisagés. Il s'agit donc de garantir un niveau de sûreté à long terme. Si celle-ci peut être améliorée, elle le sera mais ce sera la conséquence d'une diminution de l'incertitude ou via un moyen de contenir celle-ci par un choix de design, par exemple. Les paramètres ou circonstances existantes sont celles identifiées pour l'AFCN que nous styliserons à nouveau ici, en les réduisant par facilité,

³⁴⁴ Que nous assimilons ici aussi aux paramètres socio-économiques afin de reprendre la terminologie de Simon.

au cadre législatif³⁴⁵. Les contraintes ou environnement interne sont également, comme pour les producteurs, constitués par les résultats du programme de R&D sur lesquels l'ONDRAF s'appuie constamment puisqu'il vise à les affiner itérativement. Ces contraintes de l'environnement interne pour l'ONDRAF sont compatibles avec (en réalité incluses dans) celles très larges de l'AFCN. Ce que l'ONDRAF cherche à faire en affinant son programme, c'est bien réduire l'incertitude et c'est donc bien cette dernière qui constitue la « variable de commande » de l'ONDRAF, au sens où l'entend Simon (Simon [1969] 2004).

Le tableau 10-1 ci-dessous donne une vision synoptique de ces enjeux pour les différents acteurs.

Tableau 10-1 – Comparaison schématique des différents acteurs dans le domaine des déchets nucléaires vis-à-vis de la problématique d'optimisation de la roche hôte.

Éléments du problème	AFCN	Producteurs	ONDRAF
Fonction d'utilité/degré d'aspiration	Max (sûreté)	Min (coûts)	d°(aspiration) = sûreté
Environnement externe (paramètres)	Paramètres socio-économiques (e.g. cadre législatif)	Paramètres socio-économiques (e.g. cadre législatif)	Paramètres socio-économiques (e.g. cadre législatif)
Environnement interne (contraintes)	Solution en Belgique	- Sûreté (critères acceptation/admissibilité) - Résultats du programme R&D	- Résultats du programme R&D - Solution en Belgique
Variable(s)	Choix de la roche	Layout	Incertitude(s)

Avant d'approfondir l'examen de ce tableau, observons que la fonction d'utilité/degré d'aspiration traduit le but des différents acteurs. Ces buts ne sont pas identiques mais peuvent présenter des similarités. L'environnement

³⁴⁵ Que nous assimilons ici aussi aux paramètres socio-économiques afin de reprendre la terminologie de Simon.

externe est identique pour tous les acteurs et, dans notre exemple, il se réduit au cadre législatif ou, dans la terminologie de Simon, aux *paramètres socio-économiques*. L'environnement interne est forcément spécifique aux acteurs, par définition. Remarquons que la territorialité est indifférente pour les producteurs qui financent une solution où qu'elle soit dans le respect de leurs hypothèses de financement. Pour le dire autrement, à coût égal, que le stockage soit en Belgique ou sur la planète Mars n'a aucune importance. Les résultats déjà engrangés par le programme de R&D ne constituent pas une contrainte déterminante pour l'autorité de sûreté puisque, pour elle et en forçant quelque peu le trait³⁴⁶, peu importe l'investissement de recherche déjà engagé, seule la sûreté du produit final compte.

Il nous semble intéressant de remarquer qu'au-delà de la différence de rationalité soupçonnée entre l'ONDRAF et l'AFCN – qui tient pour le premier d'un degré d'aspiration vis-à-vis de la sûreté et pour l'autre, d'une fonction d'utilité à maximiser –, c'est tout le cadrage de la question qui semble différent. Nous pensons qu'une partie de l'incompréhension mutuelle entre les deux acteurs réside dans le fait que seules les deux premières lignes du tableau sont considérées dans les échanges entre les deux institutions. Pour l'un et l'autre, il s'agit de travailler la sûreté et de prendre dûment compte des paramètres socio-économiques entendus comme environnement externe. L'objectif et le référentiel semblent être ainsi partagés alors que ce dernier ne l'est pas tout à fait. L'examen de l'environnement interne de la tâche le révèle. Les résultats du programme de R&D constituent les acquis sur lesquels s'appuie le processus de recherche de l'ONDRAF et qui limitent sa rationalité (Simon [1969] 2004, p. 61³⁴⁷).

³⁴⁶ C'est une hypothèse un peu abrupte mais licite dans le cas présent. Bon nombre d'ingénieurs et de scientifiques de l'AFCN ont travaillé à la solution du stockage géologique dans l'argile de Boom lorsqu'ils œuvraient pour le centre de recherches SCK CEN. On ne peut donc pas postuler une complète indifférence. Toutefois, dans leur rôle de régulateur, ce « passé » ne peut intervenir si ce n'est par la connaissance scientifique qu'ils en ont. Notons, à ce sujet et pour être complet, que cette connaissance évolue rapidement et que nous devons écarter l'hypothèse selon laquelle l'AFCN, sur la base de sa pré-connaissance, déciderait de tout mettre en œuvre pour exclure l'option de l'argile de Boom parce que celle-ci ne serait pas concluante. Ce n'est pas du reste ce que l'AFCN en pense (AFCN, 2011a).

³⁴⁷ Rationalité qui conduit à des solutions pragmatiques voire opportunistes (Simon [1969] 2004).

Dans le cas précis de la roche hôte, si le programme de recherche a déjà révélé que le transport des radionucléides vers la biosphère sera diffusif et sera ralenti, la plupart du temps, par des phénomènes de sorption, l'ONDRAF continuera d'investiguer les propriétés de ce transport en tentant, par exemple, d'évaluer l'effet que pourrait avoir la matière organique présente dans l'argile si elle venait à s'associer aux radionucléides lors de leur migration. De telles considérations, si elles constitueront d'indéniables éléments scientifiques de discussion avec le régulateur le moment venu, n'empêchent pas celui-ci de proposer à tout moment une sortie de cadre en proposant un autre type de roche, en recherche qu'il est d'une décision substantivement rationnelle dans une situation définie uniquement par l'environnement externe (Simon [1969] 2004, p. 60). Comme nous l'évoquions précédemment, à aucun moment le programme de recherche en cours n'apparaît comme une contrainte du problème pour l'AFCN, il reste à tout moment un sujet de discussion.

C'est intentionnellement que nous employons la formulation « sujet de discussion » car elle révèle, une fois encore, une possible source de confusion. Bien entendu, un programme de recherche est un sujet de discussion mais alors que celui-ci engage une progression décisionnelle dans le chef de l'ONDRAF, qui entend construire sa solution sur la base des éléments acquis, chacun de ces éléments peut, quant à lui, suffire à l'AFCN pour déconstruire la solution proposée. Là encore, cette déconstruction paraîtrait légitime si d'aventure une insuffisance devait être observée et nécessiter l'arrêt du développement ou sa réorientation. Mais pour l'ONDRAF, cette réorientation ou cet arrêt devraient être motivés par l'incapacité à atteindre le niveau d'aspiration fixé initialement alors que pour l'AFCN, cette remise en question devrait être un processus permanent. Ce processus permanent légitimerait toute réorientation ou tout changement dès lors qu'il existerait une possibilité, fût-elle théorique, d'obtenir un meilleur résultat sur le plan de la sûreté. Le besoin de geler des étapes dans le processus de développement est beaucoup plus obsédant pour l'ONDRAF, qui envisage une progression par niveaux d'aspiration – une sorte de progression en escalier – que pour l'AFCN, qui entend procéder à une évaluation continue, de façon itérative, sans qu'un acquis n'ait un statut autre que temporaire et ce, jusqu'à atteindre la solution finale (AFCN, 2013b). Au premier niveau du processus d'élaboration de la solution

« stockage géologique », cela se marque par un choix très ouvert de la roche hôte pour l'AFCN tandis que, pour l'ONDRAF, cela se manifeste par une volonté de réduire l'incertitude sur la roche hôte déjà choisie comme hypothèse de travail depuis 40 ans (Wacquier *et al.*, 2018). Pour l'AFCN, la sûreté apparaît comme un idéal à atteindre, un lieu de vérité au sens d'un lieu sans compromis, où le meilleur doit être recherché et où l'on ne transige pas, vision consubstantielle d'une rationalité substantive. Pour l'ONDRAF, la sûreté doit rencontrer un niveau d'aspiration, niveau défini par un environnement externe tel le cadre législatif, dans un contexte socio-politico-économique. Les limites de l'environnement interne, c'est-à-dire l'état de progression de la recherche sur les argiles³⁴⁸, renvoie à l'exercice d'une délibération au sens d'une rationalité procédurale. Le comportement adaptatif de l'ONDRAF, qui tient compte des résultats du programme de recherche en cours, agit comme en conscience d'une capacité cognitive ou computationnelle limitée, une capacité conditionnée historiquement par les résultats déjà engrangés. Cette limitation propre de l'environnement interne est partagée par les producteurs de déchets qui financent le programme de recherche. Nous ne nous intéresserons pas ici à la critique, un peu facile, de l'indépendance de l'ONDRAF, dès lors que son programme de recherche est financé par un tiers dont la fonction d'utilité est la minimisation des coûts mais nous constatons cependant que l'ajustement du comportement de l'ONDRAF est limité par une capacité cognitive au sens de Simon (Simon [1969] 2004), c'est-à-dire par une connaissance constituant un *déjà là*.

On pourrait objecter ici que ce sont beaucoup de circonvolutions intellectuelles pour décrire une situation où une institution ayant déjà accompli beaucoup de recherche préfère simplement persévérer sur sa lancée plutôt que de se voir imposer, sans raison valable, de revoir sa copie en quête d'une éventuelle meilleure approche. Mais nous pensons depuis le début de cette recherche qu'il ne s'agit pas simplement d'un entêtement

³⁴⁸ Nous serions tentés d'écrire « l'état de l'art » si cette expression n'avait pas été elle aussi sujette à confusion. Dans l'annexe du procès-verbal de la réunion du 29 juin 2011 (AFCN, 2011d), l'état de l'art figure comme possible circonstance existante. Toutefois, alors qu'il désigne pour l'ONDRAF l'état de la connaissance sur les roches hôtes belges, l'état de l'art revêt un caractère plus général pour l'AFCN et porte sur les **moyens** d'obtenir ces connaissances (forages, géostatistique, géophysique, etc.). En d'autres termes, pour l'ONDRAF, l'état de l'art désigne le **connu** alors qu'il désigne, pour l'AFCN, le **connaissable**...

d'un acteur – l'ONDRAF – impliqué dans un processus de réalisation, qui s'opposerait à la fraîcheur d'esprit d'un *outsider* – l'AFCN – ou qui dénoncerait un péché de perfectionnisme mais au contraire, qu'il faut voir dans cette divergence la conviction pour l'ONDRAF d'une quasi-impossibilité de répondre à l'AFCN par le jeu de l'optimisation sur le plan d'une rationalité substantive. Pour l'AFCN, au contraire, le stockage géologique doit assurer le plus haut niveau possible de sûreté, au sens d'une entéléchie et, par conséquent, toutes les alternatives doivent pouvoir être mesurables dans les termes d'une commune fonction d'utilité (Simon [1969] 2004, pp. 68-69). Pour sortir de la querelle idéologique, mais aussi et surtout afin d'analyser si un tel exercice de maximisation de la sûreté est simplement possible en pratique – la sûreté est-elle soluble dans une fonction d'utilité ? (voir section 8.7.6) –, l'étude de cas présentée ici pousse le raisonnement de l'AFCN jusqu'aux limites des connaissances actuelles. Nous verrons dans les sections suivantes que les conclusions de cet exercice ne peuvent clore définitivement la question sans en soulever une autre, d'ordre éthique cette fois (Kermisch et Depaus, 2020) sur le coût réel d'un alignement de connaissances au nom d'un choix guidé par la plus grande utilité (Savage, 1954)³⁴⁹.

³⁴⁹ Les acteurs sont supposés toujours choisir, parmi toutes les alternatives qui s'offrent à eux, celle qui conduit à la plus grande utilité (Savage, 1954).

10.4 Optimisation de la roche hôte³⁵⁰

10.4.1 Vers une analyse systématique

L'AFCN enjoint l'ONDRAF de procéder à une analyse systématique des roches hôtes (AFCN, 2014 ; Depaus, 2016a ; Depaus, 2017b ; ONDRAF, 2017b, **nous soulignons**) :

« Cette analyse systématique doit s'entendre au regard de :

- De la faisabilité technique, de la sûreté opérationnelle, de la sûreté à long terme, tenant compte des facteurs socio-économiques (circonstances existantes)
- Des **caractéristiques intrinsèques de la formation hôte** (homogénéité, capacité de confinement, etc.) et d'autres paramètres tels que l'épaisseur, la profondeur, etc.

Et par 'analyse systématique', il faut comprendre :

- Une mise en œuvre du **principe d'optimisation de la protection** passant par une comparaison systématique des formations hôtes potentiellement favorables sur base **d'attributs de sûreté clairement identifiés ;**
- **Les attributs de sûreté doivent refléter les capacités de confinement et d'isolation** des formations hôtes et de leur environnement géologique ;
- **Les attributs de sûreté sont dérivés des exigences relatives à la formation hôte telles que données dans le guide intégré dépôt géologique.** » (ONDRAF, 2017b)

³⁵⁰ Cette section s'appuie – dans sa structure surtout – sur nos travaux antérieurs (ONDRAF, 2017b) pour ce qui concerne la méthodologie d'élaboration et d'utilisation de l'attribut de sûreté ainsi que la comparaison des roches hôtes. La section du présent manuscrit est cependant fondamentalement réécrite et s'enrichit d'une réflexion sur l'optimisation multi-objectif et l'analyse multicritères ainsi que de la confrontation avec les analyses récentes du régulateur (Bel V, 2019).

L'AFCN fait également remarquer que :

- « *L'aspect "isolation" n'a pas été jusqu'ici suffisamment pris en compte par l'ONDRAF, même pour l'argile de Boom. Ainsi par exemple, la présence d'aquifères dans l'environnement de l'argile (représentant des réserves d'eau exploitables contigües à la formation hôte) n'est que très peu discutée dans les documents soumis à l'AFCN.* » (AFCN, 2015a ; ONDRAF, 2017b)

En vue de répondre à cette demande d'analyse systématique des roches hôtes pouvant potentiellement accueillir un stockage géologique, il a été décidé de suivre la méthodologie préconisée par l'agence de sûreté, à savoir la définition d' « attributs de sûreté » sur la base de la guidance intégrée et plus particulièrement la guidance annexe ayant trait à la roche hôte (ci-après la guidance « SR 3 »³⁵¹) (AFCN, 2011c*). L'étude de cas se fonde sur les études prospectives déjà entreprises par l'ONDRAF (Brassinnes, 2007a ; Brassinnes, 2007b ; Dupont, 2012) et avec des universités partenaires (Sintubin *et al.*, 2017), ainsi que sur la littérature internationale (Boisson, 1996a, 1996b ; Bultynck et Dejonghe, 2001 ; Everaerts *et al.*, 1996 ; Groessens *et al.*, 1982 ; Mazurek *et al.*, 2008 ; Michot, 1980). L'analyse systématique ne prétend pas aller au-delà des conclusions scientifiques déjà rapportées mais vise plutôt une mise en perspective méthodologique et critique des données existantes (ONDRAF, 2019c).

³⁵¹ Le guide technique dépôt géologique (déchets de type B&C) est disponible dans une version du 7 décembre 2009. Elle comporte une section 16, SR (*specific requirements*) dont la sous-section SR 3 porte sur les exigences relatives aux composants naturels. La « guidance SR 3 » est donc présentée comme l'amendement de cette section, elle ne constitue pas, stricto sensu, une guidance à part entière

10.4.2 L'attribut de sûreté comme élément de base de la méthodologie

L'« attribut de sûreté », bien que souvent mentionné dans les communications de l'AFCN, n'est cependant pas clairement défini dans les guidances établies par cette dernière. Un certain travail d'investigation s'impose donc en vue d'en cerner précisément la notion.

La note de positionnement de l'AFCN stipule que :

*« Les formations les plus optimales du point de vue de la sûreté doivent être identifiées à partir d'une comparaison systématique des formations potentiellement favorables sur base **d'attributs** de sûreté clairement identifiés. Les exigences relatives à la formation hôte données par l'AFCN dans **le guide technique intégré** dépôt géologique constituent la référence pour l'établissement de ces attributs. » (AFCN, 2014a, nous soulignons)*

Le guide technique intégré (AFCN, 2014b) ne reprend pas l'expression « attribut de sûreté » dans son glossaire. En revanche, on peut trouver, dans son article 36.5 relatif à l'optimisation de la protection, que :

*« Le processus d'optimisation commence avec le choix de la formation hôte. Une directive de l'Agence peut préciser les éléments à prendre en considération lors de la sélection de la formation hôte et du site (voir annexe SR 3) [...] L'approche nécessite la définition **d'attributs** permettant de juger du gain de protection associé à une option (cf. Note de convergence optimisation). »*

L'annexe SR 3 est une guidance « Guidance dépôts géologiques SR 3, exigences relatives aux composants naturels » présentée le 9 juin 2011 par l'AFCN (AFCN, 2011c*). Elle renvoie à la guidance géologique de 2009 (AFCN, 2009b). Elle ne contient aucune définition d'attribut de sûreté.

La note de convergence optimisation (AFCN, 2013b) renvoie à la publication 101 de la CIPR:

*« L'approche [NdI : approche coûts-bénéfices] nécessite la définition **d'attributs** permettant de juger du gain de protection associé à une option. Un exemple de liste non exhaustive d'attributs pouvant*

intervenir dans l'analyse coûts-bénéfices est fourni dans l'ICRP-101 (...) Ces attributs illustrent les différentes composantes à évaluer dans le bénéfice général de la protection, en tenant compte que ceux relatifs à la dose concernent davantage la protection radiologique à court terme. L'exemple doit cependant être considéré avec prudence dans la mesure où des circonstances existantes sont incorrectement considérées comme attributs. » (ICRP, 2006, nous soulignons)

La publication 101 de la CIPR évoque en effet la notion d'attribut, sans toutefois la définir :

« (24): The objective is to identify clearly and systematically the relevant attributes to select the best protective options under the circumstances

(25): To identify the relevant attributes, the most straightforward approach is to ask 'when, where, how and by whom are exposures received'. Responding to these questions will result in a set of attributes expressing the characteristics of exposed populations and their exposures, as well as technical, economic, social, environmental, and ethical considerations relevant to the situation [...] »

En revanche, la CIPR propose une liste (non exhaustive) d'exemples allant des caractéristiques de la population exposée aux contraintes réglementaires, en passant par les caractéristiques de l'exposition, les considérations sociales et les valeurs, les considérations environnementales, les dangers non radiologiques ainsi que les aspects techniques et politiques (ICRP, 2006, p. 83).

L'AFCN nous met cependant en garde vis-à-vis de ces attributs dont certains seraient, en réalité, des circonstances existantes (AFCN, 2013b). Quoi qu'il en soit, ces « attributs », selon la publication 101 de la CIPR, sont très généraux et n'ont aucun caractère spécifique par rapport à la roche hôte. En revenant sur les premiers débats qui ont produit *in fine* la note de convergence sur l'optimisation, on peut finalement trouver, dans l'annexe du procès-verbal d'une réunion, qu'un attribut de sûreté pourrait se définir comme suit :

« Attribut lié à la performance du système (isolation and confinement), à sa robustesse et à la démontrabilité. » (AFCN, 2011d)

Et où, l'attribut lui-même serait défini sur la base du glossaire d'une guidance environnementale anglaise comme :

« a quality, property, or performance measure of an option that enables different options to be scored or ranked in relation to one another. Depending on the attribute concerned, the scoring or ranking process may lie anywhere in the range from entirely objective to entirely subjective. Different attributes are not normally commensurable with one another in any direct way and hence a subjective weighting factor must be applied to each attribute if an overall scoring or ranking of options is to be obtained. » (Environment Agency, 2004)

Ce qui nous permet de proposer la définition suivante :

*« Un **attribut de sûreté** d'une roche hôte serait donc une qualité, une propriété ou une mesure liée à la performance de la roche (vis-à-vis de ses capacités d'isolation et de confinement), sa robustesse ou encore la démontrabilité du système dont elle constitue le principal composant. » (ONDRAF, 2017b, **nous soulignons**)*

Et d'en déduire que la nature de l'attribut de sûreté doit permettre un *« classement relatif des roches hôtes entre elles, sur une base objective ou subjective. Les attributs de sûreté pouvant être incommensurables, le*

*classement des roches hôtes reposera donc sur des facteurs de pondération attribués auxdits attributs*³⁵². » (ONDRAF, 2017b)

Cette déduction faite sur la base de la guidance de l'*Environment Agency* oriente les méthodes d'aide à la décision auxquelles on pourra tenter d'avoir recours. Reconnaître la non-commensurabilité des attributs, c'est aussi reconnaître la difficulté d'élaborer une fonction d'utilité. Quant à la subjectivité de certains attributs, elle va de pair avec l'existence d'un point de vue *a priori* ainsi qu'avec la notion de préférence.

Le fait d'évoquer plusieurs attributs renvoie à la notion « multicritère » pour laquelle il ne peut exister, en général, de solution meilleure que toutes les autres simultanément pour tous les points de vue (Vincke, 1991). La pondération suggérée des attributs permet de les prioriser. Si certains en concluent que le concept de solution optimale n'a pas de sens dans un contexte multicritère et qu'il vaut donc mieux s'intéresser à la recherche de solutions « efficaces » (Vincke, 1991), rejoignant en ce sens Simon (Simon, 1997, pp. 281-282)³⁵³; d'autres, sans pour autant complètement contredire le précédent constat, parlent d'optimisation multi-objectif (Boussaïd, 2013) ou de programmation multicritère dans des domaines comme la gestion environnementale pour lesquels la simple analyse coûts-bénéfices montre

³⁵² Par souci de totale transparence, signalons que la base de cette définition (Environmental Agency, 2004) pourtant proposée par l'AFCN en 2011 (AFCN, 2011d) et sur laquelle l'ONDRAF s'est basé afin d'élaborer une définition de l'attribut de sûreté, a été contestée par Bel V, la filiale de l'AFCN en tant que TSO (Technical support Organisation), en 2019 dans son avis sur le rapport de l'ONDRAF « Analyse des attributs de sûreté des potentielles roches hôtes pour un stockage géologique des déchets B&C (version 1.0) » (ONDRAF, 2017b). La critique est formulée comme suit: « *Bel V can agree with the first sentence of this definition. However, concerning the second sentence, it should be clear that the primary aim of safety attributes should be to assess and compare the ability of geological formations to safely host a geological repository. Safety attributes could then be used to rank potential host formations if needed and relevant. Furthermore, the part of this sentence on the 'objective' or 'subjective' basis is not acceptable as only objective arguments should be used in the process. The last sentence on the weighing factors and, in particular, the link between the unmeasurable character of an attribute and weighing factors, is not understood by Bel V* » (Bel V, 2019). Nous ne commenterons pas ce qui dénote selon nous d'un manque de cohérence entre l'AFCN et sa filiale Bel V, remarquons simplement et pour suite utile, le rejet de la base éventuellement subjective du classement et de l'incompréhension du caractère incommensurable de certains attributs.

³⁵³ H. Simon pose la question de « qu'est-ce qui est fonctionnel ? », question semblable à « qu'est-ce qui est satisfaisant ? » mais radicalement différente de « qu'est-ce qui est optimal ? » (Simon, 1997).

« ses limites et son inadéquation à traiter des problèmes complexes » (Ben Mena, 2000). L'*Environment Agency*, en recommandant des facteurs de pondération, semble suggérer une méthode agrégée de traitement du problème multi-objectif, c'est-à-dire une méthode qui procèderait à une mise à l'échelle des critères tantôt en les additionnant, tantôt en les multipliant. La plus connue de ces méthodes est évidemment celle de la moyenne pondérée $F(x)$ consistant à additionner tous les objectifs (comprendre ici « attributs ») en affectant un coefficient de pondération (équation 10-1). Ce coefficient traduit l'importance que le décideur attribue à l'objectif (fonction f). Il s'agit donc d'une méthode *a priori* puisque la pondération se situe en amont du processus d'optimisation, le décideur définissant ses préférences (Boussaïd, 2013).

$$F(x) = \sum_{i=1}^m \omega_i f_i(x) \quad \text{Equation 10-1}$$

où les poids $\omega_i \geq 0$ sont tels que $\sum_{i=1}^m \omega_i = 1$.

Remarquons la similitude avec l'équation 8-3 de la fonction d'utilité décrite par la CIPR (voir section 8.7.3). Cette définition de l'attribut de sûreté constitue la pierre angulaire de la méthodologie de comparaison des roches hôtes car une fois posée, elle permet la découpe de la guidance « SR 3 » (AFCN, 2011c*) suivant les modalités identifiées dans la définition, à savoir les piliers³⁵⁴ de l'approche générale de sûreté (isolement et confinement) ainsi que les principes de sûreté de robustesse et de démontrabilité (voir

³⁵⁴ Nous opérons une distinction entre pilier de sûreté et principe de sûreté. Le terme « pilier de sûreté » (*safety pillar*) est employé par l'agence suisse pour désigner une caractéristique du système de stockage contribuant aux fonctions de sûreté : environnement chimique, un buffer en bentonite (interface entre le colis de déchets et la roche hôte), etc. (Nagra, 2002). Ce terme n'est cependant pas consacré dans le jargon international et il nous est donc possible de lui affecter une autre acception. En effet, les principes de sûreté comprennent habituellement la défense en profondeur, la démontrabilité et les principes de protection radiologique (Bernier *et al.*, 2017) ou encore, selon les sources, la sûreté passive, la robustesse, la défense en profondeur, la démontrabilité, l'optimisation et le principe BAT (ONDRAF, 2020f ; IAEA, 1995 ; IAEA, 2006 ; IAEA, 2011b). Les deux fondements sur lesquels repose le fonctionnement d'un stockage à savoir l'isolation et le confinement (*isolate and contain*) (IAEA, 2011a) ne bénéficient pas toujours de dénomination spécifique et sont parfois considérés comme des principes de sûreté. Pour éviter toute contestation, nous avons donc décidé de distinguer les fondamentaux « isolation » et « confinement » des autres principes de sûreté en les nommant « piliers » en référence à la stratégie globale (*overarching strategy*) du stockage.

tableau 10-2). Cette découpe permet de conférer une première structure à un tableau d'attributs – visant à établir la correspondance entre la réglementation et la science – ceux-ci étant rangés selon leur appartenance à ou leur pertinence vis-à-vis du pilier ou principe de sûreté.

Cette découpe, qui consiste en un classement des dispositions réglementaires de la guidance selon les éléments clés identifiés dans la définition de l'attribut de sûreté, nous renseigne sur les paramètres physico-chimiques à considérer. Ainsi, il est possible de structurer un tableau dans lequel apparaissent les principes et piliers de sûreté comme première clé, les fonctions de sûreté (voir section 3.2.1, Introduction générale) comme clé secondaire éventuelle et ensuite, les références à la guidance SR 3, c'est-à-dire les dispositions de celle-ci, en vue d'en déduire enfin – sur la base d'un jugement d'expert³⁵⁵ – les paramètres physico-chimiques pertinents (voir tableau 10-3).

³⁵⁵ Une abondante littérature existe au sujet de la sollicitation d'experts (*expert elicitation*) consistant à synthétiser les opinions d'experts sur des sujets pour lesquels il n'existe que peu de données (voir par ex. Knol *et al.*, 2010). Ces débats ne sont pas utiles à notre propos. Nous mentionnons le jugement d'expert car il s'agit de la transposition d'une disposition réglementaire en une liste de paramètres physico-chimiques accompagnés de valeurs-limites (seuils ou bornes).

Tableau 10-2 – Extrait du découpage de la guidance SR 3 de l’AFCN selon les grands principes de sûreté (robustesse, démontrabilité, défense en profondeur) et les piliers de l’approche générale de sûreté (isolation et confinement). Les relations entre recommandations et catégories n’étant pas univoques, les intitulés entre parenthèses, décrivent les catégories d’ordre secondaire par rapport aux recommandations. Certaines recommandations sont redondantes car elles ont une égale pertinence dans plusieurs catégories. Les dispositions de la guidance sont parfois reformulées par souci de concision. Tableau adapté de nos précédents travaux (ONDRAF, 2017b).

-
- Confinement :
 - ❖ Ecoulement d’eau limité (SR 3.1.1) ;
 - ❖ (...)
 - Robustesse :
 - ❖ CNSD³⁵⁶ doivent pouvoir protéger les COSD³⁵⁷ et les colis face aux sollicitations d’origine externe (SR 3.1.2.2)
 - ❖ Zone géologique stable³⁵⁸ (v.à.v. tectonique, p/r conditions mécaniques, géochimiques, ... qui préservent le système) et éloignée des CNOS³⁵⁹ pouvant nuire aux performances (cavités, discontinuités, etc.) (SR 3.1.2.2)
 - ❖ (...)
 - Robustesse – (Défense en profondeur) :
 - ❖ Les composants du système de dépôt et/ou leurs fonctions de sûreté doivent être indépendants et complémentaires (SR 3.1.1)
 - Démontrabilité - (prévisibilité) :
 - ❖ CNSD suffisamment éloignés des CNOS pour ne pas rendre le système imprévisible³⁶⁰ (SR 3.1.2.1) ;
 - ❖ Comportement possible des CNSD + évolution des conditions THMBC³⁶¹ doivent pouvoir être modélisés adéquatement (SR 3.1.4)
 - ❖ (...)
 - Isolation – (localisation) – (robustesse) :
 - ❖ La localisation doit pouvoir diminuer le risque de HI³⁶² (SR 3.1.2.3) :
 - la distance entre les déchets et la biosphère ;
 - la vraisemblance d’une mise à nu du système de dépôt et des déchets (...)
-

Tableau 10-3 – Exemples de paramètres physico-chimiques répondant à la définition de l’attribut de sûreté par rapport au pilier « confinement ». Les valeurs-limites sont issues de la littérature ou de programmes nationaux analogues et donnent des valeurs recommandées ou des limites d’exclusion. Tableau adapté de nos précédents travaux (ONDRAF, 2017b).

Pilier/principe de sûreté	Fonctions de sûreté	Dispositions de la guidance SR 3	Paramètres physico-chimiques intervenant comme attribut de sûreté	Valeurs-limites réglementaires ou recommandées des paramètres
Confinement	R2, R3	Ecoulement d'eau limité (SR 3.1.1)	Conductivité hydraulique K [m/s] Transmissivité des chemins préférentiels de libération T [m ² /s]	$K \leq 1E-10$ m/s; $K \leq 1E-12$ m/s (très favorable) ; (...) (Depaus,2017b) $T \leq 1E-11$ m ² /s très favorable ; (...) (Depaus, 2017a)

Comme le découpage de la guidance SR 3 n’échappe pas à la redondance, puisque l’écriture de celle-ci n’a pas suivi la logique des piliers et principes de sûreté, le tableau d’attributs en a tout naturellement hérité. Une fois l’ensemble des attributs énoncés, le fussent-ils plus d’une fois, le tableau est consolidé en éliminant toute répétition. La version consolidée du tableau ne reflète plus le processus de réflexion qui a présidé à son élaboration mais

³⁵⁶ CNSD : Composants Naturels du Système de Dépôt.

³⁵⁷ COSD : Composants Ouvragés du Système de Dépôt.

³⁵⁸ Libellé exact : « localisation telle que la probabilité d’occurrence et l’ampleur des sollicitations d’origine externe pouvant nuire aux performances soient limitées et que leurs impacts sur ces performances soient négligeables ».

³⁵⁹ CNOS : Composants Naturels à l’Origine des Sollicitations.

³⁶⁰ Par exemple, en éloignant les CNSD des composants naturels exploitables dont l’extraction ou l’utilisation rendrait le comportement du système de dépôt imprévisible.

³⁶¹ Conditions THMBC : conditions thermiques, hydrauliques, mécaniques, biologiques et chimiques.

³⁶² HI : *Human Intrusion*.

facilite la manipulation des données et leur interprétation³⁶³. En effet, quand l'ensemble des dispositions de la guidance SR 3 sont traduites en paramètres physico-chimiques et que des valeurs-limites ont pu être compilées sur la base de la littérature ou des programmes de R&D belge et étrangers, il faut encore remplir le tableau avec les valeurs expérimentales (mesurées)³⁶⁴ de ces paramètres correspondant aux roches hôtes à considérer en Belgique. Notons d'emblée que les valeurs-limites pourront éventuellement servir de critère d'élimination ou d'attribution d'un score en vue d'évaluer si les valeurs expérimentales récoltées sont oui ou non jugées favorables en regard d'un paramètre donné, par rapport à une disposition réglementaire donnée et vis-à-vis d'un principe ou pilier de sûreté donné. En d'autres termes, avant de départager les roches candidates, en appliquant éventuellement une méthode multicritère d'aide à la décision sur la base des attributs de sûreté, il nous faut avoir répertorié lesdites roches. L'élaboration d'un tel répertoire suppose un examen de toute la géologie belge et nécessairement l'application de critères de sélection afin de réduire la complexité du problème. Cette réduction de complexité procède d'une pratique courante en recherche opérationnelle afin de rechercher un optimum dans un modèle simplifié de la réalité (Simon [1969] 2004). Bien que ces critères de sélection puissent être de la même nature que les attributs, ils ne peuvent anticiper le résultat de la technique d'aide à la décision fonctionnant sur la base des attributs mais bien, grâce à l'existence de valeurs-limites, permettre d'opérer une exclusion *a priori*. Enfin, ajoutons que les valeurs à assigner aux différents attributs, que ce soit au niveau des valeurs-limites ou au niveau des valeurs mesurées, sont souvent dérivées d'analogues internationaux ;

³⁶³ Le lecteur intéressé se référera donc tantôt au tableau préparatoire s'il veut en comprendre la structure d'élaboration (voir annexe 5), tantôt aux « attributs consolidés » (voir annexe 6), s'il souhaite voir énoncés les attributs et leurs valeurs dans leur version la plus récente. Une fois que la structure du tableau est élaborée, et que sa version expurgée de toute redondance est mise en forme, c'est sur cette dernière que les valeurs de la littérature sont reportées. En ce sens, la version « attributs consolidés » n'est pas simplement un extrait du tableau complet, elle ne reprend de ce dernier que les principales catégories mais se voit augmentée de toutes les valeurs rencontrées dans la littérature.

³⁶⁴ Nous emploierons, dans ce contexte, l'un et l'autre en synonymie. L'expérience consistant en une mesure directe dans le cadre du programme belge ou une mesure rapportée dans la littérature ou encore effectuée dans le cadre d'un programme étranger ou un projet de recherche international. Il arrive que, dans ces derniers cas de figure, les valeurs ne soient pas encore publiées mais soient connues des experts et « circulent » dans leur milieu de spécialité.

elles s'interprètent donc sous toute réserve, la transférabilité de ces données au cas des roches belges n'étant pas établie.

10.4.3 Evaluation des roches hôtes

A la question générale : *Quelle roche peut-elle être l'hôte d'un stockage géologique de déchets radioactifs ?* On répond habituellement : l'argile, le granite et le sel. Derrière cette réponse grossière et imprécise se cachent une multitude de réalités. Au vocable *argile*, correspond un spectre complet de pélites allant de l'argile faiblement indurée au schiste ardoisier en passant par les shales, les argilites et les slates ; au vocable *granite*, toutes les roches dites cristallines, c'est-à-dire les roches magmatiques plutoniques et les roches métamorphiques, et enfin au vocable *sel*, toutes les évaporites dont certaines seulement contiennent effectivement du chlorure de sodium. Ces trois « catégories » de roches couvrent donc un éventail immense de possibilités auquel il convient d'ajouter encore, par souci d'exhaustivité, certaines exceptions célèbres³⁶⁵. Ainsi, échappant à ces trois catégories et à leurs exceptions, il n'y a guère plus que quelques types de roches, des roches qui laisseraient potentiellement passer un tel débit d'eau qu'un stockage géologique dans de telles conditions n'aurait que peu à envier à un stockage de surface bien conçu. En pratique, seuls des sables, des calcaires karstifiés, des craies et peut-être encore quelques autres formations marginales peuvent donc être exclues *a priori*. Pourtant, l'obtention de cette triade (argile, granite, sel), aussi inclusive soit-elle, a aussi requis, dès les premiers travaux, l'utilisation d'indicateurs synoptiques. Pour les pays européens, c'est essentiellement l'étude effectuée à la demande la Commission européenne³⁶⁶ en 1979 (EC, 1979a, 1979b) qui constitue sinon le travail pionnier³⁶⁷, le premier travail d'envergure sur le sujet et qui en établit les fondements. Il a consisté à examiner la géologie européenne globalement et

³⁶⁵ Ainsi Yucca Mountain, le projet d'enfouissement des déchets nucléaires civil des Etats-Unis arrêté au cours de la présidence Obama devait être réalisé dans du *tuff*, soit une roche volcanique. Le tuff vient ainsi compléter, avec les roches magmatiques plutoniques, le spectre des roches ignées. On peut encore ajouter, à ces exceptions, certains calcaires canadiens.

³⁶⁶ Alors Commission des communautés européennes.

³⁶⁷ Des travaux bien antérieurs existent dont notamment ceux de l'AIEA (IAEA, 1980 ; IAEA, 1960) mais aussi américains (Pierce and Rich, 1958 ; Hess, 1959 ; Repenning, 1959 ; Roedder, 1959).

pays par pays afin d'en dégager les formations géologiques dignes d'intérêt pour un stockage. Le travail d'évaluation globale a été coordonné par le BRGM³⁶⁸ et le travail spécifique sur la Belgique, par le service géologique belge GSB³⁶⁹. Il nous a dès lors paru légitime, tant dans le cadre de la recherche menée pour l'ONDRAF que dans celui de la présente recherche, de retourner aux sources de cette question en effectuant une méta-analyse de l'étude européenne de 1979 et en nous interrogeant sur la pertinence de ses résultats aujourd'hui.

Nous nous intéresserons ici plus spécifiquement aux aspects méthodologiques, la description géologique pouvant être consulté dans nos précédents travaux (ONDRAF, 2017b ; ONDRAF, 2019c).

10.4.3.1 Critères, propriétés et valeurs-limites

Dans l'étude européenne de 1979, un critère de sélection pour les roches hôtes se définit par un couple (propriétés ; valeurs-limites) défini comme suit :

*« **Les propriétés** sont les caractéristiques permanentes³⁷⁰ (ex : conductivité thermique, perméabilité intrinsèque) ou variables (c'est-à-dire interactives avec la mise en jeu des fonctions qu'elles permettent d'assurer comme par exemple, la sorption) ainsi que les caractéristiques dimensionnelles ou structurales (épaisseur, homogénéité).*

***Les valeurs-limites** sont les valeurs minimales ou maximales de chacune des propriétés³⁷¹ retenues conventionnellement pour définir*

³⁶⁸ Bureau français de recherches géologiques et minières.

³⁶⁹ Geological Survey of Belgium.

³⁷⁰ Bien que dépendant parfois de la température ou simplement présentant une aptitude naturelle à la variabilité.

³⁷¹ Il est intéressant de remarquer que la définition originale du document de 1979 fait état de caractéristiques et non de propriétés mêmes si ces dernières ont été définies par les premières. Tout aussi surprenant, la tendance dans le texte original d'identifier le critère à la propriété et d'évoquer donc « critères et valeurs-limites » plutôt que de parler, dans le respect des définitions posées, de « propriétés et valeurs-limites » ou plus simplement de critères en tant que vocable inclusif. Nous tentons de pallier, dans ce manuscrit, cette faible persévérance terminologique.

l'acceptabilité d'une formation géologique au rôle qu'on lui destine »
(EC, 1979a).

Ajoutons que ces valeurs-limites peuvent être connues ou présumées. Notons d'emblée que la convention dont il est question dans la définition des valeurs-limites n'est pas définie. Nous pensons que celle-ci devrait s'envisager logiquement à l'aune des capacités d'isolation et de confinement.

L'étude européenne distingue les critères liés à la roche des critères liés à la formation et à l'environnement de la formation (voir tableau 10-4). A ces critères, il convient encore d'ajouter trois facteurs complémentaires de choix qui sont : la disponibilité des régions ; le caractère peu accessible des zones choisies (i.e. limiter le risque de rompre le confinement par des activités d'exploitations des ressources) et la sensibilité des zones aux changements climatiques et hydrologiques.

Tableau 10-4 – Propriétés et valeurs-limites des critères de sélection liés à la roche, à la formation et à l’environnement de la formation (EC, 1979a). On peut remarquer que beaucoup de valeurs-limites sont données de façon qualitative : élevée, faible, etc.

Critères liés à /propriétés	Valeurs-limites
1. La roche	
Capacité de sorption ³⁷²	Élevée
Conductivité thermique	Élevée
Perméabilité	Faible
Propriétés géo-mécaniques	Bonnes (stabilité des cavités, plasticité élevée)
Solubilité	Faible
2. La formation	
Epaisseur	≥ 200 mètres (sel) ; ≥ 100 mètres (argile) ; ≥ 500 mètres (cristallin)
Homogénéité et uniformité	Très grande (peu de fracturation, peu de changement de faciès lithologique)
Profondeur	200 à 300 mètres
3. L’environnement de la formation	
Gradient hydraulique	Très faible voire nul
Conditions géothermiques anormalement élevées	Absentes
Séismicité	De I à IX (échelle MKS)
Tectonique	Simple et peu active

10.4.3.2 Procédure de sélection

La première phase de sélection, selon l’étude européenne, relève du choix du faciès lithologique. Le faciès ne répond pas à la définition stricte du « critère de sélection » comprenant propriétés et valeurs-limites, il est en réalité plutôt considéré comme un « indicateur synoptique » de plusieurs des critères mentionnés ci-dessus. C’est ce choix du faciès lithologique qui impose de limiter les investigations aux trois groupes de roches énoncés dans

³⁷² Absorption ou adsorption.

l'introduction de cette section, à savoir les roches cristallines, les formations salifères et les roches argileuses *sensu lato*. Même si ces trois groupes recouvrent déjà un éventail gigantesque de possibilités, la justification de ce choix n'est pas documentée et le lecteur avisé en déduira que celui-ci repose sur les travaux antérieurs de l'AIEA, notamment (IAEA, 1960 ; IAEA, 1980). Il nous paraît surprenant que cette triade, malgré les exceptions rencontrées dans la pratique, n'ait jamais été revue ou précisée et a revêtu un caractère quasi atavique dans le milieu des stockages au point de donner lieu à des (sérieux) *Clay Club*, *Salt Club*, ... afin de regrouper les agences qui développaient un concept préférentiel d'enfouissement dans l'argile, le sel ou dans une roche cristalline. Notons que la discussion des raisons ayant conduit à cette classification « argile-sel-granite » n'est pas utile à la présente recherche et nous ne la commenterons pas davantage. Il s'agit toutefois, de notre point de vue, d'une première faiblesse méthodologique de l'étude européenne.

La deuxième phase consiste en la sélection de formations favorables en procédant par élimination. Le processus d'élimination implique que des formations présentant un caractère favorable vis-à-vis de certains critères et non vis-à-vis d'autres soient éliminés.

Les critères utilisés avaient déjà tous été identifiés dans les anciens travaux de l'AIEA qui fournissaient une liste assez complète de recommandations (IAEA, 1980, pp. 53-56) mais tous ne peuvent pas servir de critères d'exclusion. Ces derniers doivent pouvoir facilement déboucher sur une réponse binaire et servir en première intention à économiser des ressources financières et de recherche. Les critères de sélection doivent aussi être largement consensuels et donc ne pas faire l'objet de polémique. A cet égard, il est intéressant de constater que les pays appliquent néanmoins des stratégies assez différentes en la matière, bien que tous s'entendent unanimement sur le côté rédhibitoire de l'activité tectonique comme l'illustre le tableau 10-5 ci-dessous extrait d'une étude américaine (US, 2015).

Tableau 10-5 – Critères d'exclusion disqualifiant un site pour l'implantation d'un stockage géologique (US, 2015). Les cellules en rouge indiquent qu'un site présentant cette condition doit être exclu de la liste des sites potentiels.

Condition	CA	FR	JP	SE	CH	US *	GB
Fast and/or significant groundwater flow							
Unfavorable groundwater chemistry							
Tectonic activity							
Inadequate depth and/or extent of the host-rock formation							
Significant faulting in the host rock							
Presence of natural resources							
Volcanic activity							

* Prior to 2002.

L'examen rapide de ce tableau est riche d'enseignements. Si l'activité tectonique est reconnue unanimement comme critère d'exclusion, c'est parce que ce dernier est pertinent pour tous les pays et renvoie à l'exigence absolue de stabilité (EC, 1992), contrairement à l'activité volcanique. Cette dernière est un critère d'exclusion évident mais qui n'est vraiment pertinent, dans la liste des pays listés dans le tableau, que pour le Japon. L'interprétation des autres critères est plus subtile. Si l'on considère, par exemple, des propriétés géométriques comme la profondeur et l'extension de la roche hôte, on peut voir qu'ils peuvent servir de critères d'exclusion mais seulement pour les Etats-Unis et la Suisse. Qu'en est-il des autres pays ? En réalité, il s'agit de critères – combinaisons de propriétés et de valeurs-

limites selon l'étude européenne – fixés *a priori*. Dans le cas des Etats-Unis, le régulateur est très prescriptif et impose des valeurs-limites. Dans le cas de la Suisse, pays sujet à une tectonique alpine active pouvant entraîner au fil des temps géologiques une remontée de la roche hôte (*uplift*), la Nagra (équivalent suisse de l'ONDRAF) s'impose elle-même des profondeurs minimales à respecter. Dans les autres pays, le critère garde toute sa pertinence mais il n'est pas donné *a priori* et doit intégrer une évaluation (de sûreté) globale avant d'être jugé déterminant. Si l'on considère les propriétés géométriques dont la profondeur, il est facile de comprendre qu'une plus faible profondeur dans une géologie plus calme (e.g. bassin en subsidence) est préférable à une profondeur de roche hôte éventuellement plus élevée mais dont l'évolution est plus incertaine. La lecture des autres critères énoncés dans le tableau demande une pré-connaissance des géologies et des concepts. Par exemple, la présence de fractures n'est pas un critère d'exclusion dans le concept cristallin suédois – dans la mesure où les fractures sont inévitables dans une roche cristalline –, alors qu'il est pour d'autres pays. La stratégie suédoise consiste, par conséquent, à s'assurer d'une flexibilité suffisante dans la conception de l'architecture du stockage afin de faire face aux imprévus pendant la phase de construction et pouvoir ainsi éviter les fractures ou les fissures les plus significatives. Si un tel critère avait été fixé de façon ferme *a priori*, il aurait eu pour effet d'exclure tous les sites dans les roches cristallines.

La difficulté d'établir des critères d'exclusion robustes reflète la grande dépendance des paramètres aux géologies existantes et à la pré-connaissance du concept en fonction de cette géologie. Beaucoup de pays préfèrent laisser la discussion ouverte sur les propriétés et leurs possibles valeurs-limites. Les couples (propriétés, valeurs-limites) ainsi discutés sont alors considérés comme des critères génériques ou spécifiques à la roche.

Remarquons que les conditions hydrodynamiques n'ont pas été retenues par l'étude européenne comme critère de sélection en raison de leur méconnaissance générale à grande profondeur. Les caractéristiques géo-mécaniques n'ont pas davantage été retenues comme critère malgré les recommandations de l'AIEA (IAEA, 1980), postulant que les génies miniers et civils devraient pouvoir s'en jouer. Nous savons aujourd'hui que ce n'est pas

si simple, même si certaines bonnes pratiques minières³⁷³ ont été transposées au monde des stockages. Précisons d'emblée que cette transposition ne suffit pas et ne dispense pas de l'étude spécifique de chaque roche hôte potentielle. Une différence majeure de paradigme sépare le génie minier de la construction d'un stockage. Pour le premier, la roche est exploitée tandis que pour la seconde, elle doit être préservée au maximum. Pour le premier, la roche est éventuellement une ressource mais une fois extraite du massif³⁷⁴, alors que pour la construction d'un stockage, la roche est toujours une ressource pour peu que son intégrité *in situ* soit garantie³⁷⁵. L'étude européenne souligne la pléthore de combinaisons possibles entre les facteurs géologiques qui entrent en jeu. Selon elle, le site idéal ne peut dès lors exister mais ce n'est pas, du reste, une condition nécessaire :

« Il faut souligner la variété de combinaisons possibles entre les nombreux facteurs géologiques qui entrent en jeu. Cette multiplicité de cas de figures écarte l'idée de l'existence d'un type particulier de formation présentant d'emblée toutes les conditions favorables, ce qui n'est pas, du reste, une condition nécessaire. Au stade actuel, il existe plusieurs solutions compétitives. Seules une quantification et une pondération des critères et de leurs valeurs-limites permettraient, par la suite, un certain classement, par comparaison. Il s'agit, en effet, d'obtenir un équilibre entre les critères et les facteurs les plus importants pour la sélection de chaque formation. »
(EC, 1979a, § 232)

³⁷³ Et de construction des tunnels.

³⁷⁴ Ce n'est pas toujours la roche qui constitue en elle-même une ressource mais bien le ou les substances que celle-ci contient. C'est d'ailleurs ce qui sépare grossièrement une carrière (de pierres), souterraine ou non, d'une mine (pour laquelle une substance utile est dégagée de la roche). Il existe toutefois des exceptions. Alors que sel et argile sont tous deux considérés comme roches (hôtes) par les experts des stockages, on parlera pourtant de carrière d'argile mais de mine de sel. La distinction fine entre mine, minière et carrière sort du cadre de ce travail.

³⁷⁵ C'est d'ailleurs un mariage contre-nature que d'utiliser une ancienne mine comme potentielle installation de stockage. Par définition, il ne reste plus rien de la roche d'intérêt une fois que la mine a été exploitée et celle-ci ne peut donc plus conférer le confinement attendu. L'expérience de la mine de sel de Asse (Allemagne) est à cet égard éloquente. L'explication de l'échec relatif de ce stockage est d'avoir compté sur les propriétés de confinement du sel alors que celui-ci avait déjà été raclé jusqu'aux éponges.

A la lumière de la question qui est posée aujourd'hui à l'ONDRAF par l'AFCN, il peut être surprenant de lire la mise en garde de la Commission européenne, formulée il y a plus de 40 ans déjà, sur l'impossibilité d'une recherche d'une formation présentant *toutes* les conditions favorables en précisant, du reste, que ce n'est d'ailleurs pas requis. On peut en effet se demander comment il se fait qu'en dépit d'un avertissement si précoce, l'idée d'une roche idéale puisse persister dans l'esprit de certains et hanter les discussions d'experts. A l'inverse, et de façon tout aussi précoce, l'étude recommande néanmoins une quantification et une pondération des valeurs-limites afin de pouvoir procéder à une comparaison, c'est l'idée qui est aujourd'hui reprise par l'AFCN et qui semble *a priori* être marquée au coin du bon sens. L'histoire se répète-t-elle ?

Ce qu'il faut, selon nous, comprendre de cette mise en garde est que le choix d'une roche hôte reposant sur la possession de toutes les conditions favorables doit être exclue mais qu'un équilibre doit être trouvé, en fonction de critères à définir. L'étude européenne plante donc le cadre pour une éventuelle optimisation mais dont les contraintes seront à définir au cas par cas. L'analyse systématique suggère, en filigrane, une analyse de type multicritères. Cette volonté d'optimisation est également explicitement énoncée dans les premiers travaux de l'AIEA sur les stockages sans toutefois faire référence au principe d'optimisation tel qu'il est consacré par la sûreté ou la protection radiologique mais en se référant plus vraisemblablement à l'acception ordinaire du mot :

*« Since this situation is unlikely to obtain [a stable area totally free of faults and fluids], the area should be selected so as to **optimize** the effectiveness of the natural barriers that do exist in the event that waste does escape. »* (IAEA, 1980, p. 53, **nous soulignons**)

L'étude européenne se fonde sur les critères de sélection susmentionnés en soulignant que, faute de données, surtout à grande profondeur, les caractéristiques ayant soutenu l'analyse reposent sur des extrapolations faites sur base d'affleurements. Nous avons complété cette étude par des résultats plus récents afin de donner un aperçu de la situation actuelle et surtout pouvoir explorer les limites de l'exercice de comparaison dans (ONDRAF, 2017b ; ONDRAF, 2019c ; ONDRAF, 2022c).

10.4.4 Analyse critique des critères de sélection et des attributs de sûreté

Il existe différents types de critères de sélection. Aux côtés des critères d'exclusion précédemment évoqués, il faut ajouter les critères génériques et les critères spécifiques. Les *critères génériques* sont ceux qui sont utilisés afin de comparer des sites dans des environnements géologiques complètement différents. De tels critères font rarement l'objet de quantifications et peuvent tout au plus s'apprécier de manière qualitative (*faible gradient hydraulique* par exemple), ou s'énoncer sous la forme d'une appréciation globale conditionnelle (i.e. *la roche et son environnement devraient être capables de bien s'accommoder de contraintes thermiques, chimiques, mécaniques, etc*). Ainsi, par exemple, une étude anglaise récente (2016) énonce d'emblée une série de critères fondés sur la pré-connaissance des propriétés générales identifiées par les études internationales de l'AIEA ou de l'EC :

« National geological screening will present an overview of existing information about the geology to a depth of about 1 000 metres or so beneath England, Wales and Northern Ireland. It will focus on aspects of the geological environment that are relevant to the long-term safety of a geological disposal facility (GDF). In particular, screening will set out the available information on the distribution of suitable rocks with low groundwater flow in which a GDF could potentially be built. It will identify geological features which may influence the movement of groundwater from GDF depths to the surface environment. It will also provide information to help us judge the likely impact of future geological changes, such as sea level rise and future ice ages, and to understand the distribution of minerals, hydrocarbons and other resources which may affect the likelihood of future civilisations inadvertently drilling or mining their way into the waste. » (RWM, 2016)

Nous reconnaissons, dans cet extrait, un *critère d'exclusion* et des *critères génériques*. Le critère d'exclusion est indirect et consiste en la profondeur de 1 000 mètres. Il est jugé inutile de collecter des données à plus grande profondeur. Non seulement plus la profondeur augmente, moins ces

données sont précises (EC, 1979a) mais, en outre, la construction d'un stockage au-delà de cette profondeur constituerait vraisemblablement un défi exagéré sans apporter la garantie de gains substantiels pour la sûreté (EC, 1992 ; Vomvoris *et al.*, 2016)³⁷⁶. Les critères génériques sont tous illustrés de façon qualitative, e.g. « *low groundwater flow* », [*the likelihood of*] « *future geological changes* », etc. et expriment plutôt des tendances qui devront être confirmées dans l'analyse de sûreté.

Les *critères spécifiques* à la roche hôte sont, quant à eux, des critères généralement attachés à un concept de stockage spécifique, qui identifient des propriétés de la roche qui confèreraient à une formation particulière la possibilité d'abriter un stockage de manière satisfaisante. Dans le cadre d'une comparaison, ces critères sont utilisés de manière à identifier un ou plusieurs sites pour une configuration géologique donnée (*geologic setting*) avec un seul concept de stockage. Il s'agit donc de comparer différentes localisations possibles du concept (unique) de stockage, pour une roche hôte donnée.

Cette classification des critères en trois catégories (i.e. exclusion, générique et spécifique) appelle quelques remarques. La première tient dans la difficulté de procéder à une distinction nette entre les catégories. Des critères retenus comme critères d'exclusion par certains pays seront vraisemblablement reclassés en critères génériques par d'autres. La deuxième difficulté est formulée par l'étude américaine (US, 2015) qui relaie les débats houleux autour du principe d'optimisation comme l'illustre l'extrait ci-dessous :

« Second, although technical suitability is the sine qua non for the choice of any repository site, all the possible locations are not equally suitable, whether in terms of performance margins or confidence levels. Consequently there are often calls from interested and affected parties for finding an “optimal” site. Yet the workability of

³⁷⁶ Ainsi la Nagra s'impose, en accord avec ENSI (le régulateur suisse), pour l'enfouissement de déchets hautement radioactifs, les critères de profondeur maximale suivants : 900 mètres pour les roches sédimentaires et 1 200 mètres pour les roches cristallines. Les évaluations de sûreté pour certains sites hypothétiques respectant notamment ces profondeurs montrent des courbes de dose comparables. L'EC parle, quant à elle, de profondeur suffisante « de manière à permettre un isolement efficace entre le dépôt et la biosphère » (EC, 1992).

seeking ever-better sites is quite problematic. So almost by default, national waste-management programs either explicitly or implicitly have limited their quest to the set of sites that is likely to comply with threshold safety and environmental protection regulations. »³⁷⁷

En l'absence de réglementations et donc de seuils au-delà ou en deçà desquels l'optimisation pourrait être arrêtée et à moins d'attendre le résultat d'évaluations de sûreté complètes, nous pensons que l'utilisation de critères génériques de sélection de roche hôte sera nécessairement limitée. C'est également la raison pour laquelle l'étude américaine souligne l'importance de l'acceptabilité sociétale (US, 2015).

La troisième difficulté fait écho à la première. Si la délimitation des catégories de critères n'est pas univoque, la juxtaposition des perspectives de l'étude de 1979 et celle esquissée au départ de la guidance SR 3 révèle une dépendance de ces critères entre eux, comme nous l'illustrons dans le tableau 10-6 ci-dessous.

³⁷⁷ « Deuxièmement, bien que l'aptitude technique d'un site à recevoir un stockage géologique est une condition sine qua non de choix, tous les sites possibles ne sont pas également 'aptés', qu'il s'agisse de performances, de marges de sûreté ou de niveaux de confiance. Ce constat donne lieu à des requêtes visant à trouver 'le site optimal'. Mais la possibilité de rechercher un site toujours meilleur est très problématique. Donc par défaut, la plupart des programmes nationaux de gestion des déchets ont limité leurs requêtes, tantôt implicitement tantôt explicitement, à un ensemble de sites susceptibles de satisfaire des seuils établis par règles de sûreté et de protection de l'environnement. » (nous traduisons)

Critères (EC, 1979)	Roche	Formation	Environnement
Attributs de sûreté vav de (SR 3, 2010)			
Isolation			
Confinement			
(R2) – transport diff. (Pe)	Kh, Kv (m/s) low	Kv : $2 \cdot 10^{-12}$ m/s Grad. = 3m/100m (Boom Clay, Mol, today)	Grad. hyd. (m/m) low
(R3) – retardation			
— ...			
Robustesse			
Démonstrabilité			

437

la roche dont la formation est issue mais aussi par l'existence d'un faible gradient hydraulique dans l'environnement de cette formation en vue d'assurer un *nombre de Péclét* faible. Si la dépendance entre différents systèmes des critères choisis en vue d'un screening n'est pas en soi problématique et tendrait même à souligner une certaine congruence de pensée au fil du temps, il en va autrement de la dépendance des critères au sein d'un même système. Dans notre exemple, ce sont les critères sur la roche et l'environnement qui construisent le critère sur la formation. Dans l'analyse de la guidance SR 3, nous avons également relevé cette « nécessaire redondance » de certaines recommandations car elles étaient jugées d'égale pertinence dans plusieurs catégories. Cette interdépendance des critères souligne le caractère quelque peu artificiel de l'exercice de comparaison ou, plus exactement, questionne la rigueur d'une analyse systématique en tant que cadre normatif conduisant au choix de la *meilleure roche*. Cet exemple met en évidence le caractère non univoque du référentiel des critères et fait de celui-ci un objet d'exégèse. Bien qu'il manipule des données scientifiques et techniques, le référentiel n'est en lui-même pas un objet de science mais bien un outil de stratégie. En tant que tel, il contient des présupposés et, derrière le choix arbitraire des critères, se cachent des préférences non exprimées.

Le tableau comparatif des roches hôtes suppose une consolidation des propriétés retenues comme critères en vue d'évacuer toute redondance (i.e., « tableau d'attributs consolidés », voir annexe 6) mais le tableau préparatoire, repris dans l'annexe 5, montre qu'un sous-principe de sûreté comme la « stabilité géologique », considéré parfois comme critère de sélection (EC, 1992), est tout aussi pertinent vis-à-vis du pilier de sûreté « isolation » que vis-à-vis du principe de sûreté « robustesse », comme le montre d'ailleurs le découpage de la guidance SR 3 présenté précédemment. D'autres propriétés, comme la profondeur, par exemple, peuvent être perçues dans des contextes radicalement différents : par rapport au risque d'intrusion humaine « banale », par rapport au risque d'érosion à long terme ou encore par rapport à des contraintes de faisabilité. Cette propriété disposant de plusieurs valeurs-limites selon les cas ne peut donc vraisemblablement pas se réduire à une seule occurrence *décontextualisée*. En fonction de l'approche choisie, il pourrait ne pas être anodin de classer une propriété, et les valeurs-limites qui lui sont associées, comme soutenant

un principe plutôt qu'un autre et ce, en fonction de l'importance que l'on aura conférée *a priori* audit principe. Il nous paraît difficile de nous affranchir d'une part d'arbitraire ou de subjectivité dans l'exercice de comparaison. Pourtant, Bel V, filiale de l'AFCN commente la définition de l'attribut de sûreté³⁷⁸ de la façon suivante :

« (...) *Furthermore, the part of this sentence* [Depending on the attribute concerned, the scoring or ranking process may lie anywhere in the range from entirely objective to entirely subjective] *on the 'objective' or 'subjective' basis is not acceptable as only objective arguments should be used in the process. The last sentence on the weighing factors and, in particular, the link between the unmeasurable character of an attribute and weighing factors, is not understood by Bel V.* » (Bel V, 2019, **nous soulignons**)

Cette remarque nous paraît l'héritière d'un positivisme un peu simpliste qui semble vouloir établir un lien direct entre objectivité et vérité ou objectivité et démonstration. Cette critique semble nier que la « *controverse est le milieu natal du fait* » (Stengers, [1997] 2002, p. 55) et rêve de l'univocité d'une solution à un problème de décision. Or, l'objectivité visée est celle à laquelle doit prétendre un fait afin d'être qualifié de scientifique et pouvoir ainsi être mis à l'épreuve. Mais cela ne vaut que pour le dispositif expérimental d'un laboratoire qui convoquerait un phénomène particulier sous des conditions contrôlées ou pour un modèle (très) simplificateur d'une réalité soumise à l'examen. Cette objectivité scientifique est donc quelque peu mise à mal dans un problème de décision. Comme le souligne Abraham Moles, un problème de décision se distingue de l'expérience de laboratoire à deux niveaux : la complexité plus grande du modèle de décision par rapport au « *réductionnisme accepté* » du laboratoire et le passage de l'observation descriptive au jugement normatif qui accompagne la décision (Moles, 1995, p. 163). L'analyse systématique n'accouchera vraisemblablement pas d'une et une seule solution robuste mais bien de solutions multiples induites par des présupposés, des préférences nécessairement subjectives instillées au cours de la construction du référentiel de choix.

³⁷⁸ Voir note de bas de page n° 352.

10.4.5 Les résultats après application des critères d'exclusion

Les résultats obtenus après l'application des critères d'exclusion sont détaillés dans nos précédents travaux (ONDRAF, 2017b), nous n'en commentons ici que les conclusions.

Les évaporites belges du domaine varisque ont été rejetées sur la base des attributs de sûreté *dissolution*, *homogénéité*, *épaisseur*, *géométrie*, *prédictibilité*, *retour d'expérience* et *conflit de ressources* et les évaporites triassiques, sur la base des attributs *homogénéité* et *épaisseur*. Cette méthodologie d'exclusion nous a permis de reconstruire les résultats de l'étude européenne de 1979. Si ceux-ci ne créent pas la surprise, ils sont cette fois obtenus selon une approche transparente, employant les critères de l'étude de 1979 mais aussi les critères retenus par d'autres programmes nationaux. L'approche méthodologique a gagné en systématisme et les résultats, bien qu'identiques, ont été mis à jour grâce aux connaissances engrangées depuis.

Les roches cristallines ont été exclues sur la base de critères géométriques pour les intrusions du Massif du Brabant et sur la base de critères de faisabilité technique pour le batholite granitique identifié déjà dans l'étude européenne. Là encore, les résultats sont similaires à ceux de 1979 mais l'exclusion du batholite ne s'est pas faite sur la base du défaut de connaissance comme ce fut le cas à l'époque – argument qui aurait été déclaré invalide par l'AFCN – mais bien par la prise en compte de critères de génie minier. L'approche méthodologique paraît donc plus rigoureuse et intègre les données géologiques mises à jour. Notons que cette exclusion est contestable même si elle paraît raisonnable en première instance. En effet, les propriétés géométriques des intrusions cristallines ont été comparées aux dimensions du futur stockage belge calculées sur la base de l'inventaire des

déchets (i.e. une donnée robuste³⁷⁹) et d'une architecture de dépôt dans les argiles peu indurées (i.e. une donnée contingente³⁸⁰). On pourrait objecter que cette architecture n'est pas transposable aux roches cristallines et qu'elle pourrait même avoir une tout autre allure dans celles-ci. Notons que cet argument n'aurait qu'une valeur théorique étant donné l'extension très limitée des intrusions cristallines et l'impossibilité technique d'y construire quelque installation de stockage que ce soit.

Les roches pélitiques recouvrant un spectre allant de l'argile peu indurée à l'ardoise (slate) en passant par les shales ou argilites³⁸¹ ont été largement retenues dans la mesure où aucun critère ne pouvait défendre une exclusion *a priori*.

La synthèse des résultats est consignée dans le tableau 10-7 ci-dessous qui reprend les faciès lithologiques belges correspondant aux différentes roches identifiées ainsi que leurs analogues étrangers.

³⁷⁹ Cette donnée, bien que jugée robuste, est toutefois sujette à variations. L'inventaire est calculé sur la base d'une production nucléaire s'arrêtant en 2025 sans préjuger d'une éventuelle prolongation des centrales. Pour pallier cette incertitude, des galeries supplémentaires sont prévues. Certains déchets initialement destinés au stockage de surface (déchets A) pourraient, après évaluation et décision de l'AFCN, être jugés inadmissibles au stockage et devoir faire l'objet d'une requalification en déchets B, destinés au stockage géologique. Certains déchets radifères qui, en règle générale, devraient être stockés en subsurface sur le site de l'union minière qui les a produits (Haverkamp *et al.*, 2006) pourraient néanmoins rejoindre le stockage géologique, après évaluation. Toutes ces incertitudes doivent être couvertes par le processus de « design-out » consistant ici, en un surdimensionnement de l'installation géologique.

³⁸⁰ *A priori* l'architecture développée pour ce type de roches n'est pas immédiatement transposable pour d'autres. En première approximation cependant, on peut supposer que les différences en matière d'encombrement ne seraient pas significatives.

³⁸¹ Pour la distinction shale/argilite et sa controverse, voir (ONDRAF, 2017b, pp 46-47).

Tableau 10-7 – Synthèse des roches/formations retenues comme potentielles roches hôtes (en vert) et formations exclues (en rouge) sur la base des attributs de sûreté confrontés aux guidances internationales (ONDRAF, 2017b).

Pélites								
Shales						Slates		
Méso- zoïques	Paléozoïques					Paléozoïques		
Bassin de Mons, Gaume, plateau de Herve	Série silur. socle Brab.	Assise de Matagne	Groupe famen.	Format. eifelien. de Jemelle	Format. argileuses du Carbon. (Chokier, Châtelet)	Ceinture cambrienne Brabant	Ceinture slates haute Ardenne	Massifs Rocroi et Stav.
<u>Analogues internationaux</u>								
Cox (FR), Opalinus (CH), Tournemire (FR)	Canada, Hongrie							Slates de Revin (FR)
Pélites (suite)								
Argiles peu indurées (argiles plastiques du Cénozoïque)								
Eocène					Oligocène (Rupélien)			
Argile yprésienne (argile des Flandres)					Argile de Boom			
Nord-ouest de la Belgique (formation de Courtrai, Kortemark member, ...)					Campine (région de Mol-Dessel, Nord de la province d'Anvers, ...)			
<u>Analogues internationaux</u>								
Argile de Londres (UK)					Argile de Boom (NL)			
Evaporites			Roches cristallines					
Dévonien-Carbonifère (varisque)	Trias		Roches volcaniques interstratifiées (laves, tuffs, brèches)		Intrusions hypabyssales (dykes, laccolithes, ...)		Fondement granitique	
Bassin de Namur, Formation de Saint-Ghislain	Bassin de la Campine (formations de Rôt, Muschelkalk, Keuper)		Arkoses du Devillien, roches effusives siluriennes du Massif du Brabant		Partie méridonale du Massif du Brabant (Quenast, Lessines, Bierghes)		Batholithe (structure en horst supposée)	
Attributs de sûreté entraînant l'exclusion								
Épaisseur (80 m) <200 mètres ; déformation élevée, grandes discontinuités	Epaisseur (max. 125 m) < 200 m		Epaisseur (10 m) << 500 m		Conflit de ressources		Profondeurs extrêmes > 1 200 m	

Après avoir appliqué les critères d'exclusion, ce sont les critères génériques qui doivent à présent être mobilisés afin de procéder à une comparaison des roches lauréates. La méthode naturellement plébiscitée par la définition de l'attribut de sûreté est l'analyse multicritères, rejoignant en cela les techniques d'aide à la décision exposées par la publication 101 de la CIPR (ICRP, 2006). Son application dans le cadre de l'optimisation de la roche hôte est discuté dans la section suivante.

10.4.6 Application des critères génériques : analyse multicritères et optimisation³⁸²

Comme nous l'écrivions précédemment, l'analyse multicritère est une méthode préconisée par la CIPR pour mettre en pratique l'optimisation (ICRP, 2006). Nous mentionnons notamment les difficultés de mise en œuvre liées à la délimitation d'attributs pertinents, la collecte des données de base, la prise en compte des incertitudes et la traduction de jugement de valeur de manière quantitative. Le problème d'optimisation sous contrainte est un problème de recherche opérationnelle et celle-ci a fait l'objet de nombreuses critiques depuis les années septante. Parmi ces critiques, notons la simplification des modèles par rapport à la réalité et l'inadéquation des solutions optimales à celle-ci, c'est-à-dire la difficulté de mise en application (Vincke, 1991). Bien que la CIPR considère l'analyse multicritère comme une technique d'optimisation, rappelons que de nombreux auteurs les distinguent pourtant, distanciant la première de la seconde afin « *d'intégrer ce qui n'a pas de prix ni même de cours financier* » (Ben Mena, 2000) ou tout simplement parce qu'« *il n'existe pas, en général, de solution meilleure que toutes les autres simultanément pour tous les points de vue : le concept de solution optimale n'a donc pas de sens dans un contexte multicritère* » (Vincke, 1991). Sans doute conviendra-t-il de nuancer car l'optimisation peut être multi-objectif, c'est-à-dire chercher à optimiser simultanément plusieurs critères en général conflictuels (Boussaïd, 2013 ; Vincent, 2013).

³⁸² Les réflexions de cette sous-section, menées en décembre 2020, sont notamment le fruit de nos travaux en cours à l'ONDRAF. Ces derniers devront être publiés, pour ce qui concerne la partie opérationnelle de l'analyse multicritères, dans le courant de l'année 2022.

Sans tenter d'entrer dans un débat de spécialistes en recherche opérationnelle, il est cependant intéressant d'observer que l'évolution des méthodes, depuis l'optimisation mono-objectif – qui consiste à rechercher le minimum ou le maximum, sous contraintes, d'une fonction objectif ou fonction d'utilité – jusqu'à l'analyse multicritère, met en évidence une série de constats qui sert notre réflexion. Un premier constat vient du fait qu'un problème multicritère peut être considéré comme un problème mathématiquement mal posé³⁸³ (Hadamard, 1907) car il ne possède pas de solution objective et donc de solution universellement meilleure (Vincke, 1991). Après s'être intéressé à la génération de solutions dites « efficaces »³⁸⁴ au sein desquelles une solution satisfaisante pour le décideur peut être trouvée (Phua *et al.*, 1992, p. 330), il a fallu adjoindre, à la recherche opérationnelle, la modélisation des préférences (du décideur) et progressivement, afin de rendre les modèles plus réalistes, abandonner l'idée de fournir la solution de tout problème de décision en traduisant celui-ci sous la forme d'une optimisation. L'objectif de la recherche opérationnelle se changea alors en une aide au décideur afin d'élaborer sa solution préférée en tenant compte des aspects imprécis et multicritères de la réalité.

Il semble que nous devons ici prendre le temps d'une nouvelle réflexion. En renseignant les méthodes d'analyse multicritères comme techniques d'aide à la décision en vue de mettre en œuvre le principe d'optimisation, nous constatons que la CIPR mélange quelque peu les genres. Ce fait n'est pas tout à fait nouveau puisque nous avons relevé qu'aux côtés d'un principe d'optimisation strict, issu du paradigme ALARA, une autre lecture du principe avait vu le jour et se profilait à l'aune de la sûreté comme un principe directeur de développement des systèmes. Nous n'y reviendrons plus ici. Nous constatons, simplement et derechef, une prolongation de l'ambiguïté

³⁸³ La notion de problème bien posé a été introduite par Hadamard (Hadamard, 1907). Il s'agit d'un problème dont :

- La solution existe
- La solution est unique
- La solution dépend de façon continue des données (les fonctions de x sont supposées régulières c'est-à-dire continues ainsi que leurs dérivées jusqu'à un certain ordre).

³⁸⁴ Une solution a est efficace lorsqu'il n'existe aucune autre solution b telle que $g_i(b) \geq g_i(a)$ pour tout i et $g_k(b) > g_k(a)$ pour au moins un k , $g_1, g_2, \dots, g_n$ étant les fonctions (critères) que l'on désire maximiser.

de la doctrine jusque dans les outils de mise en œuvre qu'elle préconise. S'il semble dès lors difficile de soutenir, sans précaution oratoire, l'analyse multicritère comme la technique de choix de l'optimisation sous peine de se heurter, sinon à une contradiction historique, à tout le moins à quelques critiques, il paraît tout autant périlleux de clamer l'existence d'une solution optimale sous tous rapports ou, si tant est qu'on en lui concéderait l'existence, d'établir qu'il est toujours possible de la connaître ou qu'elle est réellement unique. Le jeu des préférences ou celui de la pondération des critères possède une extériorité qui peut relever d'une *autre* subjectivité que celle ayant conduit à retenir des paramètres dans l'évaluation, eux-mêmes pouvant faire l'objet d'une pré-orientation conditionnée par le décideur.

La question qui se pose ici semble séparer une nouvelle fois l'AFCN et l'ONDRAF. Est-ce que l'agence de sûreté entend l'analyse multicritère et l'optimisation d'une seule et même oreille et clame donc que la première sert la seconde, à la découverte de *la* solution ou est-ce que c'est l'Organisme qui polémique et pinaille en feignant de ne pas comprendre la différence entre l'esprit et la lettre de l'exigence d'optimisation ? Plus fondamentalement, et c'est l'enjeu de cette étude de cas, est-ce que l'analyse multicritère peut, même appliquée avec une part de subjectivité, dans le contexte précis de la comparaison des roches hôtes, conserver un semblant de sens ? Dans l'affirmative, il se pourrait qu'une voie de réconciliation se dessine, à condition de pouvoir réunir les protagonistes autour de l'évidence d'une impossibilité d'optimiser au sens strict mais bel et bien d'une possibilité de cadrage, une sorte de quête *optimisante* comme une aide à la décision et dont les règles du jeu auraient préalablement été agréées par toutes les parties. Dans la négative, le fossé se creusera au risque de mettre à mal l'idée, tout autant que la forme, de l'optimisation dans une comparaison aussi complexe que le choix d'une roche hôte.

Entrons dans le détail de l'analyse multicritère. Les méthodes d'aide à la décision sont traditionnellement classées en trois catégories, les méthodes de l'utilité multi-attribut, les méthodes de surclassement et les méthodes interactives (Vincke, 1991). Toutes ces méthodes visent à porter soit un jugement relatif en établissant qu'une alternative est meilleure qu'une autre, soit un jugement absolu afin de trouver une « bonne » alternative en tenant compte de la diversité des conséquences et, le cas échéant, en interagissant

avec les acteurs qui en sont affectés. Toute démarche d'évaluation multicritère suit un processus systématique en trois étapes qui commence par la structuration du problème d'évaluation, se poursuit par le développement d'un modèle d'évaluation afin de pouvoir finalement élaborer des recommandations. Ces trois étapes sont représentées dans la figure 10-1 ci-dessous.

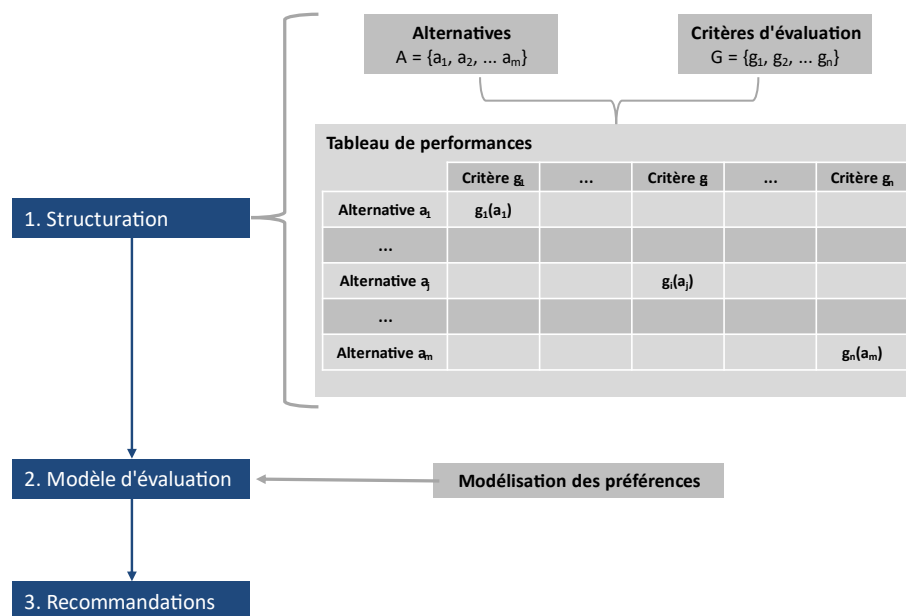


Figure 10-1 – Aperçu des différentes étapes d'un processus de décision multicritères (Montignac et al., 2009). L'ensemble A décrit les alternatives en jeu et l'ensemble G , les critères d'évaluation. Pour chaque critère g_i , nous avons des éléments qui permettent de donner une valeur à chacune de ces alternatives. On note $g_i(a_j)$ l'évaluation de l'alternative a_j par rapport au critère g_i . Le tableau de performance regroupe les critères et les alternatives. Chaque cellule du tableau est occupée par les valeurs $g_i(a_j)$. Ces dernières ne doivent pas être considérées comme des valeurs précises, mais seulement comme des ordres de grandeur résultant du niveau de connaissance de l'étape du programme en question. Ces critères peuvent être quantitatifs ou qualitatifs.

Dans le cas qui nous occupe, l'ensemble A désigne les roches hôtes alternatives préalablement identifiées après l'application des critères d'exclusion, à savoir l'argile de Boom, l'argile yprésienne, les shales

mésozoïques, les shales paléozoïques et les slates. Les critères d'évaluation constituant l'ensemble G sont les attributs de sûreté (voir annexe 7), c'est-à-dire une soixantaine de *paramètres* physico-chimiques que nous avons regroupé selon leur pertinence, sous les piliers ou principes de sûreté dérivés de la définition même d'attribut : le confinement, l'isolation, la robustesse et la démontrabilité. On suppose évidemment que, pour chacun des critères (attribut), on dispose d'éléments qui permettent de donner une valeur à chacune des alternatives, c'est-à-dire de donner une valeur à $g_i(a_j)$. Chaque critère est exprimé dans une unité qui lui est propre. Dans notre cas d'étude, on parlera de *score du paramètre* pour chacune des catégories de roches hôtes (i.e. les alternatives), c'est-à-dire la valeur $\gamma_i g_i(a_j)$, après avoir « traduit » la valeur réelle du paramètre physico-chimique en une nouvelle échelle traduisant son côté favorable ou non par rapport au pilier ou principe de sûreté ou une de ses (sous-)catégories considérées. Si, en théorie, il nous faut supposer la possibilité d'attribuer une valeur, nous avons observé qu'en pratique, cela n'était pas toujours possible et que le critère pourtant retenu *ab initio* devait parfois, en pratique, être ignoré ou neutralisé³⁸⁵. Les valeurs des paramètres $g_i(a_j)$ forment le tableau de performances. Ces valeurs $g_i(a_j)$, d'où sont issus les scores, ne sont pas nécessairement des valeurs précises, elles peuvent constituer simplement des ordres de grandeurs ou refléter, de manière semi-quantitative, un jugement d'expert, à défaut de disposer de valeurs tangibles sur lesquelles s'appuyer formellement. Elles pourraient être également totalement qualitatives s'il s'agissait de se référer à une conformité d'un système ou à une qualité particulière d'un matériau par exemple. L'ensemble de ces opérations constitue la phase de structuration.

Afin de procéder à l'évaluation qui constitue l'étape suivante, il faut non seulement utiliser les performances attribuées à chaque alternative en fonction des critères donnés mais aussi tenir compte des préférences. La valeur portée à chacun des critères définissant ainsi son importance relative de même que le jugement porté sur la performance participent de la

³⁸⁵ La neutralisation d'un paramètre signifie que toutes les alternatives reçoivent la même valeur pour ce paramètre. Remarquons que l'impact n'est pas le même selon qu'on ignore tout simplement le critère et qu'on ampute dès lors le principe de sûreté de l'un de ses paramètres - ce qui a pour effet de majorer l'importance relative des autres - ou selon qu'on neutralise ledit critère en attribuant le même score à toutes les alternatives, conservant ainsi l'importance relative de chaque attribut dans la catégorie du principe de sûreté considéré.

modélisation des préférences. Dans l'étude de cas qui nous occupe, en plus des préférences en partie exprimées par le jugement sur les performances sous la forme des scores, nous avons également donné des valeurs (ou pondérations) aux catégories sous lesquelles nous avons agrégé les paramètres, c'est-à-dire les principes et piliers de sûreté.

Il existe *a priori* deux grandes familles de méthodes permettant d'exploiter l'information contenue dans le tableau de performances et de modéliser les préférences. Ces méthodes sont soit ordinales (de surclassement) qui reposent sur l'agrégation des ordres induits par les valeurs de performance des alternatives, soit cardinales (avec un critère unique de synthèse) qui agrègent l'information sous la forme d'une échelle unique à partir des valeurs de performances des alternatives (Montignac *et al.*, 2009). Dans la comparaison systématique des roches hôtes, c'est une sorte d'hybridation qui a été utilisée vu l'hétérogénéité dans l'évaluation des critères ainsi que leur grand nombre (plaidant pour une méthode ordinale) mais aussi le souhait d'élaborer une échelle unique mesurant les préférences.

La formule ci-dessous a donc été appliquée :

$$v(a_j) = \sum_{i=1}^n w_i v_i(g_i(a_j)) \quad \text{Equation 10-2}$$

où $g_i(a_j)$ est l'évaluation de l'alternative a_j sur le critère g_i . i , indice des critères, va de 1 à n et j , indice des alternatives, va de 1 à m . v_i est une fonction qui remplace les échelles brutes de mesure g_i en une échelle unique de préférences par rapport à la propriété à l'examen. w_i est un facteur de pondération (constante d'échelle).

Les valeurs $v_i(g_i(a_j))$ ont été issues d'un tableau de performances par jugement d'expert décidant, en fonction des valeurs physiques de paramètres $g_i(a_j)$, si celles-ci œuvraient dans un sens positif ou négatif par rapport aux principes ou piliers de sûreté considérés. Dans l'étude de cas, différentes (sous-)catégories ont dû être utilisées afin d'augmenter la granularité de ces principes et piliers de sûreté afin de traduire les exigences de la guidance SR 3 de l'AFCN. Chacune de ces (sous-)catégorie est une recommandation spécifique de l'AFCN.

Le tableau 10-8 ci-dessous, issu de la feuille de calcul de l'analyse multicritères permet de s'en faire une idée plus précise (ONDRAF, 2022c).

Chaque paramètre est repris sous une catégorie constituée par une recommandation de l'AFCN, elle-même reprise sous un principe ou un pilier de sûreté. Pour un pilier de sûreté, cinq catégories ont été prévues correspondant aux recommandations suivantes de l'AFCN : *écoulement d'eau limité, présence limitée de vides, conditions géochimiques de l'eau de pore, capacité de tampon chimique et retard, traduisant les phénomènes divers de sorption en fonction des minéraux présents dans la roche*. Les options A, B, C, D et E représentent les différentes catégories de roches hôtes retenues comme alternatives après l'exercice de screening utilisant les critères d'exclusion. Les valeurs en regard de chaque paramètre, pour chacune des options, ne correspondent pas à des valeurs physiques mais bien à des scores (de 1 à 10) attribués afin de traduire l'importance de la contribution du paramètre à la catégorie (i.e. recommandation AFCN) qui le reprend. Ainsi, dans l'exemple de la figure 10-2, une conductivité hydraulique bénéficiant d'un score proche de 10 signifie qu'elle contribue fortement à limiter l'écoulement d'eau. Ce score est maximum pour l'option C, reste excellent pour les options A, B et E mais n'est que moyen pour l'option D.

Tableau 10-8 – Extrait de l'analyse multicritères portant sur la comparaison des roches hôtes. A désigne l'alternative (option) « argile de Boom », B l'argile yprésienne, C les shales mésozoïques, D les shales paléozoïques et E les slates. Le « Confinement » est le premier pilier de sûreté sous lequel on peut lire « 1.1 Ecoulement d'eau limité », (sous-)catégorie, correspondant à une instruction issue de la guidance SR 3 de l'AFCN. Le pilier « Confinement » possède cinq sous-catégories (non représentées ici) dont seule la première « 1.1 Ecoulement d'eau limitée » est visible ici. De 1.1.1 à 1.1.9 sont répertoriés les paramètres pertinents pouvant avoir une incidence sur cet écoulement. Un sous-total est calculé afin de donner un score à l'ensemble des paramètres actifs pour une recommandation donnée. Le paramètre 1.1.8 (situation hydrogéologique) est neutralisé car il est dépendant du site choisi. Un grand total (non représenté sur la figure) rassemble tous les paramètres utiles au confinement et ainsi de suite, pour tous les piliers et paramètres de sûreté. Les scores vont de 1 à 10. 10 décrit la situation jugée la plus favorable, correspondant à la performance de l'option (A, B, ...) en regard de l'attribut considéré, 1 décrit la situation la plus défavorable.

Number (Pillars safety principles)	O/N value / Attribute group (FANC references) / safety attribute	Options				
		A	B	C	D	E
1	Confinement					
1.1	Ecoulement d'eau limité					
1.1.1	Conductivité hydraulique (m/s)	9	9	10	5	8
1.1.2	Porosity η (%)	2	1	7	9	10
1.1.3	Density (kg/m ³)	2	1	6	9	9
1.1.4	D _{eff} (m ² /s)	1	1	5	3	10
1.1.5	Average clay content	3	5	3	4	4
1.1.6	Transmissivité des zones fracturées (m ² /s)	10	10	7	7	7
1.1.7	Gradient hydraulique	10	7	7	7	7
1.1.8	Hydrogeological situation (Pe)					
1.1.9	Placeholder for extra attribute					
Attribute group sub-total		37	34	45	44	55

Ces scores sont attribués après un jugement d'expert fondé sur les valeurs physiques connues ou supposées des paramètres. Plus la conductivité hydraulique d'une roche est basse, plus elle contribue, *ceteris paribus*, à limiter l'écoulement d'eau. Toutefois l'impact relatif d'une variation de la valeur physique du paramètre sur la catégorie considérée (i.e. recommandation AFCN) et ce, pour l'ensemble des roches correspondant à l'option étudiée (A, B, ...), nécessite un « traitement » relevant du jugement d'expert. Ainsi par exemple, les valeurs de conductivités hydrauliques vis-à-vis de l'exigence de limitation de l'écoulement peuvent se hiérarchiser comme suit (figure 10-2) :

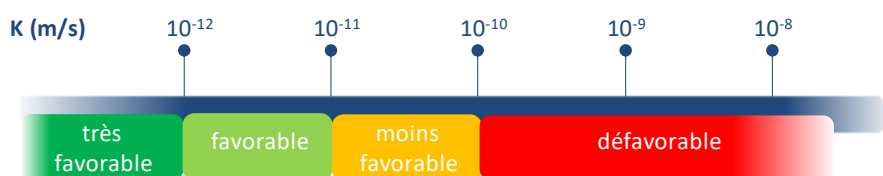


Figure 10-2 – Proposition de classement des valeurs de conductivités hydrauliques par rapport à l'exigence de limitation de l'écoulement d'eau de la Nagra (Depaus, 2017a)

Ce qui peut conduire à la proposition suivante (figure 10-3) suivante :

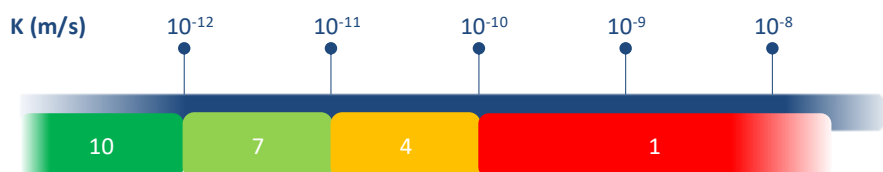


Figure 10-3 – Correspondance entre le jugement qualitatif et le score attribué au paramètre « conductivité hydraulique » (Depaus, 2017a)

Avec une règle d'interpolation qui tente de refléter la réalité des valeurs et l'impact des valeurs intermédiaires (figure 10-4) :

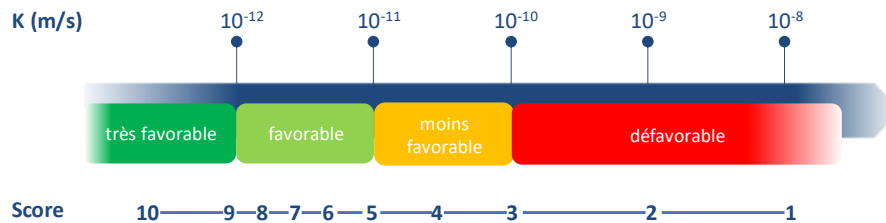


Figure 10-4 – Diagramme représentant une façon d'établir une correspondance entre les valeurs réelles d'un paramètre (conductivité hydraulique) et le scoring quantitatif se référant à son caractère favorable par rapport à une propriété/un principe de sécurité (ici, le confinement). D'après le diagramme, une meilleure discrétisation est proposée du côté favorable, tandis que les faibles scores sont conservés pour les valeurs défavorables du paramètre (Depaus, 2017a)

Il s'agit ici d'une évaluation quantitative. Certains paramètres ne bénéficient pas de valeurs définies et des schémas semi-quantitatifs doivent donc être élaborés. Des scores doivent pouvoir être également attribués en l'absence de valeurs connues pour peu que celles-ci puissent être appréhendées de manière indirecte et donner lieu à un classement (méthode ordinale) des différentes options retenues. Nous n'entrons pas ici dans la description détaillée de la méthode du score pour chaque paramètre ayant servi à la comparaison des roches hôtes mais nous nous contentons de relever qu'une part importante de la méthode est dévolue au jugement d'expert et à l'appréciation subjective qui en résulte. Même si l'analyse multicritère est chiffrée, elle n'en demeure pas moins une méthode d'aide à la décision et ne constitue, en aucun cas, une mathématisation totalement rigoureuse du choix final.

En ce qui concerne les valeurs $v_i(g_i(a_j))$, elles sont calculées pour chaque groupe de paramètres (constitué des sous-groupes) auquel une pondération w_i est assignée. Chaque groupe disposant d'un nombre différent de paramètres, une opération de normalisation peut être effectuée préalablement afin de ne pas surreprésenter un groupe disposant de beaucoup de paramètres par rapport à un groupe qui n'en disposerait que de quelques-uns ou, inversement, diluer l'importance relative d'un

paramètre dans une liste d'autres paramètres contribuant moins significativement à la propriété considérée. Dans l'évaluation des roches hôtes, différents modes de pondération sont proposés, après normalisation des données (e.g. *equal weighting*, *confinement and robustness biased*) ainsi qu'une évaluation sans normalisation et sans pondération qui reflète l'impact des données brutes (*unweighted raw scores*)³⁸⁶.

La dernière étape consiste en la formulation de recommandations. L'analyse multicritères effectuée pour la comparaison des roches hôtes a proposé différentes évaluations en fonction de l'importance accordée à chaque pilier ou principe de sûreté. Il s'agit donc de différentes simulations en fonction des préférences décidées a posteriori.

En outre, l'incertitude pesant sur chaque option en fonction du degré de connaissance de celle-ci pour les paramètres retenus peut considérablement affecter la recommandation finale³⁸⁷. Dans la section suivante, nous commenterons les résultats sans représentation explicite des incertitudes afin de ne pas compliquer inutilement le propos.

10.4.7 Evaluation des résultats des premières simulations

Nous présentons dans cette section les résultats de l'analyse multicritère effectuée sur le choix de la roche hôte conformément à une méthodologie élaborée au départ des recommandations de l'AFCN. Afin de montrer les limites d'une telle approche, nous avons choisi de varier les pondérations des différents piliers et principes de sûreté. Ces variations ont pour but de montrer quels seraient les résultats si l'on choisissait de privilégier telle ou telle propriété du système en regard de la sûreté (ONDRAF, 2022c).

Nous commentons en une fois les résultats normalisés et non normalisés pour une pondération non sélective des piliers et principes de sûreté (i.e.

³⁸⁶ Voir annexe 7.

³⁸⁷ L'annexe 7 rapporte les simulations sans incertitude et l'annexe 8 les simulations en tenant compte des incertitudes.

même pondération pour chaque pilier ou principe). Un classement se dégage (voir figure 10-5) :

$E > A > B = D > C$.

où « > » désigne la préférence.

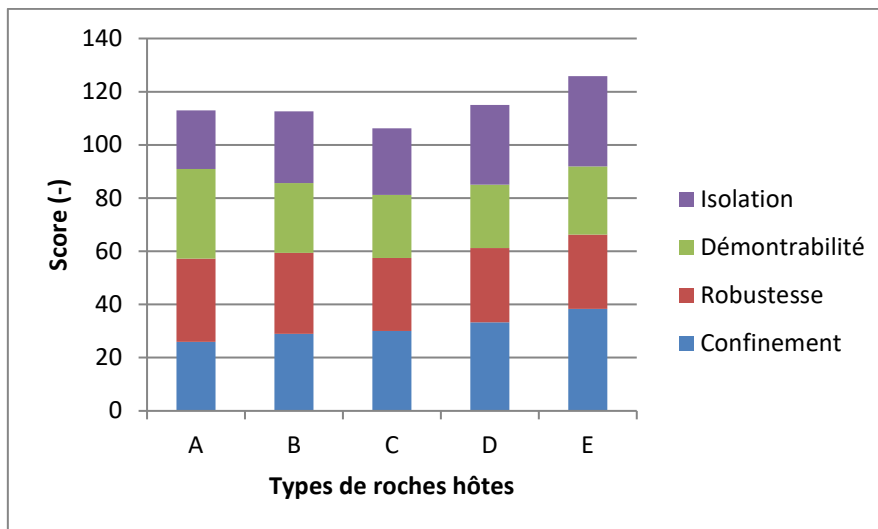


Figure 10-5 – Illustration des scores obtenus pour chaque option A, B, C, D et E en fonction des piliers et principes de sûreté : isolation, confinement ; démontrabilité et robustesse. A désigne l'alternative « argile de Boom », B l'argile yprésienne, C les shales mésozoïques, D les shales paléozoïques et E les slates. Le graphique se rapporte aux données normalisées. Aucune pondération préférentielle n'a été attribuée aux principes/piliers de sûreté.

Malgré la possibilité de hiérarchiser les options, l'option E apparaissant comme la meilleure, il n'y a pas de tendance flagrante qui se dégage et la prise en compte des incertitudes – plus grandes pour l'option E et moindres pour l'option A – pourrait relativiser le classement, en faisant par exemple pencher la décision vers l'option A plus robuste sur le plan de la connaissance. L'option A est celle de l'argile de Boom bien cernée après 40 ans de recherche et l'option E correspond au schiste ardoisier (ou *slates*) potentiellement prometteur. Certaines propriétés de ce dernier peuvent être supérieures à celles de l'argile de Boom mais elles n'ont été que très peu

voire jamais étudiées dans la perspective d'un stockage³⁸⁸. Cependant la disponibilité des *slates* à grande profondeur et les puissances potentielles³⁸⁹ importantes peuvent laisser penser qu'une grande isolation et un grand confinement puissent être trouvés, toutes choses étant égales par ailleurs³⁹⁰. Une incertitude importante consiste en la présence ou non de fractures à grande profondeur. Les ardoises étant connues pour leur schistosité, celle-ci pourrait constituer des chemins préférentiels de migration des radionucléides. Toutefois, des blocs d'ardoise massifs ont été extraits d'anciennes exploitations comme celle de Warmifontaine en Belgique et ceci laisse penser que de tels blocs homogènes, non fissurés, pourraient se trouver à grande profondeur et être propices à l'établissement d'un stockage.

Les options B et D semblent équivalentes avec une incertitude plus importante sur l'option D (shales paléozoïques), pour des raisons similaires à celles précédemment énoncées. Les options A et B ayant été celles privilégiées par l'ONDRAF, il est normal que les incertitudes à leur endroit soient moindres (voir figure 10-6). Il est surprenant de constater que l'option C représentative des shales mésozoïques pour lesquels des analogues suisse et français existent soit moins favorisée par l'analyse. Vu toutes les réserves d'usage, il serait abusif de soutenir que l'argile de Boom belge est nécessairement meilleure que l'argile d'Opalinus suisse ou l'argile callovo-oxfordienne française.

³⁸⁸ Exception faite des schistes de Revin en France.

³⁸⁹ Il ne s'agit pas d'un pléonasme, la puissance étant un terme géologique afin de désigner l'épaisseur d'une couche ou d'une série de couches mesurée perpendiculairement à la stratification (Foucault et Raoult, 1995). Il s'agit donc de l'épaisseur réelle par opposition à l'épaisseur apparente éventuellement renseignée par un forage oblique.

³⁹⁰ Ce qui est en l'espèce impossible, la seule propriété d'auto-scellement de l'argile de Boom (*self-sealing*) par exemple étant supérieure à celle de tous ses concurrents.

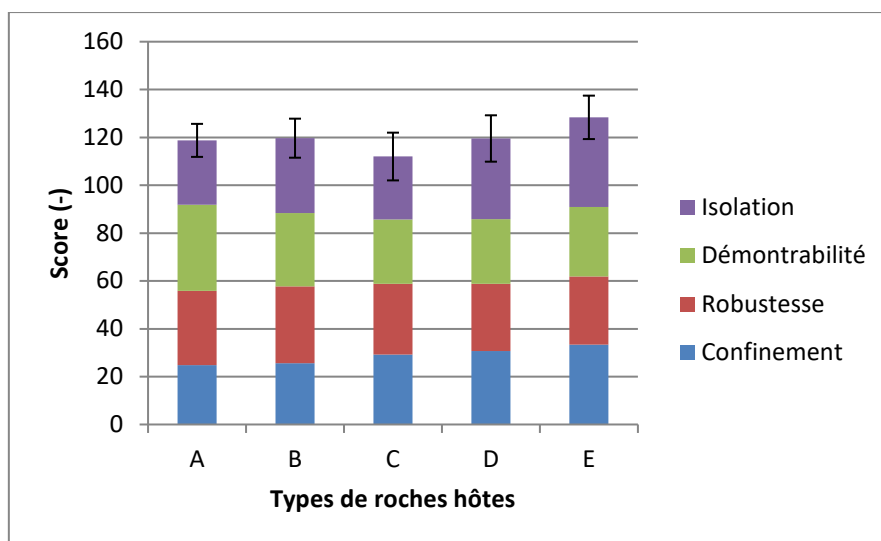


Figure 10-6 – Même illustration que la figure précédente avec barres d'erreur. Une légère différence peut être observée dans la hauteur des bâtonnets de l'histogramme. Celle-ci s'explique par le choix d'une valeur dite « best estimate », pour les différents paramètres, dans le premier graphique versus le choix d'une valeur moyenne $\pm$ incertitude, dans le présent graphique. La valeur moyenne ne correspond pas toujours exactement à la valeur best estimate. Par exemple, le score de la conductivité hydraulique a pu être estimée à 8 ± 1 ou à 9 (best estimate).

Il ressort de cette première évaluation qu'un seul type de pélites pourrait proposer une configuration de sûreté éventuellement meilleure que celles étudiées jusqu'ici par l'ONDRAF, $E > A$, les autres options étant soit équivalentes ($D = B$; $D = A$) soit inférieures ($A > C$). Ce premier résultat renferme deux questions :

- Est-ce que l'option E sera, après évaluation fine, effectivement supérieure à l'option A, une fois que les incertitudes autour de l'option E auront été amenées à un niveau équivalent à celles de A ?
- A quel coût sociétal cette mise à niveau pourra-t-elle s'envisager ?

La première question est épistémologique et pourrait même revenir à se demander s'il sera à jamais possible de trouver une solution foncièrement meilleure, étant donné l'existence d'une bonne solution de départ A et la difficulté de ramener le niveau d'incertitudes sur E à un niveau comparable à A. Peut-on en effet imaginer construire un laboratoire souterrain

équivalent à celui construit dans l'argile de Boom pour chacun des slates ? Plus encore, si $E > A$ *a priori*, alors il est possible, en pratique, de trouver une meilleure solution que celle préconisée par l'ONDRAF jusqu'à aujourd'hui. Mais si E n'est pas supérieur à A *a priori*, alors on ne peut sans doute rien dire car ce constat ne permet pas d'affirmer qu'il est impossible de trouver une meilleure roche hôte.

La *seconde* est d'ordre éthique : quand bien même une telle (meilleure) solution existerait, quel en serait le coût vis-à-vis du gain potentiel de sûreté ? Nous traitons ces deux questions dans les deux prochaines sous-sections.

10.4.7.1 Première question : une option foncièrement meilleure existe-t-elle ?

Tenter de répondre à la première question passe par la problématisation des autres résultats de l'analyse. Lorsque l'on décide délibérément de favoriser les propriétés de confinement et de robustesse par rapport aux autres propriétés selon le ratio de préférences suivant : *le confinement est deux fois plus important que la robustesse, elle-même deux fois plus importante que la démontrabilité et l'isolation, ces dernières étant d'égale importance*, nous obtenons le classement décrit par la figure 10-7 ci-dessous : $E > D > B > A = C$.

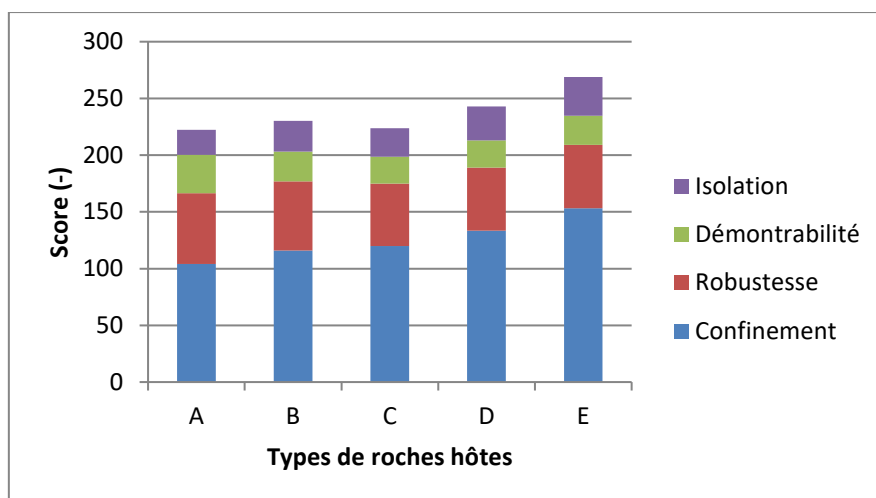


Figure 10-7 – Illustration des scores obtenus pour chaque option A, B, C, D et E en fonction des piliers et principes de sûreté : isolation, confinement ; démontrabilité et robustesse. Les données sont normalisées. Une pondération préférentielle a été attribuée aux principes/piliers de sûreté de sorte que le confinement est deux fois plus important que la robustesse et quatre fois plus important que la démontrabilité et l'isolation, ces dernières étant d'égale importance.

Une fois encore les qualités prometteuses mais non démontrées de l'option E font de celle-ci la première du classement, l'argile de Boom terminant en queue de peloton. Les qualités des shales paléozoïques typiques de la Belgique font de l'option D la deuxième meilleure option. Cette simulation rend à elle seule justice à la requête faite par l'AFCN d'investiguer les (autres) pélites belges.

La simulation suivante décide de favoriser la démontrabilité et le confinement sur les autres propriétés, dans un ratio de préférences où la démontrabilité est deux fois plus importante que le confinement, lui-même deux fois plus important que l'isolation et la robustesse jugées toutes deux d'égale importance (figure 10-8).

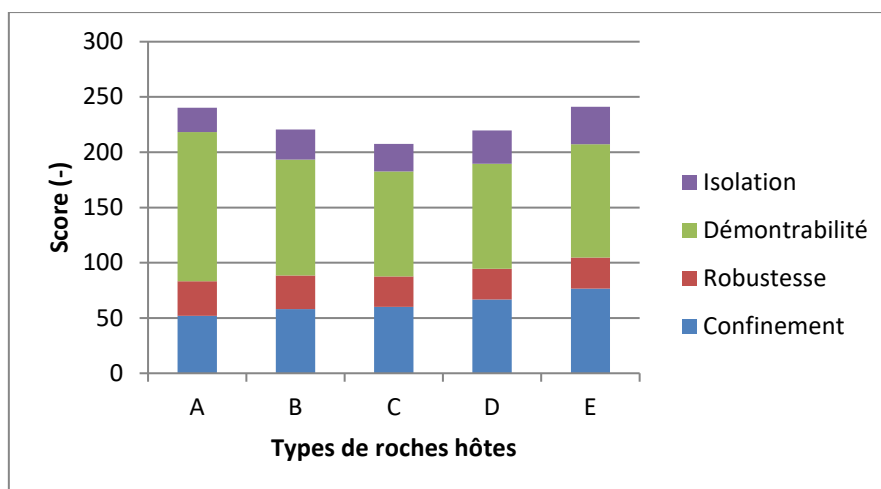


Figure 10-8 – Illustration des scores obtenus pour chaque option A, B, C, D et E en fonction des piliers et principes de sûreté : isolation, confinement ; démontrabilité et robustesse. Les données sont normalisées. Une pondération préférentielle a été affublée aux principes/piliers de sûreté de sorte que la démontrabilité est deux fois plus importante que le confinement et quatre fois plus importante que la robustesse et l'isolation, ces dernières étant d'égale importance.

Sans surprise l'argile de Boom, la mieux connue, sort en tête du classement mais à égalité avec l'option E. Si l'option A capitalise sa démontrabilité sur l'état d'avancement de la recherche la concernant et la confirmation de ses bons résultats, l'option E ne doit son score qu'aux aspects prometteurs qui, s'ils étaient confirmés par la recherche, permettraient de démontrer la sûreté du stockage de façon convaincante. La démontrabilité repose en effet, dans l'analyse multicritères, à la fois sur la prévisibilité du comportement du système et la caractérisation adéquate de ses composants – pour lesquels l'option A obtient sans équivoque le meilleur score – mais aussi sur la capacité de la roche à résister à des perturbations en partie induites par le système lui-même. Sur ce plan, l'option E égalise et obtient même un léger avantage. Mais c'est surtout l'avance prise par l'option E en matière de confinement qui fait se maintenir celle-ci à quasi-égalité de l'option A. Là encore, sous réserve que les propriétés prometteuses de l'option E soient confirmées par un programme de recherche, celle-ci serait tout aussi compétitive que l'option A.

Quand enfin, on choisit de favoriser l'isolation et la robustesse sur le confinement et la démontrabilité selon un ratio expérimental un peu extrême (à des fins illustratives) tel que *l'isolation est deux fois plus importante que la robustesse, elle-même deux fois plus importante que le confinement, lui-même cinq fois plus important que la démontrabilité*, nous obtenons le classement suivant :

$E > D > B > C > A$ (figure 10-9)

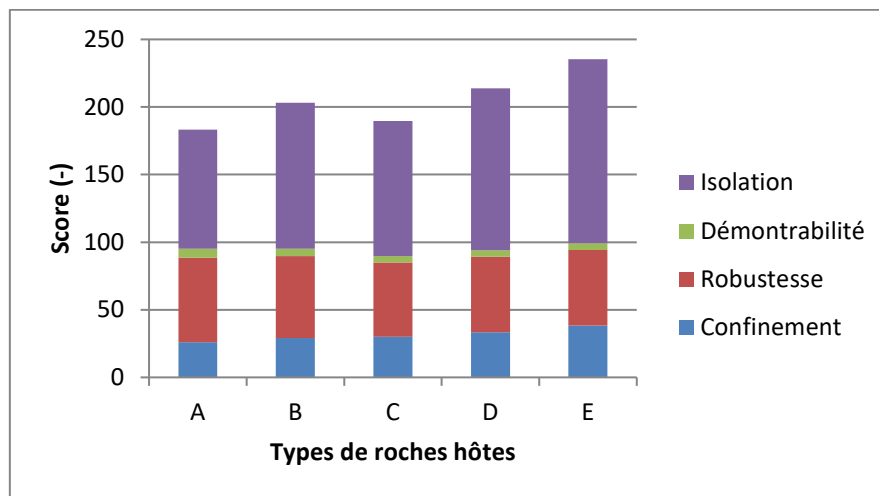


Figure 10-9 – Illustration des scores obtenus pour chaque option A, B, C, D et E en fonction des piliers et principes de sûreté : isolation, confinement ; démontrabilité et robustesse. Les données sont normalisées. Une pondération préférentielle a été affublée aux principes/piliers de sûreté de sorte que l'isolation est deux fois plus importante que la robustesse, quatre fois plus importante que le confinement et vingt fois plus importante que la démontrabilité.

Cette simulation, qui réduit l'un des principaux atouts de l'argile de Boom (la démontrabilité) en exacerbant sa faiblesse relative (l'isolation faible en raison d'une distribution à des profondeurs n'excédant que rarement 250 mètres), favorise une nouvelle fois l'option E sans aucune contestation possible. Cette simulation *force* l'option A à figurer en queue de peloton.

Ces simulations démontrent toute la subjectivité du décideur et du poids accordé aux préférences. Les simulations, sans pondération, ont proposé des résultats relativement similaires avec une légère préférence pour l'option E vis-à-vis de l'option A. En fonction de l'influence prépondérante que le

décideur souhaite donner à tel ou tel pilier ou principe de sûreté, il est possible de faire ressortir tantôt A, tantôt B et ce, sans avoir à revoir les scores attribués aux paramètres. Mais dans une stratégie de sûreté, il n'y a, *a priori*, aucune raison de donner la préférence à l'isolation sur le confinement ou inversement, ou d'exiger davantage de robustesse si la démontrabilité est bonne. Même s'il se peut que certaines roches associées à des sites d'enfouissement privilégieront *de facto* l'un ou l'autre de ces principes, ce sera bien dans ce sens-là que procèdera la détermination, la nature influençant les cartes de la sûreté et non l'inverse.

Il est évidemment possible d'arguer que, étant donné une configuration géologique de départ (*geological setting*), les barrières ouvragées devront compenser les faiblesses relatives du site choisi. Dans des roches cristallines à grande profondeur et bénéficiant de grandes puissances, l'isolation peut être naturellement favorisée. En revanche, étant davantage sujettes à des fracturations, leur capacité de confinement pourrait se voir amoindrie. Tous les concepts cristallins proposent dès lors des barrières ouvragées de bentonite afin d'introduire de l'argile pour augmenter les propriétés de sorption. Le faible confinement en cas de fracturation ne fait pas exclure *de facto* les concepts cristallins. Est-il pour autant illégitime d'exiger une optimisation qui se traduirait par un juste équilibre des piliers et principes de sûreté ? Nous pourrions reformuler : étant donné les possibilités de remédier partiellement à certaines faiblesses de la configuration géologique, est-il souhaitable de chercher ce juste équilibre dans le choix même de cette configuration ? Rien ne semble dire en effet que ce compromis difficile rendra la solution finale plus sûre.

Lorsque l'AFCN questionne le choix de l'argile de Boom comme solution de référence, elle le fait à deux niveaux : sur le plan du principe de l'optimisation et vis-à-vis d'interrogations plus techniques. Le principe a déjà été largement discuté lors de l'analyse des avis de l'AFCN au début de ce chapitre. Les interrogations plus techniques de l'AFCN sont plus discrètes et portent essentiellement sur l'idée qu'investiguer des argiles indurées (plutôt que faiblement indurées) permettraient d'envisager un stockage plus profond et plus distant des aquifères. Par cette remarque, l'AFCN exprime son inquiétude relative à une isolation jugée (trop) faible dans le cas de l'argile de Boom. Une autre remarque formulée dans le même avis l'explicite

d'ailleurs davantage : les profondeurs habituellement considérées à l'échelle internationale sont supérieures à 400 mètres pour les déchets hautement radioactifs (Depaus, 2016a, 2017c ; AFCN, 2016*), ce qui condamnerait l'argile de Boom sur son site de Mol qui est à 230 mètres³⁹¹.

Si l'isolation est privilégiée, l'option E ressort sans ambiguïté, même si cette préférence est également pondérée par la robustesse. Pour les autres simulations, la tendance est moins nette et l'existence d'incertitudes (non discutées ici), qui pourraient éventuellement sauver l'option A, soulève à nouveau la question de la connaissance acquise entendue comme possible circonstance existante, ce qui nous ramène à la discussion de l'optimisation dans son principe (voir section 10.3).

10.4.7.2 Quel est le coût sociétal d'un gain de sûreté ? Une dualité de subjectivités

Quant à la *deuxième question*, relative au coût sociétal de la mise à niveau des connaissances (de l'option E vers l'option A), elle est d'ordre éthique. Notons qu'elle est subordonnée à la question épistémologique puisqu'y répondre n'aura de conséquence pratique que s'il est effectivement possible de démontrer la supériorité significative d'une option sur l'autre, au plan de la sûreté à long terme. Si l'on devine qu'une telle démonstration n'est pas chose aisée, il ne nous est pas possible d'exclure *a priori* l'existence d'une telle supériorité. Cependant, la réflexion éthique vaut certainement pour elle-même et peut, dans le cas présent, servir de traitement de l'incertitude à l'intention du décideur. Quel serait l'enjeu éthique d'une quête vers une solution (encore) plus sûre à long terme sous la réserve qu'une telle solution existe ? En d'autres termes, est-ce que la demande de l'AFCN, fût-elle légitime en intention, pourrait, en vue d'être honorée, exiger un débours sociétal tel qu'elle en deviendrait inacceptable sur le plan éthique ?

C'est ici que le jugement normatif de l'éthique pourrait venir au secours d'un jugement de fait que la science a du mal à poser, en simplifiant l'enjeu. Dans la pratique de l'ingénieur, il n'est pas rare de concevoir un système de telle sorte que cette conception permette d'éviter l'apparition d'un

³⁹¹ Profondeur du plan médian de la formation.

phénomène défavorable ou simplement trop complexe à modéliser. Dans le cas des déchets hautement radioactifs exothermiques, la prise en compte des phénomènes de thermo-diffusion dans l'argile pour anticiper le transport des radionucléides était tellement complexe³⁹² qu'il a été décidé de concevoir une barrière ouvragée qui permette d'éviter l'apparition de conditions dans lesquelles le transport sous gradient thermique ait lieu. Le supercontainer a donc été conçu pour confiner, de manière absolue, les radionucléides pendant une période équivalente à la phase thermique des déchets. Ce procédé se nomme *design-out solution*, c'est-à-dire la recherche d'une solution qui, par conception, permet de s'affranchir des conditions d'apparition d'un phénomène complexe. Dans le cas qui nous occupe, le recours à l'éthique permet éventuellement de prodiguer une aide à la décision indépendamment des limites épistémiques. Soit il est possible d'établir qu'une option est supérieure à une autre et que la *meilleure* solution peut être trouvée (*rationalité substantive* par rapport à *l'environnement externe*) et la question éthique porte sur le coût sociétal de sa confirmation, soit il n'est pas possible d'appréhender une telle supériorité *a priori* mais il est permis d'en supposer l'existence et la question de l'éthique garde toute sa pertinence et son intérêt pour elle-même, sous le couvert général de l'adage : « est-ce que le mieux est l'ennemi du bien ? » ou, plus précisément, en reformulant afin de tenir compte de l'incertitude épistémique : « est-ce que le mieux hypothétique est l'ennemi du bien avéré ? ».

Même dans le cas où l'épistémologie devait révéler qu'aucune option ne peut raisonnablement être préférée, la question éthique serait certes vidée de son utilité pratique à visée décisionnelle mais elle n'en perdrait pas pour autant sa substance puisque ce qu'elle discute, c'est l'enjeu de la désirabilité sociétale d'une recherche de roche hôte optimale et non pas si une telle recherche aboutira (ONDRAF, 2018 ; Kermisch et Depaus, 2020).

L'éthique ne résout pas davantage les questions relevant de l'ontologie du principe d'optimisation – telle que nous avons tenté de la circonscrire en interrogeant les fondements et en évaluant la licéité de son application à la sûreté – mais discute la notion de « *roche-hôte suffisamment optimale* »

³⁹² Et pour cause, il s'agit de thermodynamique hors équilibre.

(ONDRAF, 2018, **nous soulignons**) en regard des valeurs de la société dans un contexte d'incertitudes. Ce « suffisamment optimal » se réfère à une suffisance sur le plan normatif et, s'il peut évoquer la notion de *satisficing* de Simon, il s'en distingue clairement.

En effet, l'introduction de la nuance « suffisamment optimale » chez Kermisch pointe la nécessité de trouver une solution acceptable, sans être nécessairement la meilleure, qui puisse surtout constituer une plus-value par rapport à la situation actuelle d'entreposage temporaire jugée délétère à long terme (ONDRAF, 2018). La préoccupation est bien d'ordre éthique et au regard des générations futures. Chez Simon, l'analyse approfondie du processus de choix n'est pas une priorité et il élabore son modèle de la rationalité limitée sur la base de « l'expérience commune » (Gouin et Harguindéguy, 2010) car la distance entre la connaissance psychologique des processus de choix et celle requise pour les théories économiques et administratives auxquelles Simon s'intéresse est trop grande pour y avoir recours (Simon, 1979). Une pierre posée à mi-chemin devrait pouvoir suffire, dit Simon, en prenant acte du fait que l'individu a une certaine représentation de son environnement, nécessairement partielle, avec des buts multiples et parfois contradictoires. L'émotion peut elle aussi jouer un rôle dans cette représentation et dans la manière dont les préférences sont façonnées. Mais c'est surtout une dimension cognitive que Simon met en exergue dans son modèle de rationalité limitée, en se focalisant sur les interactions entre l'individu et son environnement et les capacités computationnelles des acteurs (Gouin et Harguindéguy, 2010). Le parti pris de Simon est de considérer l'ordinateur comme un modèle pour l'étude de la pensée et ses travaux pionniers dans l'intelligence artificielle sont d'ailleurs notoires mais Simon ne traite pas de politiques publiques³⁹³. Les notions de *satisficing* et de « suffisamment optimal » se font donc écho mais ne s'identifient pas l'une à l'autre.

Il s'agit ici d'adjoindre, via l'éthique, une dimension supplémentaire à l'espace du problème ou, vu sous l'angle pratique, à l'espace de décision.

³⁹³ La théorie de la rationalité limitée connaît cependant une certaine résurgence dans l'analyse des politiques publiques dans les années 2000 mais ce n'est pas le fait direct de Simon mais bien celui des travaux de Bryan Jones et Franck Baumgartner (Gouin et Harguindéguy, 2010) ainsi que de Wildavsky (True *et al.*, 2007).

Remarquons qu'il s'agit d'une dimension révélée puisqu'elle préexistait au niveau de la modélisation des préférences, dans l'analyse multicritères. Dans la présente étude de cas, l'attribution des pondérations aux piliers et principes de sûreté a été effectuée sous la forme d'une analyse de sensibilité, c'est-à-dire en faisant varier un paramètre arbitrairement en vue d'évaluer son impact sur le résultat final. Cette manipulation exploratoire visait à tester la sensibilité du système aux paramètres en vue de reproduire les possibles préférences de l'AFCN ou de tout autre preneur d'enjeu mais sans discuter l'origine de celles-ci.

Les préférences du décideur introduisent dans l'espace de décision une part de subjectivité qui dépasse celle du simple jugement d'expert. Si l'attribution d'un score à un paramètre en regard d'une exigence de l'AFCN mobilise le jugement d'expert et, si ce dernier est entaché de subjectivité, il s'agit en quelque sorte d'une *subjectivité épistémique*. Mais l'attribution d'une pondération à un principe de sûreté peut, quant à elle, tantôt résulter d'une décision d'ingénierie afin d'exploiter au mieux les particularités d'un site tantôt, en l'absence de ce dernier, résulter d'une préférence *a priori* du décideur, préférence dont l'origine est à chercher en dehors de l'espace du problème. Dans ce dernier cas, cette préférence peut résider dans la psychologie du sujet ou dans la perception qu'il a du problème sur un plan moral ou encore sur tout autre plan que celui strictement lié à la connaissance. Nommons cette subjectivité la *subjectivité psychologique*, afin de la distinguer de la précédente. Cette subjectivité psychologique recouvre les notions implicites qui conditionnent les choix et les préférences. Nous formulons l'hypothèse qu'il s'agit d'éléments d'éthique personnelle ou collective, de principes exprimés ou en germe qui constituent une pulsion morale favorisant un choix particulier. Même si l'expression *subjectivité psychologique* est réductrice, elle a le mérite de renvoyer à un non-dit, à un sens caché derrière un discours qui voudrait relever pourtant uniquement de la connaissance. Ce débordement du champ strict de l'épistémologie est analysé dans les sections suivantes consacrées d'une part, à la rationalité ordinaire et d'autre part, à l'éthique et l'optimisation.

10.5 Subjectivité psychologique et rationalité ordinaire

10.5.1 Ce que Simon ne dit pas

Etablir une différence de méthodes entre l'ONDRAF et l'AFCN dans le traitement d'un problème relève du constat, rattacher cette différence à l'incarnation de deux rationalités différentes est une tentative de théorisation. Toutefois, cette théorisation n'est pas encore une explication même si elle possède un pouvoir prédictif. En effet, s'il est établi que l'AFCN répond davantage à un schéma de rationalité substantive que de rationalité procédurale, certaines de ses attentes pourront être anticipées par l'ONDRAF et inversement. Cependant, l'explication manque tant qu'on n'a pas pu identifier les causes de cette différence. Nous avons montré que la doctrine internationale recélait une ambiguïté intrinsèque qui permet l'exégèse mais cela n'explique que la possibilité d'une différence, pas son actualisation. Le flou conceptuel autour de la sûreté ainsi que ce que nous avons identifié comme une dérive du principe d'optimisation sont des conditions nécessaires à une divergence de points de vue mais elles ne suffisent pas encore à expliquer pourquoi les positions des deux institutions sont *effectivement* différentes. Cette cause inconnue se loge dans ce que nous avons nommé supra la subjectivité psychologique par opposition à la subjectivité épistémique, subjectivité à l'origine de préférences ou de choix à chercher en dehors de l'espace du problème. C'est ce que nous appréhendions déjà à la section 9.8 en posant la question en ces termes : « Dans quelle mesure les aspects épistémiques d'une différence de rationalités sont-ils liés à une différence de visées éthiques ? ». Nous suivions alors la remarque de Jacques Monod dans sa préface de *La logique de la découverte scientifique* de Karl Popper : « *Ou mieux encore : à la base de l'épistémologie, discipline normative, il faut bien que se trouve un choix de valeurs, une éthique* » (Popper, [1935] [1959] 1973).

Par ailleurs, nous avons précédemment mentionné (section 10.4.7) que l'analyse approfondie du processus de choix n'est pas une priorité chez Simon (Gouin et Harguindéguy, 2010), ce que Simon reconnaît bien volontiers, en préférant avoir recours à « l'expérience commune » plutôt

qu'à la psychologie, cette dernière étant par trop complexe pour les objectifs poursuivis dans le cadre des théories économiques et administratives (Simon, 1979). Dans notre analyse sur la rationalité, le raisonnement et le comportement (voir section 9.6), nous rappelions que la rationalité (procédurale) se prête à l'observation d'un raisonnement en termes de processus, lors de la résolution de problèmes (*problem solving*) (Simon, 1977 ; Le Moigne, 1994)³⁹⁴. Nous disions que, pour Simon, résoudre un problème revient à trouver une séquence d'opérations permettant de changer la situation initiale en situation de but (Simon, 1977). De ce fait, comme le souligne Raymond Boudon dans son essai sur la rationalité, la conception de la rationalité (limitée) de Simon « *présente l'inconvénient de rester 'instrumentale', c'est-à-dire de limiter la rationalité au choix par l'individu des moyens lui permettant d'atteindre ses objectifs. Car, selon Herbert Simon, la rationalité est 'pleinement instrumentale. Elle ne peut nous dire où aller, mais seulement comment y aller'* » (Boudon, 2012, p. 8, p. 33).

Boudon renchérit, en reconnaissant que même si la théorie du choix rationnel³⁹⁵ a fait un bond en avant grâce à Simon et son concept de rationalité limitée, celle-ci ne « *permet pas davantage que la TCR [théorie du choix rationnel] de pénétrer l'univers des préférences, des objectifs, des représentations, des valeurs et des opinions de l'individu. Car H. Simon voit la rationalité comme de caractère exclusivement instrumental* » (Boudon, 2012, p. 51). Selon Boudon, le choix de l'individu, pour Simon, est donc limité aux choix des moyens, moyens en vue d'atteindre un objectif fixé ou en vue de « *respecter une valeur ou une représentation à laquelle il croit*³⁹⁶ » (Boudon, 2012, p. 60). Les valeurs chez Simon résultent donc d'une *rationalisation ex post* (Chanut, 2011, p. 105). Nous nous devons cependant de tempérer ce jugement. S'il est vrai que Simon recourra plus volontiers à l'expérience commune comme pierre posée à mi-chemin entre l'idéalisation optimisante de *homo economicus* et la psychologie des décisions (Simon, 1979), la rationalité procédurale veut néanmoins se rapprocher du concept tel qu'il est utilisé en psychologie (Le Moigne, 1994 ; Simon [1973] 1992) (voir aussi

³⁹⁴ Le cadre de caractérisation pour un problème de décision est celui de la résolution de problème (Velupillai, 2010).

³⁹⁵ Encore appelée théorie de l'utilité espérée (Boudon, 1999, p. 108).

³⁹⁶ Mais cela reste limité aux choix des moyens, la théorie de Simon ne dit rien sur les croyances elles-mêmes.

section 9.5). Cette rationalité se rattache au processus de réflexion qui l’a généré et sa limitation tient éventuellement dans les capacités *cognitives* du sujet.

Raymond Boudon, en revanche, défend une théorie de la rationalité qui n’est pas exclusivement instrumentale. En effet, sa théorie *cognitive* de la *rationalité ordinaire* (ou plus brièvement théorie de la *rationalité ordinaire* (TRO)) peut expliquer l’adhésion d’un individu à « *une croyance positive ou normative, à une valeur ou à un moyen. Elle permet aussi d’expliquer, dans certains cas, les objectifs qu’il se donne* » (Boudon, 2012). Se basant sur Weber qui oppose rationalité instrumentale à rationalité axiologique, Boudon propose d’interpréter cette dernière comme une « *déclinaison normative de la rationalité cognitive* » (Boudon, 2007, p. 63 ; Boudon, 2012, p. 78), c’est-à-dire « *l’application de la rationalité cognitive à des problèmes prescriptifs ou normatifs* » (Boudon, 2007, p. 91). Boudon distingue donc la dimension instrumentale centrée sur la recherche des moyens en vue d’atteindre un but – tradition dans laquelle il inscrit Simon malgré les efforts de ce dernier pour intégrer les capacités cognitives du sujet – de la dimension cognitive qui permet de choisir ses croyances positives, et de la dimension normative attachée au choix des valeurs. Selon Boudon, la rationalité axiologique de Weber n’est qu’une déclinaison de la rationalité cognitive, ce qui rend, comme le dit Pierre Demeulenaere, la séparation des aspects positifs des aspects normatifs non réellement pertinente, puisque tous deux sont unis par l’existence de croyances adoptées par les gens, pour de bonnes raisons, compte tenu de leur situation (Demeulenaere, 2014)³⁹⁷. Ainsi les actions entreprises ne se justifient pas uniquement par les conséquences

³⁹⁷ On s’en convainc en comparant les formalismes proposés par Boudon pour les rationalités cognitive et axiologique respectivement. Pour la rationalité cognitive, on considère un système d’arguments {S} expliquant un phénomène P. Il est cognitivement rationnel de considérer le système d’arguments {S} comme une explication valide de P ; {S} → P, à deux conditions : si 1/ toutes les composantes de {S} sont acceptables et compatibles entre elles et si 2/ aucune alternative {S’} n’est disponible et ne lui soit préférable (Boudon, 2007, p. 97). Pour la rationalité axiologique, on a similairement, un système d’arguments {Q} contenant une proposition axiologique et concluant à la validité d’une norme N ; {Q} → N. Il est axiologiquement rationnel de considérer le système d’arguments comme établissant la norme N de façon valide à deux conditions : si 1/ toutes les composantes de {Q} sont acceptables et compatibles entre elles et si 2/ aucune alternative {Q’} n’est disponible et ne lui soit préférable, c’est-à-dire si aucun autre {Q’} conduisant à une norme N’ incompatible avec N (d’après Boudon, 2007, pp. 98-99).

qu'elles engendrent mais aussi par les principes moraux endossés par les acteurs (Demeulenaere, 2014 ; Boudon, 2007).

Jürgen Habermas a, lui aussi, beaucoup travaillé la rationalité procédurale telle qu'elle s'incarne dans la pratique de l'argumentation (Habermas, 2001, p. 43). Dans sa pratique de la rationalité fondée sur la justification, Habermas, en répondant à une objection de Herbert Schnädelbach, reconnaît s'être distancié d'autres modèles valides, comme celui attaché à la recherche des moyens en vue d'une fin (Simon) ou celui relié à la faculté de tirer des enseignements des erreurs (Popper), etc. La rationalité argumentative (ou discursive), défendue jusque-là par Habermas, n'était donc qu'un domaine partiel de la rationalité. En effet, le fait qu'un énoncé rationnel puisse être défendu face à la critique n'implique pas que ce qui soutient l'argumentation nécessaire à cette défense doive lui-même « *présenter la forme de l'argumentation pour être considéré comme rationnel* » (Habermas, 2001, p. 43). Ainsi, Habermas est amené à identifier trois racines à la rationalité : la rationalité épistémique, la rationalité téléologique et la rationalité de la communication. La rationalité épistémique renvoie à la démarche scientifique et au rapport de vérité de type « correspondance », la rationalité téléologique inclut le discours éthique s'interrogeant sur les critères d'une action bonne et la rationalité de la communication s'inscrit dans une démarche herméneutique de compréhension du discours (Feltz, 2014, p. 45). Selon Feltz, chacune de ces rationalités est marquée par la visée d'un universel comme idée régulatrice. Habermas précise que ces racines de la rationalité n'ont pas de racine commune mais il défend l'idée que la *discussion* (i.e. pratique discursive) a la capacité de les relier ; la rationalité de la discussion résidant donc dans l'*intégration* plutôt que dans la *fondation*. Donnant suite à la critique de Schnädelbach, selon laquelle tout ce qui n'est pas intégralement fondé sur l'argumentation ou le discours ne peut pas être jugé « irrationnel », Habermas a admis l'application du prédicat « rationnel » aux opinions, aux actions et aux actes du discours en raison de l'existence de ces trois racines de la rationalité rencontrées dans la structure propositionnelle de la connaissance, dans la structure téléologique de l'action et dans la structure communicationnelle du discours (Habermas, 2001, p. 45). Même si nous ne choisissons pas de poursuivre notre réflexion avec Habermas, ce qui nous importe de relever ici, c'est bel et bien le constat partagé avec Boudon, c'est-

à-dire l'existence de (bonnes) raisons dans le chef des acteurs, raisons qui s'inscrivent dans une rationalité que nous souhaitons interroger et qui ne sont pas adéquatement rapportées par la théorie du choix rationnel qui « *traite des aspects modélisables des problèmes de décision qui sont ceux des sujets d'action obéissant de façon égocentrique à des préférences et à des attentes de succès qui leur sont chaque fois propres* » (Habermas, 2001, p. 50).

La cause inconnue que nous logeons dans la subjectivité psychologique et que nous avons spontanément associée à un choix de valeurs ou à un jugement éthique ne peut être débusquée par la rationalité de Simon, puisque selon lui – et s'inscrivant ainsi dans une longue tradition depuis Hume³⁹⁸, en passant par Russel – la raison ne peut rendre compte que des « moyens » (Boudon, 2012, p. 52), elle garde silencieuse la question des valeurs (Chanut *et al.*, 2011). Or c'est le choix même de ces moyens qui nous intéresse ici, choix reposant sur des croyances, des théories ou des préjugés, c'est-à-dire des valeurs. Pour Boudon, une théorie de la rationalité qui veut que les croyances, les représentations et les valeurs soient, elles aussi, compréhensibles est bien plus satisfaisante (Boudon, 2007). Cette théorie est celle de la rationalité *ordinaire*, une rationalité qui s'applique également aux valeurs et aux normes, ces dernières n'étant considérées ni comme résultant de préférences irrationnelles³⁹⁹ (ou inconscientes) ni comme résultant (toujours) de choix égoïstes ni même comme (nécessairement) conditionnées culturellement (Demeulenaere, 2014). Nous la détaillons ci-après, dans la section 10.5.3, après une brève méta-analyse des possibles implications éthiques du choix, opéré jusqu'ici, de la rationalité limitée de Simon comme cadre théorique.

³⁹⁸ Pierre Demeulenaere conteste cette analyse. Selon lui, la dimension cognitive, bien que ne revêtant pas cette appellation, est un héritage humien (Demeulenaere, 2014).

³⁹⁹ Boudon préfère parler de a-rationalité plutôt que d'irrationalité certes « plus familier mais polysémique » (Boudon, 2007, p. 13).

10.5.2 Rationalité instrumentale et utilitarisme : un filtre éthique sous-jacent ?

En restreignant la rationalité du décideur au choix des moyens lui permettant d'atteindre ses fins, dans une logique calculatoire et cohérente, nous nous inscrivons, nous dit Boudon, dans une tradition utilitariste (Boudon, 2012, pp. 34-37). Cette filiation existant entre la théorie instrumentale de la rationalité et la pensée utilitariste doit nous forcer à nous interroger sur le cadre d'analyse que nous avons adopté jusqu'ici. Celui-ci ne serait peut-être pas neutre. Bien que nous l'ayons mobilisé dans le cadre d'une analyse proprement épistémologique, la théorie de Simon sur les rationalités limitée et procédurale impose sans doute le filtre d'une éthique sous-jacente.

Nous savons par ailleurs que l'éthique utilitariste est étroitement chevillée au principe d'optimisation comme le reconnaît sans ambages la CIPR (ICRP, 2018) et comme nous l'avons montré précédemment (voir section 7.4). Dès lors, si notre cadre d'analyse oriente la réflexion dans une perspective utilitariste, c'est aussi parce que notre étude de cas, laquelle étant aussi l'essence de notre question de recherche, nous y a contraint.

Par conséquent, chercher à décrypter la subjectivité psychologique précédemment définie comme les « *notions implicites qui conditionnent les choix et les préférences (...) principes d'éthique personnelle ou collective (...) pulsion morale favorisant un choix particulier* » (voir section 10.4.7) requiert sans doute une prise de distance par rapport à Simon et ce, pour deux raisons qui se font écho l'une à l'autre.

La première raison réside dans la nécessité d'échapper à une possible distorsion de pensée à laquelle la théorie de la rationalité de Simon nous a peut-être conduits, distorsion qui entacherait l'investigation de l'éthique personnelle des acteurs ONDRAF et AFCN par un cadre résolument utilitariste. Comment serait-ce possible ? Comment une pensée instrumentale, centrée sur les seuls moyens, pourrait influencer une réflexion au plan normatif tournée vers le contenu des obligations morales ? C'est parce que la frontière entre l'instrumental et l'axiologique n'est pas toujours aussi bien définie et n'est pas hermétique. Dans la section consacrée à l'analytique de l'optimisation (voir section 10.3), nous opposons la

fonction d'utilité de l'AFCN au degré d'aspiration de l'ONDRAF de même que leurs différences en termes d'environnement interne. Le cadrage ainsi posé nous invitait à penser en termes de calcul coûts-avantages que ce soit tant pour l'AFCN, qui cherche à maximiser une fonction d'utilité liée à la sûreté que pour l'ONDRAF, qui fait de la sûreté un degré d'aspiration et cherche à réduire les incertitudes en tirant le meilleur avantage du programme de recherche en cours. Or, la réflexion posée en ces termes oriente aussi la recherche des raisons normatives au travers du prisme de la question : quelles sont les motivations (et les différences) des acteurs derrière le (au sein du) calcul coûts-avantages ? Et cette question nous cantonne soit à la subjectivité épistémique, sans nous permettre de cerner les contours de la subjectivité psychologique, soit nous fait rechercher des valeurs ou croyances sans chercher à les expliquer autrement que comme des données d'entrée au modèle de Simon (degré d'aspiration, environnements interne et externe, variables). En effet, comme le fait remarquer Boudon dans sa critique de la théorie du choix rationnel, l'option issue d'une analyse coûts-bénéfices ne semble appeler aucune remarque explicative, l'approche semble être (erronément) autosuffisante (Boudon, 2012).

La deuxième raison réside dans le fait que l'analyse des différentes conceptions du principe d'optimisation a également confiné l'échange d'opinions entre l'AFCN et l'ONDRAF dans cette seule pomme de discorde. Certes, c'est bien par celle-ci que leurs divergences sont apparues mais la réponse est sans doute plus globale et elle est à chercher en dehors de ce cadre. Lequel ? Vraisemblablement dans le cadre plus englobant de la sûreté, c'est-à-dire le cadre où le « flou conceptuel » a été originellement identifié, en lien avec notre intuition initiale dont la question de l'optimisation (et la possible dérive de son principe) est issue. Ceci revient donc à réinterroger les « conditions nécessaires de cette divergence » (voir section 10.5.1) et se reposer la question suivante : De quelles conceptions de la sûreté l'AFCN et l'ONDRAF se font-ils les ambassadeurs ? Et surtout, au nom de quelles croyances, de quelle éthique ? La réflexion reprend donc, à un niveau supérieur d'abstraction, celle de la sûreté.

Un élargissement de vue, c'est précisément ce à quoi nous invite Boudon en démontrant que la théorie instrumentale du choix rationnel, théorie dans laquelle s'inscrit également Simon, n'est pas généralisable, c'est-à-dire

qu'elle ne peut pas expliquer tous les comportements. En d'autres termes : « *les notions de rationalité et rationalité instrumentale ne sauraient être confondues* » (Boudon, 2007, p. 91). Nous décrivons brièvement ci-après son développement.

10.5.3 Théorie de la rationalité ordinaire : la réponse de Boudon à Simon

Comme nous l'avons précédemment évoqué, Raymond Boudon propose une théorie de la rationalité qui s'inspire de Max Weber et qui échappe au cadre uniquement instrumental emprunté par H. Simon. Ce que vise Boudon, c'est une théorie de la rationalité qui « *se révèle capable d'expliquer non seulement les moyens qu'empruntent les individus, mais leurs objectifs et leurs croyances : leurs croyances positives, mais aussi leurs croyances normatives* » (Boudon, 2012, p. 9). En effet, selon Boudon, la conception instrumentale de la rationalité de Hume à Simon en passant par Bentham et Russel se bornerait à assimiler rationalité et cohérence. Cette conception instrumentale négligerait ainsi la capacité cognitive de l'individu à théoriser la situation dans laquelle il se trouve (Boudon, 2012, p. 33).

Nous recourons ici à la théorie de la rationalité ordinaire de Boudon dans l'espoir de compléter le diagnostic que nous avons posé sur la différence d'approches entre l'AFCN et l'ONDRAF. Un diagnostic limité aux croyances positives des deux institutions qui nous a éclairé sur les moyens empruntés par elles dans la mise en œuvre du principe d'optimisation, et plus particulièrement dans la question liée au choix de la roche hôte, mais sans pour autant nous conduire à l'origine possible de leurs différences. Ce diagnostic a été posé grâce à la théorie du choix rationnel revue par Simon et à laquelle il a apporté la distinction entre rationalité substantive et rationalité limitée et/ou procédurale⁴⁰⁰.

Pour comprendre en quoi la rationalité ordinaire se distingue de la théorie du choix rationnel, il faut repartir de l'individualisme méthodologique qui est

⁴⁰⁰ Nous savons que la rationalité limitée ne peut être identifiée à la rationalité procédurale (voir section 9.5) mais nous l'utilisons ici, pour notre propos, en quasi-synonymie.

une conception d'ensemble des sciences sociales (Boudon, 2012). L'individualisme méthodologique se définit, dans sa version la plus stricte, par le postulat de l'individualisme qui pose que l'explication du phénomène social à l'étude peut s'expliquer si l'on comprend les raisons des comportements individuels qui en sont responsables. Dans une acception plus large, on peut y ajouter deux autres postulats : le postulat de la compréhension selon lequel « *comprendre le comportement d'un individu c'est en reconstruire le sens qu'il a pour lui* » (Boudon, 2012, p. 35) et le postulat de la rationalité qui établit qu'un individu agit d'une telle façon parce qu'il a des raisons de le faire⁴⁰¹. Et les actions individuelles dont il est question dans ces postulats sont souvent associées et à tort, selon Boudon, à une « *tradition benthamienne sous l'empire d'un calcul entre les plaisirs et les peines* » (Boudon, 2012). Ce que nous comprenons de cette précision est que ces postulats seuls ne défendent pas une vision utilitariste sans s'adjoindre au préalable d'autres axiomes⁴⁰². Des postulats complémentaires peuvent en effet s'ajouter à ce corpus fondamental des trois premiers postulats. Ainsi, par exemple, le postulat du conséquentialisme établissant que le sens d'une action réside dans ses conséquences, conférant à l'individualisme méthodologique sa version instrumentale ou encore, le postulat de l'égoïsme qui restreint encore la théorie en déclarant que, parmi les conséquences, seules celles qui servent directement l'individu sont prises en compte et enfin, le postulat du coûts-avantages qui soutient que toute action est entreprise après une maximisation de la différence entre les deux. Ce dernier postulat est appelé « *postulat de la maximisation ou de l'optimisation* » (Boudon, 2007, p. 77). La théorie du choix rationnel répond aux six postulats et on devrait sa popularité en sciences sociales à l'utilitarisme qu'elle véhicule (Boudon, 2012) et à sa grande puissance explicative de phénomènes sociaux allant de la modernisation de l'agriculture à la fin du 18^e siècle à la dynamique de la guerre froide (Boudon, 2007). En effet, le fait d'expliquer qu'un individu choisit une option plutôt qu'un autre parce qu'il a effectué une analyse coûts-bénéfices semble

⁴⁰¹ Cela suppose donc que ledit individu est conscient de son comportement et que nous n'avons pas affaire à un dément.

⁴⁰² Boudon souligne la contribution de J. Bentham à des penseurs plus contemporains comme Coleman dans le développement de la théorie du choix rationnel (théorie de l'utilité espérée), comprenant les six postulats (Boudon, 1999, p. 108).

n'appeler *a priori* aucune remarque, l'explication paraît complète et (auto)suffisante.

Pourtant, la thèse d'une rationalité instrumentale conséquentialiste ne peut expliquer l'ensemble des comportements humains. Ce constat d'insuffisance est accrédité par une série de paradoxes, dont le paradoxe du vote⁴⁰³, le dilemme des prisonniers⁴⁰⁴ ou encore le jeu de l'ultimatum⁴⁰⁵ (Boudon, 2007 ; Boudon, 2012 ; Demeulenaere, 2014).

La théorie du choix rationnel est en réalité mise en échec par trois grandes catégories de problèmes (Boudon, 2012). En effet, pour le comprendre, il faut tout d'abord se rappeler que le comportement des individus, dans la perspective de Boudon, se fonde sur des croyances. Certaines d'entre elles sont triviales, par exemple regarder à gauche et à droite avant de traverser

⁴⁰³ Le paradoxe du vote repose sur le fait qu'un vote individuel n'a qu'une chance quasi nulle d'influencer un suffrage. Une approche purement conséquentialiste ne peut expliquer pourquoi les gens décident quand même de voter (Boudon, 2012). On devine que les raisons résident dans la croyance qu'une action collective efficace repose sur un engagement individuel (croyance positive) et que celle-ci est la garante du système démocratique que l'on veut défendre (position normative).

⁴⁰⁴ Dans cette énigme célèbre énoncée par Tucker à Princeton en 1950, le prisonnier qui dénonce l'autre est libéré et ce dernier écope de la peine maximale (10 ans). S'ils se dénoncent tous les deux, ils auront une peine plus légère équivalente à la moitié de la peine maximale mais si les deux refusent de se dénoncer, tous deux presteront une peine minimale de 6 mois. Le choix le plus empreint de rationalité (instrumentale) réside dans la dénonciation de l'autre. A se dit que si B le dénonce, soit il se tait et écope de la peine maximale soit il dénonce également B et il écope de la moitié de la peine. Si A se dit que B se taira soit il se tait aussi mais écope toute de même d'une peine de prison (6 mois) soit il le dénonce et recouvre la liberté (https://fr.wikipedia.org/wiki/Dilemme_du_prisonnier [Consulté le 11 avril 2021]). Le fait que les prisonniers puissent communiquer et décider de coopérer est a-rationnel sur le plan d'une rationalité instrumentale, conséquentialiste et égoïste (Postulats 1 à 6).

⁴⁰⁵ Dans le paradoxe de l'ultimatum, un expérimentateur propose de partager une somme entre deux individus. Le premier individu est amené à proposer une clé de répartition que le deuxième ne peut qu'approuver ou rejeter. S'il la rejette, l'expérimentateur conserve l'intégralité de la somme. Alors que l'on s'attendrait à ce que le premier acteur propose des clés de type 70/30 qui seraient de nature à l'avantager et que le deuxième acteur n'aurait aucun intérêt à refuser (c'est à prendre ou à laisser), on observe empiriquement que la clé de répartition se veut le plus souvent équitable (Boudon, 2012). L'explication est de toute évidence à rechercher dans un principe moral. Notons que des sentiments moraux peuvent être influencés par des éléments contextuels et que le jeu de l'ultimatum peut conduire dans certains cas à des clés de répartitions inverses 30/70 que l'autre partie refusera néanmoins ; ce serait le cas en Papouasie-Nouvelle-Guinée où le don est perçu comme un signe de supériorité (Boudon, 2012, p. 82).

la rue, d'autres sont complexes comme, par exemple, un rituel (Boudon, 2007).

- La première catégorie de problèmes est donc celle des phénomènes pour lesquels les comportements s'appuient sur des croyances non triviales. On pourrait penser que si les croyances résultent de l'adhésion à une théorie, cette adhésion résulte d'un acte rationnel. Certes, nous dit Boudon, mais il s'agit alors d'une rationalité cognitive et non d'une rationalité instrumentale, l'individu adhère à la théorie car il la croit vraie (Boudon, 2007 ; Boudon, 2012). Les défenseurs de la théorie du choix rationnel et partisans du coûts-avantages pourront toujours soutenir que l'on adhère à une théorie jusqu'à ce que le fait de défendre celle-ci ne devienne trop coûteux face aux objections qu'on lui oppose. C'est par exemple le point de vue de Radnitzky qui s'interroge sur l'application d'un calcul coûts-bénéfices au progrès scientifique : « *Quels sont les coûts pour défendre un énoncé qui est 'problématique' ?* » (Radnitzky, 1987, p. 186). De cette façon, la rationalité cognitive est ramenée (artificiellement ?) à la rationalité instrumentale. Mais pour Boudon, la rationalité cognitive est bien « *celle qui nous fait préférer telle théorie à telle autre* » (Boudon, 2007, p. 63). Derrière cette préférence, il y a des raisons et une raison est jugée valide si elle a vocation à être partagée.
- La deuxième catégorie de problèmes battant en brèche la théorie du choix rationnel est celle des « *croyances prescriptives non conséquentialistes* » (Boudon, 2012, p. 48). Il s'agit de comportements qui s'opposent par exemple à la corruption, au plagiat ou à l'imposture alors même que l'individu qui s'insurge n'est pas affecté personnellement par les délits, il ne s'y oppose que pour le principe.
- La troisième catégorie porte sur les comportements individuels qui ne peuvent s'expliquer par l'égoïsme (Boudon, 2012).

L'ensemble de ces problèmes n'est pas explicable par la théorie du choix rationnel. Il en résulte que les postulats du conséquentialisme, de l'égoïsme et du calcul coûts-bénéfices ne sont pas généralisables et il serait par exemple injuste, selon Boudon, de soutenir que celui qui s'exprime sur un sujet ne l'impliquant pas personnellement ne chercherait à le faire que dans son propre intérêt. La théorie du choix rationnel ne peut pas expliquer tous

les comportements observés comme on aurait peut-être eu tendance à le croire.

Qu'en est-il du corpus fondamental constitué par les trois premiers postulats ? Ils ont de toute évidence une portée plus générale que l'ensemble constitué par les six postulats de la théorie du choix rationnel. Si le premier définissait l'individualisme méthodologique au sens strict, ils pourraient, selon Boudon, constituer à eux trois, une théorie générale de la rationalité (ou théorie cognitive de l'action⁴⁰⁶). Le troisième postulat qui est précisément celui de la rationalité établit que « *les causes d'une action d'un individu résident dans les raisons qu'il a de l'accomplir* » (Boudon, 2007, p. 90). Mais la rationalité de ce postulat ne doit pas s'entendre ici dans une acception purement instrumentale, celle-ci peut être cognitive ou axiologique, comme nous l'évoquions supra. En effet, dire que les causes d'une action résident dans les raisons qu'a l'individu de l'accomplir n'est pas un truisme ; c'est reconnaître, à contre-courant de Hume, de Russel⁴⁰⁷ ou de Simon, que les fins ne s'expliquent pas que par des causes a-rationnelles et que la raison ne se restreint pas seulement à rendre compte des moyens déployés (Boudon, 2012). Quant aux raisons qu'a l'individu d'accomplir ce qu'il fait, il s'agit de « bonnes raisons », c'est-à-dire des raisons qui sont défendables de son point de vue et qui peuvent tantôt mener à des bons choix, tantôt à des choix erronés. Ces « bonnes raisons » sont aussi le moyen de concilier valeurs et faits, considérations normatives et données empiriques (Demeulenaere, 2014).

A quoi cela nous mène-t-il ? La rationalité cognitive peut être ou non dépendante du contexte (Boudon, 2012). L'objectif des énoncés scientifiques est évidemment de briguer une universalité qui en soit indépendante. Dans l'opposition entre l'AFCN et l'ONDRAF, nous avons supposé (après observation et expérience) que la discorde n'était pas de l'ordre de la controverse scientifique – exercice sain du doute méthodique applicable à la recherche – mais bien de l'ordre de la croyance. Et les causes des croyances,

⁴⁰⁶ Théorie générale de la rationalité (Boudon, 2007, p. 90) ou théorie de la rationalité ordinaire ou encore, théorie cognitive de la rationalité ordinaire (Boudon, 2012, p. 53, p. 117)

⁴⁰⁷ « *Reason has a perfectly clear and precise meaning. It signifies the choice of the right means to an end that you wish to achieve. It has nothing whatever to do with the choices of ends* » (Russel B., cité dans Boudon, 2012, p. 52).

qu'elles soient scientifiques, morales ou religieuses, résident dans des raisons (Boudon, 1999, p.104). Croyances qui ne s'imposent collectivement qu'à l'aide d'un système d'arguments auxquels tant les rationalités cognitive qu'axiologique se réfèrent⁴⁰⁸, c'est-à-dire des croyances qui s'approcheront de l'idéal de la rationalité ordinaire⁴⁰⁹.

Boudon distingue quatre types de croyances en fonction de leur « système de raisons », contextuel ou non, et leur intensité. Les croyances peuvent donc être fortes et indépendantes du contexte dans lequel sont plongés les individus (par exemple, les vérités scientifiques) ; faibles et indépendantes du contexte⁴¹⁰, fortes mais valides que dans certains contextes⁴¹¹ ou encore faibles et dépendantes du contexte (Boudon, 2012, p. 59). Dans cette typologie, nous pouvons écarter d'emblée quelques extrêmes à savoir les vérités scientifiques (i.e. hypothèses fortes et indépendantes) puisque l'objet de discordance n'est pas, par hypothèse, de l'ordre de la controverse scientifique, ainsi que les croyances faibles et contextuellement dépendantes dont l'indigence n'aurait pas mérité qu'on s'y attarde. Une croyance faible et indépendante du contexte ou une croyance forte mais dépendante du contexte pourraient donc retenir notre attention. Remarquons que même si les énoncés scientifiques relèvent, dans cette typologie, de croyances fortes non contextuelles comme l'expérience de la pression atmosphérique mise en évidence par le tube de Toricelli⁴¹² ou l'expérience du plan incliné de Galilée, ce ne sont que des conditions nécessaires. D'autres énoncés, même non scientifiques, pourraient

⁴⁰⁸ Voir note 397.

⁴⁰⁹ Pour laquelle Boudon fournit également un formalisme comparable aux rationalités cognitive et axiologique mais dont les prémisses sont plus générales. On définit X comme un objectif (rationalité instrumentale), une valeur, une représentation, une préférence, une croyance ou une opinion (ce qui couvre les champs des rationalités cognitive et axiologique). X s'explique par la rationalité ordinaire si X est pour celui qui y adhère la conséquence d'un système de raisons {S} dont tous les éléments lui sont acceptables et s'il n'existe pas pour lui, à sa connaissance, un système {S'} qui lui soit préférable et qui le conduirait à choisir X' plutôt que X. Alors {S} est bien la cause de l'adhésion à X (d'après Boudon, 2012, pp. 53-54).

⁴¹⁰ L'idée que la notion de propriété ne serait pas naturelle par exemple mais dont l'argumentaire reste attaquant (Boudon, 2012).

⁴¹¹ Boudon donne l'exemple des faiseurs de pluie pour lesquels les raisons d'adhérer sont perçues comme fortes mais dans certains contextes seulement (Boudon, 2012).

⁴¹² Exemple choisi par Boudon (Boudon, 2012).

constituer des croyances fortes et non contextuelles. Ceux-ci pourraient également retenir notre attention.

10.5.4 La typologie des croyances et des rationalités appliquée à l'optimisation de la sûreté

Tentons d'appliquer cette typologie à la question de l'optimisation de la sûreté. Rappelons que l'optimisation de la sûreté est appréhendée, dans notre domaine d'étude, comme l'extension de l'optimisation radiologique. Remarquons d'emblée que ni l'optimisation radiologique ni la sûreté ne sont à proprement parler des notions « scientifiques »⁴¹³ bien qu'elles se fondent sur la science. Pour s'en convaincre, analysons en guise de lemme, l'origine du principe d'optimisation radiologique. Il est issu du modèle LNT (*Linear non threshold*) qui sous-tend le principe ALARA (voir section 7.4.3.1). Il s'agit d'un modèle de protection visant à établir une approche de quantification de la relation existant entre le risque de cancer et la dose d'exposition (ICRP, 2020, p. 134) fondé sur l'hypothèse que, dans la gamme des faibles doses, toute dose supérieure à zéro induit une augmentation du risque de contracter un cancer ou une maladie héréditaire de manière simplement proportionnelle (ICRP, 2007, p. 26). Ce modèle n'est pas à proprement parler descriptif ou prédictif de l'effet de la dose sur l'organisme. Il s'agit au contraire, d'un modèle pratique d'utilisation, un modèle stylisé qui garantit au radioprotectionniste l'utilisation sûre des rayonnements ionisants en renseignant celui-ci sur leurs effets stochastiques en termes de prévalence de cancers induits. L'interpolation linéaire aux faibles doses est une interpolation conservative⁴¹⁴ (ICRP, 2007, p. 43), sachant que la plupart des modèles descriptifs à visée réaliste introduisent des facteurs correctifs⁴¹⁵ (IRPS, 2018b) et établissent le plus souvent une sous-réponse de l'organisme

⁴¹³ Entendu ici dans un sens usuel positif comme relevant d'une discipline ayant une dynamique explicative par rapport au réel, en cherchant une vérité en « adéquation » (Heidegger) avec la réalité (Feltz, 2013, p. 42).

⁴¹⁴ « *and commensurate with the precautionary principle (...) The Commission considers that the LNT model remains a prudent basis for radiological protection at low doses and low rates* » (ICRP, 2007, p. 43 ; ICRP, 2005).

⁴¹⁵ Comme le DDREF (*Dose & Dose Rate Effectiveness Factor*), ainsi que des paramètres permettant de tenir compte du sexe de la personne exposée, etc. (IRPS, 2018b).

aux faibles doses (modèle à seuil) voire même, dans certains cas, une *hormèse* (Mancuso *et al.*, 2012 ; CNSC, 2013 ; Depaus, 2020a). Le modèle LNT est donc un modèle moyen à employer comme outil pratique d'aide à la décision et le principe ALARA est le principe normatif qui en résulte. Quant à la sûreté, nous avons établi précédemment qu'il s'agit d'un concept sociotechnique qui ne se départit pas du sentiment qu'elle inspire, de la confiance qu'on lui voue ou encore de la perception que l'on en a.

Analysons donc le concept d'optimisation radiologique dans cette typologie de croyances. Ce principe de protection est fondé sur le *consensus* scientifique autour des incertitudes relatives aux effets des faibles doses sur l'organisme humain⁴¹⁶. Bien qu'une frange des radioprotectionnistes en réclame la suppression et clame son inutilité au regard du principe des limites de doses (Hansson, 2007, p. 147), le principe est bien établi dans le système de la protection radiologique et jouit même d'un intérêt croissant. L'internationalisation du système de protection radiologique rend ce système indépendant d'un contexte socio-culturel. De toute évidence, ce principe répond aux attributs d'une croyance forte et indépendante du contexte et ce, bien qu'il n'énonce pas une vérité scientifique mais bien seulement une attitude de protection. En outre, le principe d'optimisation de la protection radiologique relève d'une rationalité instrumentale conséquentialiste dont l'évaluation se base sur l'approche coûts-bénéfices, il s'inscrit donc dans la théorie du choix rationnel.

L'analyse du concept d'optimisation de la sûreté ou plus précisément du principe d'optimisation radiologique étendu à la sûreté nous renvoie naturellement en première instance à la sûreté elle-même. La notion de sûreté est omniprésente dans le domaine de la gestion à long terme des déchets radioactifs et ce dans tous les domaines de la science, de la technique ou du droit que cette gestion embrasse. Mais pour elle, point de modèle ni même de données statistiques générales ou de processus particuliers auxquels rattacher le concept. Qu'en est-il de son intensité ? Il pourrait être curieux voire tabou de poser cette question en ce sens que cela reviendrait à se demander si la sûreté pourrait être une croyance faible. Force est de constater que la notion de sûreté, pourtant omniprésente, n'a

⁴¹⁶ Répondant ainsi au célèbre adage : « *absence of evidence is not evidence of absence* ».

pas pu bénéficier d'une définition scientifique à portée générale. Penser qu'il s'agit d'une croyance « faible » est contre-intuitif mais il faut se rappeler que cette « faiblesse » porte sur l'argumentaire qui vise à l'établir. On ne devrait pas s'en étonner. Si la sûreté était une croyance forte, elle n'aurait peut-être pas tant besoin d'être défendue, soit elle relèverait d'une vérité scientifique s'il s'agissait d'une démonstration mathématique ou d'une expérience de physique soit – les systèmes de raisons étant toujours constitués d'énoncés factuels et de principes (Boudon, 2012, p. 57, p. 88) – elle bénéficierait de principes faisant consensus, comme c'est le cas de l'optimisation radiologique. Or les principes de sûreté sur lesquels elle repose font eux-mêmes débat. Le débat ne porte pas sur leur légitimité mais bien sur leur mise en œuvre. En outre, ces principes ne peuvent à eux seuls résumer la sûreté. Si la sûreté n'a pu se définir scientifiquement et qu'on lui associe volontiers, comme élément de description, le sentiment qu'elle inspire ou la perception qu'on lui voue, elle relève plutôt du sens commun.

Quant au « système de raisons » des croyances, il n'est pas facile de déterminer à quelle catégorie la sûreté pourrait appartenir. Est-elle une croyance *représentationnelle* (i.e. portant sur une représentation du monde) ou une croyance *normative* (Boudon, 2012) ? Peut-elle être univoquement déterminée ou est-elle l'objet de *consensus* ? Il est fort probable que ces questions, formulées en ces termes, ne trouvent pas de réponse et que l'on soit capable de défendre la sûreté ou son contraire, le risque, tant comme une croyance représentationnelle – *La société du risque* (Beck, [1986] 2001) – au sens où on le ferait d'une croyance religieuse, que comme une croyance normative – un *horizon normatif* (Beck, [1986] 2001, p. 51) – en l'érigeant comme devoir-être. Elle pourrait être univoquement déterminée si on pouvait la réduire à une grandeur calculable comme la dose radiologique ou un indicateur de performance mais comme telle, elle n'entraînerait ni l'adhésion du public ni même celle des autorités de réglementation compétente. La démonstration de sûreté dépasse le simple calcul de la dose radiologique. La sûreté devra être *négociée* jusqu'à atteindre un *consensus* normatif entre les différentes parties prenantes, comme le rappelle la définition même du *safety case* (IAEA, 2012, §1.3)

Que penser de ces croyances axiologiques ou normatives en termes de rationalité ? La croyance, dans ses diverses acceptions, renvoie toujours à

une absence de preuve dans l'« *attitude de l'esprit qui affirme (...) la réalité ou la vérité d'une chose (...)* », de certitude dans l'« *acte d'adhésion de l'esprit à une proposition* » ou encore de rationalité dans l'« *assentiment de l'esprit (...) à l'existence d'une réalité transcendante* » (Morfaux et Lefranc, [1980] 2020). Qu'une croyance normative ou axiologique puisse être perçue comme rationnelle est donc contre-intuitif. Hume soutiendra même que « *la croyance rationnelle n'existe pas (...) nous ne pouvons nous empêcher de croire, mais aucune croyance ne peut être basée sur la raison* » (Russell [1953] 2017, p. 767). C'est parce que depuis Hume, nous le rappelle Boudon, aucun énoncé normatif ne devrait se déduire de propositions factuelles. Pourtant, il nous arrive, nous dit Boudon, de tirer des conclusions normatives ou axiologiques de propositions dont certaines sont factuelles et d'autres normatives. En réalité, c'est parce que le théorème de Hume n'est vrai que si *toutes les propositions sont réellement à l'indicatif* (Boudon, 2012, p. 77). Or, d'après Boudon, cette rationalité axiologique peut s'appréhender par la rationalité ordinaire qui fait l'économie des trois derniers postulats du système (i.e. conséquentialisme, égoïsme et coûts-avantages). Avec les seuls trois premiers postulats, on s'affranchit des *passions et intérêts* de l'individu et on en *dissipe le solipsisme* (Boudon, 2012, p. 79, p. 106), on retrouve donc la position du *spectateur impartial* d'Adam Smith ou la *position originelle* permise par le *voile d'ignorance* de John Rawls et le système de raisons à l'œuvre est celui du bon sens (Boudon, *ibid.*, p. 80 ; Arnsperger et Van Parijs, 2003, p. 65). C'est reconnaître, plus simplement, que les croyances morales reposent sur des raisons (Boudon, 1999, p. 104). Il est intéressant de relever que, à l'instar de la rationalité instrumentale de Simon, la rationalité axiologique peut également être limitée par l'information dont l'individu dispose (Boudon, 2012, p. 84) et par la capacité qu'il a ou non à l'utiliser, c'est-à-dire rencontrer une limite procédurale (Chanut *et al.*, p. 99).

Compte tenu de ce qui précède, nous formulons le constat suivant : le principe d'optimisation radiologique répond à la théorie du choix rationnel et s'appréhende avec la méthode coûts-avantages. Lorsqu'on étend ce principe à la sûreté, en laissant de côté les réserves quant à la licéité d'un tel procédé, nous observons deux postures : la première liée à une approche procédurale de *satisficing* et campée par l'ONDRAF et la seconde liée à une approche substantive de maximisation campée par l'AFCN. A cette distinction opérée au sein de la théorie du choix rationnel, nous avons ajouté

celle opposant la rationalité ordinaire à la rationalité instrumentale. La sûreté répondant davantage au modèle de la rationalité ordinaire qu'à celui de la rationalité instrumentale, le principe d'optimisation *de la sûreté* siège donc à l'intersection de deux modèles de rationalité. Dans une perspective instrumentale, la sûreté oscillerait entre le satisfaisant et le maximisant, tenant compte des limites cognitives de l'acteur mais sans pouvoir rendre compte de la dimension proprement axiologique qui se surimpose et qui la justifie car le système de raisons échappe à cette approche. Pour saisir ce dernier, il faut recourir à la théorie de la rationalité ordinaire ou théorie cognitive de la rationalité (Boudon, 2012, p. 117). Ainsi, lorsque la doctrine internationale opère l'élargissement de portée du principe d'optimisation de la protection radiologique à la sûreté, elle néglige le système de valeurs que la sûreté recèle et étend *de facto* le paradigme de la protection radiologique à celui de la sûreté sans avoir préalablement analysé leur compatibilité.

Nous tentons de résumer notre observation dans la figure 10-10 ci-dessous, représentant l'espace des rationalités recouvrant les domaines de la sûreté et de la protection radiologique avec, en son sein, l'optimisation comme ligne de démarcation. La forme trapézoïdale, large à sa base et se resserrant au sommet, s'étend de la sûreté à la protection radiologique, entre les deux lignes horizontales (l'abscisse et une parallèle à l'abscisse). Son aspect infundibulliforme inversé évoque le rétrécissement de la portée de la sûreté vers celle plus restreinte de la protection radiologique. En ordonnée à droite, on peut constater la formalisation croissante allant de la théorie de la rationalité ordinaire reposant sur les trois premiers postulats (P1 à P3) vers la théorie de choix rationnel constituée des six postulats (P1 à P6). A mesure qu'augmente la formalisation, la puissance de généralisation de la théorie diminue. En ordonnée à gauche, on peut observer la force de la croyance, faible pour la sûreté et plus forte pour la protection radiologique. Aux postulats P1 à P3 (i.e. individualisme, compréhension et rationalité) correspond la rationalité ordinaire, les postulats P4 à P6 (i.e. conséquentialisme, égoïsme, optimisation) sont individuellement représentés avec la description de ce qu'ils ajoutent à la rationalité ordinaire : l'adjonction de P4 fait évoluer la rationalité ordinaire vers une rationalité conséquentialiste, l'adjonction de P5 vers la rationalité procédurale et l'adjonction de P6 vers la rationalité substantive.

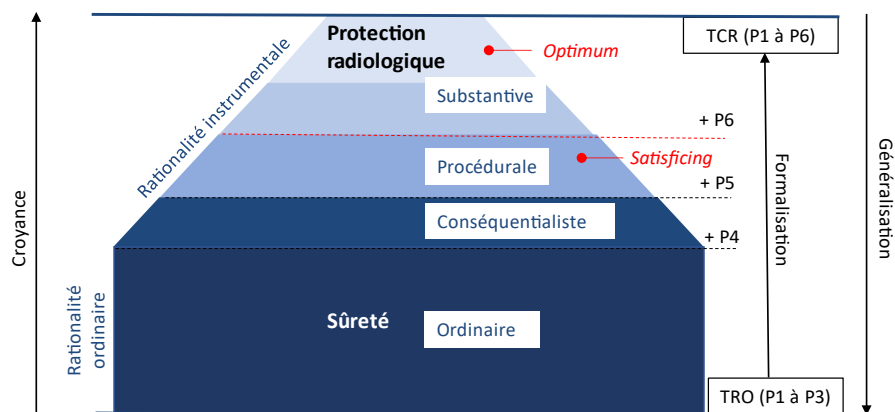


Figure 10-10 – Représentation conceptuelle de l'espace des rationalités recouvrant les domaines de la sûreté et de la protection radiologique. TCR désigne la théorie du choix rationnel et TRO la théorie de la rationalité ordinaire. P représente un postulat de la théorie de la rationalité, numéroté de 1 à 6. L'addition des P augmente le degré de formalisation et le passage d'une théorie de la rationalité à l'autre (voir texte). L'abscisse est sans graduation.

En référence à cette figure, nous pouvons considérer que nous nous sommes intéressés jusqu'ici à la partie supérieure du trapèze et qu'il nous faut à présent investir sa base, armé de la théorie de la rationalité ordinaire. La prochaine section s'intéresse à la rationalité axiologique à l'œuvre dans la manière qu'ont les acteurs AFCN et ONDRAF d'appréhender la sûreté.

10.6 Ethique et optimisation

10.6.1 Systèmes de valeurs de l'AFCN et de l'ONDRAF

Dans cette section nous cherchons à identifier les raisons à l'œuvre dans le processus de décision de l'AFCN et l'ONDRAF, dans une perspective de rationalité ordinaire attachée à la sûreté. Pour ce faire, nous analysons deux documents stratégiques que nous considérons comme reflétant l'identité des deux institutions : la *Déclaration nationale de sûreté* pour l'AFCN (dans ses versions de 2017 et 2018⁴¹⁷) (AFCN, 2017a ; AFCN 2018b) et la *Déclaration stratégique* pour l'ONDRAF (ONDRAF, 2020d).

Avant d'entamer l'analyse des systèmes de valeurs des institutions AFCN et ONDRAF, nous devons ouvrir une parenthèse sur le « principe d'amélioration continue » (AFCN, 2018, p. 2) auxquelles les deux institutions se réfèrent dans leurs *Déclaration nationale de sûreté* et *Déclaration stratégique* respectivement.

10.6.1.1 Le principe d'amélioration continue : de l'ALARA au SAHARA

Une parenté entre le principe d'amélioration continue et le principe d'optimisation peut se deviner mais comme elle ne peut s'établir de façon directe, nous nous employons ici à la mettre en évidence.

La Déclaration stratégique de l'ONDRAF recourt à « l'amélioration continue » tantôt comme une « perspective », tantôt comme une « politique » après l'avoir associée à la sûreté (voir section 10.6.1.3) mais sans indiquer l'origine du concept (ONDRAF, 2020b). Dans la Déclaration nationale de sûreté de 2018 de l'AFCN, l'amélioration continue apparaît comme un principe constituant l'un des « *sept axes que le Gouvernement considère comme essentiels* » (AFCN, 2018, p. 1) mais son origine n'est pas davantage mentionnée que dans la déclaration de l'ONDRAF. Comme l'AFCN y indique toutefois les textes fondamentaux de droit international sur lesquels se

⁴¹⁷ Les deux versions coexistent sur le site web de l'AFCN et nous les utilisons toutes les deux dans notre analyse.

fondent ses activités⁴¹⁸, il est possible de *déduire* d'où le principe « d'amélioration continue » puise sa source. En effet, ce principe n'est pas consacré en tant que tel et semble, en réalité, se référer, dans les textes de l'AFCN et de l'ONDRAF, à « *l'amélioration continue de la sûreté* » (**nous soulignons**), concept « rarement défini et rarement analysé » (Ptasekaite, 2014) et qui ne fait pas consensus puisqu'il s'oppose à celui qui promeut le « maintien de la sûreté » (Havel *et al.*, 2004) et fait polémique au sein du cénacle des régulateurs (NEA, 2002b)⁴¹⁹.

Parler d'un principe d'amélioration continue en éludant son complément d'objet exprime une certaine volonté d'en retenir seulement l'esprit afin de pouvoir l'adapter à différents contextes. C'est précisément cet esprit que nous interrogeons ici.

Dans l'explication de l'objectif fondamental de la sûreté « protéger les personnes et l'environnement contre les effets nocifs des rayonnements ionisants » (IAEA, 2007), l'AIEA recommande que les installations puissent répondre aux « normes de sûreté les plus rigoureuses pouvant raisonnablement être appliquées » (IAEA, 2007, §2.1). L'AIEA mobilise ainsi le principe dit « SAHARA » (*Safety as high as reasonably achievable*). Selon Ptasekaite, qui s'appuie sur les travaux de l'AEN, les principes ALARA, ALARP⁴²⁰ et SAHARA expriment tous la même question « *how safe is safe enough ?* » (NEA, 2002b, p. 13 ; Ptasekaite, 2014, p. 74). A cette question, il est périlleux sinon impossible de répondre, peut-être même sur un plan épistémologique pensons-nous, mais surtout, comme le dit Ptasekaite, parce

⁴¹⁸ A savoir, la Convention sur la sûreté nucléaire pour les aspects spécifiques de sûreté, la Convention commune sur la sûreté et la gestion sûre du combustible usé pour les aspects liés aux déchets et combustibles ainsi que la Convention sur la protection physique des matières nucléaires, pour les aspects de sécurité.

⁴¹⁹ En effet, l'amélioration des standards de sûreté n'est pas toujours possible lorsque certaines installations sont vieillissantes et reposent sur des bases de conception d'il y a plusieurs décennies. La question se pose alors de savoir si ces installations couvertes par leur permis d'exploitation doivent seulement démontrer que leur niveau de sûreté a pu être maintenu en procédant éventuellement aux travaux de maintenance nécessaires pour lutter contre leur vieillissement ou s'il faut imposer aux exploitants une mise en conformité à de nouvelles normes plus strictes (e.g. les stress tests requis pour tous les réacteurs nucléaires après l'accident de Fukushima). Nous ne nous attarderons pas davantage ici sur la pertinence et l'enjeu de cette question.

⁴²⁰ *As Low As Reasonably Practicable*.

que les notions de *sûreté* et de *suffisamment sûr* ne cessent d'évoluer avec le temps. Elles sont non seulement fonction du progrès scientifique et technique mais aussi des attentes sociétales. Dans une société qui semble vouloir éradiquer le risque de toute activité (non délibérément consentie⁴²¹), les attentes en matière de *suffisamment sûr* augmentent constamment. En outre, le retour d'expérience au sein même du secteur de l'énergie nucléaire peut mettre l'accent sur des aspects autrefois sous-estimés (cf. la réévaluation des risques liés aux séismes et tsunamis après l'accident de Fukushima).

Mais il existe également un lien entre l'amélioration continue et le principe SAHARA selon Rasa Ptasekaite, qui s'est interrogée sur la contribution du concept d'amélioration continue à l'objectif général de sûreté de l'AIEA. Si l'objectif fondamental de sûreté s'appuie sur le principe SAHARA, il ne fait pourtant aucune mention de la notion d'amélioration continue de la sûreté. Toutefois, la durée de vie d'une centrale nucléaire, de sa conception à son démantèlement, dépasse largement le demi-siècle, laps de temps au cours duquel la science et la technologie auront évolué. Or, se conformer aux normes de sûreté les plus rigoureuses comme l'enjoint l'AIEA ne peut s'envisager sans amélioration continue. Par conséquent, l'amélioration continue de la sûreté est indispensable à l'atteinte des normes de sûreté les plus sévères et donc au respect du principe SAHARA. Si l'amélioration continue est essentielle au plus haut niveau de sûreté possible et si l'atteinte de celui-ci est essentiel à l'objectif de sûreté, Ptasekaite en conclut, par transitivité directe, que l'amélioration continue de la sûreté est un élément essentiel de l'objectif général de sûreté de l'AIEA même si ce dernier n'en fait pas explicitement mention (Ptasekaite, 2014, p. 75).

Ce que nous retenons de ce développement est que le principe d'amélioration continue de la sûreté s'inscrit dans l'objectif général de sûreté et établit un lien de parenté avec les principes exprimant le *suffisamment sûr*, à savoir les principes ALARA, ALARP et SAHARA avec un facteur de raisonnablement (*reasonability factor*) (Ptasekaite, 2014, p. 82). Il paraît donc

⁴²¹ Nous excluons ici les comportements résultant des « conduites à risque » (Le Breton, 2004) par exemple, les attitudes contraphobiques ou ordaliques telles celles rencontrées dans les sports de l'extrême et que nous avons notamment abordé lors de précédents travaux (Depaus, 2006, pp 29-30).

légitime de voir dans cette notion d'amélioration continue⁴²², l'esprit du principe ALARA (1977) et donc celui de l'optimisation (Lahorgue, 2016). C'est cette interprétation que nous assumons dans la suite de ce développement.

10.6.1.2 L'AFCN et la Déclaration nationale de la sûreté

Dans sa « Déclaration nationale sur le sûreté et la sécurité nucléaire 2017 » (AFCN, 2017a), l'AFCN propose une politique nationale de sûreté et de sécurité fondée avant tout sur le principe de justification des activités nucléaires, le principe d'amélioration continue, la transparence, la gestion sûre et durable des déchets nucléaires, la défense en profondeur (incluant la gestion des crises) ainsi que la vision à long terme que l'AFCN interprète dans une vision transfrontalière, en vue d'un effort européen commun pour élever les standards de sûreté.

Nous remarquons que le principe de l'approche graduée, principe de sûreté selon lequel le niveau de protection doit être proportionnel au risque, est abordé sous le couvert du principe de justification. Il peut être surprenant de voir une telle compilation de principes *a priori* incommensurables avec d'une part, les principes de justification et d'amélioration continue (optimisation) clairement issus de la protection radiologique et le principe de défense en profondeur emblématique de la sûreté et d'autre part, des principes ou valeurs plus procédurales⁴²³ comme la transparence (que l'AFCN lie également à l'indépendance), la séparation institutionnelle des pouvoirs⁴²⁴

⁴²² Nous évitons de recourir au terme de « principe » en dépit et en dehors de ce qu'en déclare l'AFCN (AFCN, 2018b). En effet, Ptasekaite interroge le statut du concept d'amélioration continue en termes de principe, d'objectif ou d'obligation. Ecartant la notion d'objectif, Ptasekaite conclut que l'amélioration se situe davantage au niveau de l'obligation que du principe, en ce sens que la responsabilité de l'amélioration continue est portée par des titulaires clairement identifiés (*duty-holders*). Pour le développement de ce sujet, voir (Ptasekaite, 2014).

⁴²³ Nous empruntons à la publication 138 de la CIPR, cette distinction des principes et valeurs tels que la transparence, la responsabilité ou la participation de la société civile (*inclusiveness*) (ICRP, 2018).

⁴²⁴ En spécifiant notamment que le ministre de tutelle de l'AFCN ne peut pas avoir la politique énergétique dans son portefeuille de compétences. Rappelons en effet que la Tutelle de l'AFCN revient au ministre de l'Intérieur alors que celle de l'ONDRAF revient au(x) ministre(s) ayant l'Economie et l'Energie dans ses/leurs compétences.

que l'AFCN évoque dans son principe d'amélioration continue ou encore le principe de gestion sûre et durable des déchets.

Qui plus est, l'ordre de présentation des principes ne semblant pas répondre à une logique de regroupement thématique, il serait permis de penser que cet ordre reflète une hiérarchie. Mais rien n'est moins sûr si l'on se souvient, par analogie, que les principes fondamentaux de sûreté de l'AIEA sont également présentés de façon similaire. En effet, dans la publication de l'agence de Vienne, si les principes de justification et d'optimisation sont bel et bien présents en quatrième et cinquième positions respectivement, ils sont entourés par des principes de gouvernance tels que la capacité de direction et de gestion pour la sûreté (principe 3) ou le rôle du gouvernement (principe 2), des principes normatifs tels que le principe de responsabilité (principe 1) ou le principe de protection des générations futures (principe 7), etc. (IAEA, 2006a). Cette nature hétéroclite, qui surprend souvent l'ingénieur, ne choque habituellement pas le juriste qui voit, dans ce genre de textes fondateurs à la nature composite, une « Constitution » aux ramifications multiples sur laquelle accrocher tous les possibles développements de droit secondaire (Dimitrova, 2018⁴²⁵). Est-ce à dire que n'avons rien à apprendre de cette structure ? Nous pensons le contraire.

Dans la « Déclaration nationale sur la sûreté nucléaire, la sécurité nucléaire et la radioprotection » de 2018 (AFCN, 2018b), le gouvernement, sur proposition de l'AFCN⁴²⁶, annonce sept axes ou piliers fondamentaux qu'il considère comme essentiels. L'ordre est modifié par rapport à la version de 2017 et semble répondre cette fois à une logique thématique. Les principes ou axes partent de la protection radiologique pour aboutir à la communication transparente en passant par la sûreté (défense en profondeur), la gestion sûre et sécurisée des déchets, la coordination des différentes autorités ayant des responsabilités en matière de sécurité et de

⁴²⁵ Communication personnelle 2018. Julia Dimitrova, docteur en droit, ancienne Secrétaire générale (CEO) du BNRA (*Bulgarian Nuclear Regulatory Agency* - agence de sûreté nucléaire bulgare) est aujourd'hui Conseillère à la représentation permanente bulgare aux Nations unies, à Vienne.

⁴²⁶ La Déclaration nationale exprime un engagement du gouvernement mais celle-ci est prévue à l'article 2ter de la loi du 15 avril 1994 relative à la protection de la population et de l'environnement contre les dangers résultant des rayons ionisants et relative à l'Agence fédérale de Contrôle nucléaire, c'est-à-dire la loi fondant l'AFCN.

sûreté, et l'exigence de maintien d'un haut niveau de compétences. Ces deux versions de « Déclaration nationale » coexistent sur le site web de l'AFCN et nous pensons qu'elles doivent être analysées ensemble, de toute évidence parce que la version de 2018 ne remplace pas celle de 2017 et que les deux textes se complètent dans l'esprit du régulateur.

Le principe d'amélioration continue qui passe de la deuxième place en 2017 à la première place en 2018 aurait du mal à cacher sa filiation avec le principe d'optimisation puisqu'il en reprend la formulation ALARA (bien qu'il en modifie les termes) : « *La recherche de solutions et de pratiques visant à réduire **autant que raisonnablement possible** les éventuels détriments induits par les sources de rayonnements ionisants, maintenant et dans le futur, doit être au centre des activités des différents acteurs et de leurs pratiques* » (AFCN, 2018b, p. 2, **nous soulignons**). Le gouvernement entend également appliquer ce principe à l'évolution du cadre législatif, réglementaire et de contrôle, et souhaite que tous les acteurs concernés par la Déclaration nationale l'adoptent dans toutes leurs activités.

Le principe de justification qui puise pourtant son origine dans la protection radiologique est lui aussi présenté, dans la Déclaration nationale de 2018, comme un « *principe essentiel de la **sûreté nucléaire*** » (**nous soulignons**) qui vise la justification de toutes les activités ou pratiques « *au regard des bénéfices sociétaux que cette activité ou pratique apporte vis-à-vis des expositions aux rayonnements (...)* » (AFCN, 2017a ; AFCN, 2018b). L'approche graduée, présentée dans la Déclaration nationale de 2017, sous le principe de justification comme principe de développement de la réglementation, se retrouve, en 2018, dans l'exposé du principe de défense en profondeur comme conditionnant la mise en œuvre de celui-ci. Cette reclassification a notamment le mérite de regrouper les principes de sûreté.

La gestion sûre et sécurisée des déchets qui est une politique nationale en soi tout autant qu'une loi⁴²⁷ apparaît comme axe fondamental de la déclaration de sûreté et non comme domaine d'application de celle-ci. Nous pensons que ce choix s'explique entre autres par le fait que les déchets ne

⁴²⁷ La loi du 3 juin 2014 transposant la directive 2011/70/Euratom portant sur la gestion responsable et sûre des déchets radioactifs et du combustible usé (M.B., 2014). Notons cependant que cette loi ne reprend pas la sécurité mais seulement la sûreté.

sont pas soumis au principe de justification, ils constituent un *déjà là* qui impose de nécessaires activités ou pratiques de gestion sans que celles-ci n'aient à se défendre par rapport à un bénéfice sociétal en regard d'un préjudice causé : « *It is wrong to regard them [radioactive waste management and disposal operations] as a free-standing practice that needs its own justification* » (ICRP, 2013, §44). La justification porte ou aurait dû porter sur l'activité ou pratique qui les a générés. Remarquons que la version de 2017 de ce principe de « gestion sûre et **durable** des déchets » (AFCN, 2017a, **nous soulignons**) a fait place en 2018 à une « gestion sûre et **sécurisée** des déchets » (AFCN, 2018b, **nous soulignons**). Nous pourrions y voir une sorte de recentrage de l'AFCN sur ses missions premières vis-à-vis de la gestion des déchets : veiller à la sûreté et la sécurité de leur gestion.

Si la Déclaration nationale de 2018 énonce les principes de protection radiologique en premier lieu, il est permis de s'étonner de ne pas y retrouver explicitement le principe des limites de doses. Nous pensons que c'est parce qu'il est inclus dans les références au cadre législatif, réglementaire et de contrôle. Notons également que les pratiques médicales dérogeant au principe des limites de doses (au nom du principe de justification) confèrent à celui-ci un statut moins général.

Dans la manière d'appréhender la sûreté, les deux versions de la Déclaration nationale font donc apparaître une structure centrifuge, énonçant les principes de protection radiologique en premier lieu, tel un noyau constitutif auquel se rattachent ensuite les principes de sûreté, défense en profondeur et approche graduée pour enfin conclure en périphérie avec des principes ou valeurs plus procédurales. Cette structure n'est pas seulement suggérée par l'ordre des principes présentés dans la Déclaration nationale de 2018 – qui regardée isolément ne reflète qu'un empilement – mais aussi par les liens suggérés dans la version de 2017, moins conformes aux attentes d'une lecture linéaire, mais peut-être plus fidèles à la vision du régulateur sur les relations entre les principes. Dans la version de 2017, le principe de la responsabilité première de l'exploitant, par exemple, est inféodé au principe de justification, tout comme celui de la séparation des pouvoirs et l'indépendance de l'AFCN découlent du principe de l'amélioration continue. L'approche graduée, principe de sûreté apparaît, comme nous le disions en introduction, au niveau du principe de justification et, même si elle n'est pas

issue de ce dernier, elle lui en confère une modalité particulière, celle de développer le contrôle des activités justifiées de façon proportionnée au risque encouru. Soulignons que la notion de « durabilité » initialement présente dans le principe de gestion des déchets n'a pas été développée et a simplement disparu dans la version 2018 au profit de la « sécurité nucléaire » pour laquelle il ne lui correspond aucune parenté.

Tout se passe donc comme si la sûreté était construite au départ de la radioprotection avec, en particulier, le principe d'optimisation comme premier principe.

10.6.1.3 L'ONDRAF : sa Mission et sa Déclaration stratégique

Dans l'exécution de ses missions, l'ONDRAF dit s'appuyer sur le principe de précaution et développer des solutions durables pour les déchets radioactifs (ONDRAF, 2020c). Les solutions sont justifiées et responsables, en vue de protéger la société contre les nuisances des matières radioactives et ce, sur de très larges horizons temporels. La qualité, la transparence et la multidisciplinarité sont annoncées comme des valeurs de l'entreprise. Dans sa Déclaration stratégique (ONDRAF, 2020d), l'ONDRAF souligne le caractère durable de ses missions au service de la collectivité en consacrant à la sûreté une place centrale dans toutes ses activités. Si le principe de justification était présent dans le *Mission statement*, c'est surtout le principe d'amélioration continue qui est souligné dans le cadre de la mise en œuvre de la politique de l'ONDRAF : « *sûreté nucléaire et son amélioration continue (...)* » ; « *(...) objectifs au sein du système de gestion et de contrôle interne, dans une perspective d'amélioration continue* » ; « *une politique proactive en matière de sûreté et d'environnement (...) ce qui se traduit par une politique d'amélioration continue (...)* » (ONDRAF, 2020c). Toutefois, malgré cette redondance dans le discours, la Déclaration stratégique est avant tout centrée sur la durabilité des solutions, durabilité assurée, selon l'ONDRAF, par l'équilibre entre quatre polarités : sûr, équitable, faisable et acceptable.

10.6.1.4 Comparaison des deux déclarations (AFCN et ONDRAF)

Bien qu'il y ait des points communs évidents entre les déclarations des deux institutions tels les principes de justification et d'amélioration continue ou

encore la transparence, la proposition de l'ONDRAF diffère sensiblement de celle de l'AFCN et vient étayer l'analyse des rationalités menée jusqu'ici. En contraste avec l'AFCN qui construit son approche de sûreté sur la protection radiologique avec les principes directeurs de la justification et de l'optimisation auxquels s'ajoutent ultérieurement les principes de sûreté *défense en profondeur* et *approche graduée*, l'ONDRAF vise une solution avant tout durable qui, si elle ne peut rien concéder en matière de sûreté, doit cependant réaliser un équilibre avec des impératifs de faisabilité, d'équité et d'acceptabilité.

Précisons, à toutes fins utiles, qu'il nous paraîtrait caricatural de prétendre que les valeurs d'une institution ne se retrouvent pas dans l'autre. Nous ne songeons pas à prétendre que l'équité des solutions de gestion des déchets serait hors de propos pour le régulateur, pas plus que l'indépendance, si chère à l'AFCN, ne constituerait pas également une valeur importante dans la gouvernance de l'ONDRAF. Toutefois, le positionnement des institutions en regard de leurs missions publiques est très différent. Nous ne parlons pas ici de la différence entre leurs missions légales mais bien de leurs positionnements respectifs par rapport à celles-ci ou étant donné celles-ci. La nature et le choix des principes mis en exergue dans leurs déclarations nationale ou stratégique confère une perspective axiologique à l'analyse des rationalités (voir section 10.7). C'est ce que nous proposons de mettre en évidence dans la prochaine section.

10.6.2 Perspective axiologique : quelles théories de la justice distributive pour l'ONDRAF et l'AFCN dans leur conception de la sûreté ?

Nous formulons l'hypothèse raisonnable que les textes stratégiques que nous analysons dans les prochaines sections représentent la vision générale développée par chacune des deux institutions. Malheureusement, la perspective axiologique que nous cherchons à investiguer est seulement esquissée par lesdits textes. Dès lors, afin d'en tirer le meilleur parti, nous serons contraints d'en déborder quelque peu, en recourant tantôt à certaines critiques en guise de contrepoint pour notre analyse, tantôt en

retournant à la doctrine internationale qui leur a servi de source d'inspiration.

10.6.2.1 Analyse de la Déclaration stratégique de l'ONDRAF et de sa position sur la réversibilité des stockages en termes de justice sociale

En centrant ses solutions de gestion sur la durabilité, l'ONDRAF inscrit, en première approche, sa préoccupation de protection des générations futures dans une perspective éthique héritière du suffisantisme de Brundtland ou de la théorie de justice de Brian Barry (voir section 7.3.3).

En outre, dans sa Déclaration stratégique, l'ONDRAF souscrit à la formulation plus ambitieuse du principe de protection des générations futures en précisant ne pas vouloir reporter sur celles-ci de « charges indues » ou « excessives » en conformité avec les principes fondamentaux de la gestion des déchets de l'AIEA (IAEA, 1995, Principe 5, p. 17) et de l'article 1 de la directive européenne 2011/70/Euratom portant sur la gestion responsable et sûre des déchets radioactifs (EC, 2011). Toutefois, comme le fait remarquer Axel Gosseries, cette « règle d'or » demeure assez vague dès lors qu'elle ne spécifie pas ce qu'elle entend par « indu » ou « excessif » et n'a recours à aucune théorie de la justice pour le définir (Gosseries, 2008c, p. 178). L'ONDRAF, dans sa volonté de prendre une décision « sans délai »⁴²⁸ sur la gestion à long terme des déchets, avant la sortie du nucléaire en Belgique⁴²⁹, défend une interprétation proposée par l'AIEA et reprise par Gosseries, selon laquelle ce sont les générations qui récoltent les bénéfices de l'activité nucléaire qui doivent aussi en gérer les déchets (IAEA, 1995, §317, p. 17 ; ONDRAF, 2011b, p. 19 ; ONDRAF, 2020b, pp. 101-103 ; ONDRAF, 2021, pp. 8-9 ; Gosseries, 2008c, p. 179). Les raisons de cette prise de position sont multiples, elles sont tantôt politico-légales eu égard à la situation d'infraction européenne (EC, 2018), financières en vue d'élaborer des scénarios réalistes et éviter la création de passifs nucléaires, mais elles sont aussi explicitement d'ordre éthique (ONDRAF, 2021). Cette posture tend à vouloir exempter les générations futures de toute gestion des

⁴²⁸ Entre autres dans (ONDRAF, 2011b, p. 19 ; ONDRAF, 2020b, pp. 101-103).

⁴²⁹ Entre autres dans (ONDRAF, 2021, pp. 8-9).

conséquences d'une technologie de laquelle elles n'auraient pu tirer aucun bénéfice direct⁴³⁰.

Cette position semble également renforcée par la proposition de l'ONDRAF de limiter la réversibilité⁴³¹ du stockage à sa phase d'exploitation (ONDRAF, 2011b, p. 21 ; ONDRAF, 2020f, p. 33), ce qui exprime la volonté de soustraire le plus rapidement possible toute nécessité de surveillance active dans le chef des générations futures et, en particulier, celles qui naîtraient après la fermeture complète du stockage. En effet, s'il est inévitable d'occasionner

⁴³⁰ De cette façon, comme le fait remarquer Gosseries, il n'est pas tenu en compte les éventuels bénéfices dans d'autres secteurs de la société qui seraient transmis aux générations futures et qui pourraient éventuellement compenser le tribut occasionné par l'héritage des déchets (Gosseries, 2008c).

⁴³¹ Afin d'éviter toute ambiguïté, il est utile de préciser que la définition de la notion de « réversibilité » en Belgique a évolué avec le temps et s'est distanciée de l'acception retenue internationalement. Selon l'AEN, la réversibilité doit se comprendre au niveau du processus décisionnel alors que la « récupérabilité » recouvre l'ensemble des opérations physiques de récupération des déchets, quelle que soit la phase de développement de l'installation de stockage (NEA, 2001). Dans son Plan Déchets, l'ONDRAF a adopté une autre définition pour ses deux concepts, confiant le processus décisionnel au vocable d'« adaptabilité ». Réversibilité et récupérabilité recouvrent tous deux des opérations physiques de récupération des déchets mais en procédant à la distinction suivante : la réversibilité se restreint à la « *possibilité technique de récupérer, de façon sûre, des colis de déchets mis en place dans des galeries de dépôt non encore scellées en utilisant des moyens identiques ou comparables à ceux utilisés pour la mise en place. La réversibilité est strictement liée à l'exploitation du dépôt (...)* » alors que la récupérabilité des déchets est « *la possibilité technique de récupérer, de façon sûre, les déchets mis en dépôt dans des galeries de dépôt scellées, en utilisant le cas échéant d'autres moyens que ceux utilisés pour leur mise en place* » (ONDRAF, 2011a, p. 135). C'est sur cette base que s'est élaborée la note de convergence entre l'ONDRAF et l'AFCN sur ces notions et concepts associés (Depaus *et al.*, 2020). Toutefois, lors de la proposition de politique nationale sur la gestion à long terme des déchets radioactifs, soumise par l'ONDRAF pendant l'été 2020, à laquelle nous avons activement contribué, et revue début de l'année 2021 afin de tenir compte de la déclaration gouvernementale, il a fallu déroger à ces définitions. La proposition de politique nationale étant destinée à devenir un arrêté royal, elle ne pouvait introduire de notion qui n'aurait pas été préalablement contenue dans la loi dont elle allait constituer un arrêté d'exécution. La notion d'adaptabilité (ou de flexibilité) introduite dans le Plan Déchets ne figurant pas dans la loi du 3 juin 2014, il fallait utiliser un autre terme et ce fut celui de « réversibilité » qui fut détourné vers la notion générale de flexibilité, rendant finalement justice mais sans le vouloir, à la terminologie internationale. Le Rapport au Roi fut rédigé en conséquence, en tentant néanmoins de sauver la réflexion commune de l'ONDRAF et l'AFCN dont les idées ont dû être regroupées sous le seul terme de « récupérabilité » (ONDRAF, 2021). Le lecteur critique doit donc se prémunir contre toute erreur d'anachronisme. La réversibilité dont il est ici question est celle entendue par l'ONDRAF avant la mise à jour de sa proposition de politique nationale entre l'été 2020 et le printemps 2021.

un certain préjudice aux générations qui naîtront pendant la phase d'exploitation – rappelons que celle-ci est estimée à un siècle⁴³² (ONDRAF, 2019a, p. 189) –, il paraît évitable de prolonger « indûment » cette charge.

Bien entendu, on pourrait objecter, contre toute analyse éthique, qu'il n'y a que des raisons techniques qui puissent expliquer cette position. Comme la plupart des gestionnaires de déchets radioactifs, l'ONDRAF privilégierait la conversion à l'état passif du système de stockage le plus rapidement possible. En effet, les modalités de réversibilité et de récupérabilité constituent des contraintes de conception qui ne servent pas la sûreté à long terme⁴³³. Plus encore, ces dispositions ont un caractère qui s'opposent à l'essence du principe de sûreté passive et sont donc à cet égard contre-nature puisque, par définition, un stockage est une mise en dépôt sans intention de retrait ultérieur comme le stipule la directive 2011/70/Euratom (EC, 2011, art. 3, al. 3). De telles dispositions nuisent dès lors à la mise en sûreté du système, en retardant celle-ci. Outre la sûreté, il y a également des raisons liées à la sécurité comme la protection contre le terrorisme ou plus simplement, à mi-chemin entre sûreté et sécurité, la question d'instabilité possible de notre société et de notre civilisation qui est, en soi, un sérieux argument contre la récupérabilité (Gosseries, 2008c, p. 181). Mais nous soutenons qu'il existe encore d'autres raisons qui s'analysent bel et bien à l'aune de l'éthique.

Dans certains de nos précédents travaux cherchant à évaluer l'impact sanitaire de différentes options de gestion à long terme des déchets

⁴³² Nous regroupons ici phase de construction et phase d'exploitation. En toute rigueur, selon les calculs d'ingénierie actuels, la phase de construction devrait durer 40,1 ans et la phase d'exploitation 37,1 ans, la clôture du stockage 8,4 ans, soit un total de 85,6 ans (ONDRAF, 2019a, p. 182). Vu le caractère hautement spéculatif de certaines de ces hypothèses, un siècle paraît une bonne approximation dans ce contexte.

⁴³³ Parmi les contraintes de conception, citons la nécessité de raccourcir les galeries de stockage et le développement de matériaux de remblayage qui puissent être facilement excavés (Nieder-Westermann, 2011, pp 45-46). La première entraîne nécessairement une multiplication du nombre de galeries pour un inventaire de déchets donné et par conséquent un nombre croissant d'intersections et de ramifications en sous-sol pouvant nuire à la sûreté opérationnelle en phase d'exploitation. La seconde peut éventuellement priver la sûreté à long terme d'une barrière étanche à hautes performances. Cependant, la pratique tempère ce dernier constat puisqu'il peut être nécessaire pour la diffusion des gaz en sous-sol de choisir de toute façon un matériau de remblayage plus perméable.

radioactifs, l'entreposage de surface et le stockage géologique avec ou sans dispositions particulières facilitant la récupération des déchets, nous avons montré que le stockage irréversible était préférable pour les communautés locales et les travailleurs sur site. En appliquant un critère d'inspiration rawlsienne cherchant à maximiser le bien-être des plus vulnérables, nous proposons le stockage sans modalités de réversibilité comme l'option la plus équitable (Kermisch *et al.*, 2016 ; Kermisch et Depaus, 2018a). Cette conclusion contre-intuitive n'est pas nécessairement généralisable puisque les hypothèses de l'étude sont très restrictives mais elle a le mérite de révéler des enjeux souvent sous-estimés et d'encourager une analyse plus raisonnée de la récupérabilité qui ne peut être présentée comme une panacée à toutes les préoccupations éthiques (Kermisch 2016a ; Kermisch 2016b).

Parmi celles-ci, les possibilités de choix des générations futures sont le plus souvent invoquées et, avec elles, le risque de restreindre l'autonomie des générations qui succèderaient à l'ère nucléaire si l'on optait pour une solution jugée « irréversible ». C'est cet argument qui semble le plus souvent repris en faveur de la réversibilité, y compris politiquement, comme l'illustre le communiqué de presse (Belga) d'un parlementaire écologiste belge reproduit ci-dessous :

« Le député Jean-Marc Nollet (Ecolo) a dénoncé ce vendredi soir la décision prise par le conseil d'administration de l'Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles (ONDRAF) de recommander au gouvernement l'"enfouissement passif" de déchets nucléaires hautement radioactifs, exigeant une consultation publique sur ce sujet.

"Je m'insurge de cette décision du conseil d'administration de l'ONDRAF", a-t-il affirmé en soirée à l'agence Belga, en expliquant que cette proposition impliquait un enfouissement "à tout jamais, sans contrôle", de déchets ayant une durée de vie d'un million d'années – ce qui engagerait la Belgique "pour des centaines de générations" à venir.

Les écologistes sont favorables à une solution permettant d'avoir accès aux déchets nucléaires dans l'attente de progrès réalisés par la science pour les traiter plus efficacement.

La ministre fédérale de l'Energie, Marie Christine Marghem, (MR), souhaite "ouvrir le jeu" et qu'une étude soit menée sur les couches géologiques susceptibles d'accueillir au mieux les déchets avant de procéder à l'identification des communes intéressées. » (Belga, 2018)

Cet argument portant sur la liberté de choix s’oppose également au principe même de la sûreté passive – qu’une récupérabilité pourrait venir tempérer – tout en se mélangeant à une perception du stockage géologique comme une solution immature voire non scientifique puisque le député s’en remettrait plutôt aux « progrès de la science ». Nous allons y revenir. En raison du caractère multifactoriel de l’opinion de l’ONDRAF sur la réversibilité et la récupérabilité, les raisons techniques mais surtout légales intervenant en tête, il est difficile d’identifier, en toute rigueur, ce qui constituerait la position éthique de l’Organisme sur le sujet. C’est pour cette raison que les propos des détracteurs de la solution proposée par l’ONDRAF, comme le parlementaire Jean-Marc Nollet, fournissent un utile contrepoint que nous choisissons de commenter. Formulons tout d’abord quelques remarques générales, à titre liminaire, sur l’intervention de Jean-Marc Nollet avant d’en approfondir l’examen sur le plan éthique :

- les propos de l’écologiste nous semblent fournir un argument à courte vue puisque tout choix d’option porte en soi son lot d’irréversibilité et de risques y compris toute solution d’attente ;
- dans la forme, l’argument emprunte un mécanisme que l’on qualifierait volontiers de « sophiste » en retournant le principe de protection des générations futures contre lui-même au nom de la liberté desdites générations mais sans établir de cadre d’analyse ou de jugement normatif permettant éventuellement d’imposer le droit à cette liberté sur celui de leur protection. De cette façon, il oppose deux principes éthiques, le principe d’autonomie (auquel on rattache la liberté de choix) et le principe de bien-être (auquel on rattache la sûreté) mais sans les discuter, nous y reviendrons ci-après. Ainsi, selon le parlementaire, il devient séant soit de ne pas décider maintenant soit d’opter pour une solution technique « ouverte » (alors que la sûreté du stockage réside dans son scellement) de façon à ne pas compromettre un choix futur (mais quel futur ?).
- Afin d’éluder la question des risques qui seraient liés à une telle « ouverture », le statut scientifique de la solution d’enfouissement est implicitement mais efficacement attaqué. Puisque le parlementaire préconise d’attendre « *les progrès de la science* », il donne l’impression que la solution préconisée par l’ONDRAF et la communauté

internationale n'est pas elle-même issue d'une recherche scientifique de plus d'un demi-siècle et toujours, elle aussi, « en progrès ». En effet, en croisant le communiqué de 2019 avec un communiqué plus ancien, nous pensons que ce que dénonce en fait le parlementaire n'est pas le manque de progrès dans la voie du stockage géologique mais bien le statut même de cette solution :

*« Pour les écologistes⁴³⁴, l'ONDRAF se contente de ne vouloir retenir que **l'option la plus habituelle, la plus simple et la moins chère**. Or, disent les Verts, l'enfouissement en profondeur coûtera cher au contribuable. »* (Belga, 2017, nous soulignons)

Ce communiqué de 2017 laisse à penser que la solution du stockage géologique est une solution considérée comme peu voire non scientifique, dont « *les progrès de la science* » pourraient nous libérer en proposant une *vraie* solution. Si notre interprétation est juste, tout se passerait à la manière d'une *rétorsion dans le dialogue* qui « *montre dans l'acte d'affirmer ce qui s'y trouve nécessairement* » (Lambert et Leclerc, 1996, p. 77) puisque pour que cet argument soit réellement valable, il faudrait supposer que la science soit porteuse de solution. Or, c'est cette science elle-même que le parlementaire contesterait s'il reconnaissait l'option d'enfouissement comme solution scientifique. Afin d'éviter toute contradiction logique, il lui faut donc disqualifier l'option d'enfouissement géologique du panel des solutions raisonnables et scientifiquement fondées. Pari osé, voire grotesque ? Les propos du parlementaire frôleraient l'absurde s'ils ne pouvaient compter, par ailleurs, sur le fait que la solution d'enfouissement est déjà elle-même perçue, par le grand public, comme un cache-misère, répondant à une

⁴³⁴ Représentés par leurs présidents de l'époque (2017) : Jean-Marc Nollet (Ecolo) et Kristof Calvo (Groen).

stratégie simpliste de *creuser un trou pour oublier*⁴³⁵, que nous tenons pour égale du « forgetting-by-not-showing » (Laes et Bombaerts, 2021, p. 8)

Revenons à présent aux principes éthiques. Si l'on considère les principes issus initialement de l'éthique médicale, éthique également reprise comme « éthique appliquée » par la CIPR (ICRP, 2018, §B1), à savoir les principes de justice, du respect de l'autonomie, de bienveillance et de non-malveillance (Beauchamp et Childress 2001) – les deux derniers étant repris plus généralement sous un principe commun de bien-être (Gamborg 2002 ; Jensen *et al.*, 2011 ; Kaiser et Forsberg, 2001 ; Kaiser *et al.* 2007 ; Kermisch et Depaus, 2018a, Mephram 2000 ; Mephram *et al.* 2006 ; Oughton *et al.* 2004) – et qu'on les adapte au contexte plus général des technologies à risque, nous retrouvons essentiellement trois de ces principes sous une forme quelque peu adaptée : le principe de bien-être, le principe de consentement informé (héritier du principe d'autonomie) et le respect de l'équité (héritier du principe de justice) (van de Poel et Royakkers, 2011 ; Kermisch et Depaus 2018 ; Kermisch et Depaus, 2020). En soutenant une réversibilité (très) limitée dans le temps, l'ONDRAF ferait clairement passer le principe de bien-être avant celui d'autonomie en cherchant avant tout à protéger rapidement le plus de générations futures possibles de la façon qui, selon lui, serait la plus efficace et ce, quitte à les priver du droit de reconsidérer l'option de gestion choisie par leurs aïeux.

En plus de cette considération temporelle, il y a une préoccupation également spatiale dans le chef de l'ONDRAF puisqu'on peut supposer que, pour justifier son choix, le sort des communautés locales et des travailleurs sur site ne lui a pas été indifférent. En effet, rappelons que ce sont eux qui

⁴³⁵ En cause, la communication désastreuse autour du stockage géologique par les gestionnaires de déchets eux-mêmes en laissant par exemple, les autres options en discussion (qui ne peuvent pourtant pas se substituer aux stockages) se faire reconnaître comme *technologies nucléaires avancées* (Aït Abderrahim, 2013). Si les technologies de partitionnement et transmutation sont des technologies avancées alors par contraposition (*Si A Alors B, la contraposée est Si non B Alors non-A*), ne pas y avoir recours parce que l'on préconise plutôt le stockage géologique revient à ne pas considérer celui-ci comme une technologie nucléaire avancée. Certes... mais ne pas être une technologie *nucléaire* avancée (en référence au réacteur nucléaire) n'implique pas de ne pas être une technologie avancée. L'élision est pourtant volontiers faite par le grand public (et par les spécialistes eux-mêmes). Qu'est-ce donc alors que ce stockage géologique ? Une technologie « retardée » ?

subissent en premier les nuisances d'un stockage en exploitation et leur sort se révèle donc moins favorable si l'on en étend la période d'exploitation ou si, aux fins d'une récupérabilité accrue, l'on maintient le stockage dans un état de veille prolongée.

10.6.2.2 ONDRAF et le cadre moral de la durabilité

Nous avons précédemment relevé que l'ONDRAF, dans sa Déclaration stratégique, insiste sur la durabilité (*sustainability*) des solutions qu'il propose en présentant celles-ci comme réalisant un équilibre selon quatre dimensions : sûreté, faisabilité, équité et acceptabilité. Ces dimensions étant obtenues par la convolution des disciplines ou centres d'intérêt suivants comme l'illustre la figure ci-dessous (figure 10-11) :

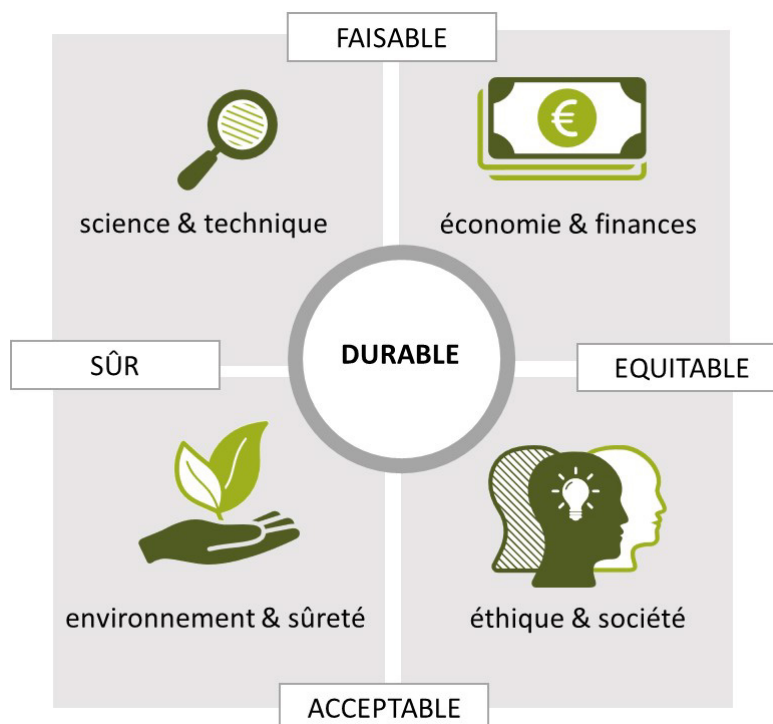


Figure 10-11 – Ce schéma, issu de la Déclaration stratégique de l'ONDRAF (ONDRAF, 2020d), illustre la manière dont les domaines science & technique, économie & finances, environnement & sûreté et éthique & société contribueraient au développement d'une solution à la fois sûre, faisable, équitable et acceptable, en un mot durable.

La durabilité apparaît dès lors, en suivant la ligne de pensée de Céline Kermisch et Benham Taebi, plutôt comme un cadre moral constitué autour de différentes valeurs (Kermisch et Taebi, 2017). Ce cadre se substitue à la prise de position souvent manichéenne décrétée autour de l'évaluation sommaire d'une technologie à l'aune de son impact sur l'environnement et son rôle joué par rapport à l'appauvrissement des ressources planétaires : « ceci est durable, cela ne l'est pas ». Dans le discours souvent clivant et simplificateur sur la durabilité, ces auteurs dénoncent à la fois la part d'arbitraire – une technologie donnée peut être durable vis-à-vis d'un aspect particulier et non durable vis-à-vis d'un autre – et le côté limitatif d'une durabilité vue sur un mode dichotomique⁴³⁶.

La notion de développement durable du rapport Brundtland (WCED, 1987) sous-tend une théorie de justice sociale qui, dans le cas de l'énergie nucléaire, comporte tant une dimension intragénérationnelle (i.e. les communautés locales au voisinage des installations nucléaires ainsi que les travailleurs versus la société civile considérée dans son ensemble) qu'une dimension intergénérationnelle, c'est-à-dire une considération spatiale pour la première et une considération temporelle pour la seconde. Avec la théorie de Brian Barry basée sur le postulat d'égalité, c'est-à-dire le droit pour ces générations de mener une vie bonne selon leur propre conception, deux obligations apparaissent : le maintien des intérêts vitaux des générations futures ainsi que le maintien de leur bien-être. La première obligation peut s'associer, pour le cas spécifique du nucléaire, aux valeurs de sûreté, sécurité et « bienveillance à l'égard de l'environnement » que Kermisch et Taebi distinguent de la sûreté⁴³⁷ et la seconde, aux valeurs de viabilité économique

⁴³⁶ Remarquons avec Laes qu'une autre façon d'échapper à cette dichotomie serait de formuler autrement la question de l'existence des technologies « durables en soi » en proposant un questionnement sur la possibilité, pour une technologie donnée, de contribuer à un développement durable ou peut-être mieux encore, en interrogeant les conditions auxquelles cette contribution serait possible (Laes, 2006, p. 31).

⁴³⁷ Les auteurs distinguent l'environnement de la sûreté pour pourvoir lui dédier un traitement spécifique, sur la base d'une valeur intrinsèque ou seulement procédurale, dans une perspective d'une valeur en soi ou au contraire, anthropocentrique. Cette distinction est pertinente quand on traite la question de l'énergie nucléaire sur l'ensemble du cycle du combustible. Elle n'a que peu de pertinence ici puisque la gestion des déchets ne concerne que l'aval du cycle (une perspective plus limitée donc) et que la sûreté englobe en pratique l'homme et l'environnement, celui-ci étant aujourd'hui perçu de façon non anthropocentrique (voir à ce sujet les travaux plus récents de la CIPR sur les *non-human biota* (ICRP, 2014)).

et de durabilité⁴³⁸ (pérennité) des ressources (Kermisch et Taebi, 2017). Il existe donc un cadre de valeurs associé à la notion de durabilité.

Dans la typologie de l'ONDRAF, nous retrouvons certaines d'entre elles. Avec « environnement et sûreté », nous rejoignons le principe de préservation des intérêts vitaux, avec le domaine « économie et finances » contribuant à la faisabilité de la solution, la valeur de viabilité économique et par conséquent, le principe de maintien du bien-être. La sécurité n'apparaît étonnamment pas dans la Déclaration stratégique de l'ONDRAF ni dans sa déclaration de mission.

En analysant le schéma de la Déclaration stratégique, l'espace « science et technique » n'a de toute évidence pas de valeur intrinsèque mais reflète l'idée selon laquelle les solutions proposées sont scientifiquement fondées et bénéficient de développements techniques avancés. « Science et technique » semblent être tant au service du développement d'une solution sûre qu'une garantie de viabilité. En effet, la polarité « faisable » repose sur « l'économie et la finance » ainsi que sur la « science et la technique ». La polarité « sûr » repose non seulement sur la « sûreté et l'environnement » mais aussi sur la « science et la technique ». Science et technique sont donc le dénominateur commun de ces deux polarités.

L'analyse de « éthique et société » est plus délicate et doit être décomposée. « Société » fait référence au baromètre sociétal (SCK CEN, 2018) et aux consultations du public dans le cadre de procédures légales (Goorden *et al.*, 2009 ; Fondation Roi Baudouin, 2010 ; Aerts *et al.*, 2010 ; ONDRAF, 2020b). Le recours à des approches délibératives, de type ascendant (*bottom-up*) qui puissent refléter la variété des préoccupations et des jugements de valeurs des différentes parties prenantes, semble se référer naturellement au courant pragmatique, plutôt qu'à une vision éthique relevant d'une conception qui s'appuie sur des valeurs choisies indépendamment de la problématique à l'examen.

⁴³⁸ Les auteurs distinguent en anglais « *durability* » et « *sustainability* » que nous nous devons de traduire tous deux en français par « durabilité » alors qu'ils revêtent des concepts différents. Le premier réfère à la pérennité des ressources alors que le second se réfère au « développement soutenable » (Dron, 1995, p. 58).

Le courant pragmatique est souvent mobilisé sur les sujets de gestion des déchets radioactifs afin de sortir précisément des clivages égalitariste/utilitariste identifiés à la section 7.3, ou des jugements scientifiques/non scientifiques ou objectifs/subjectifs. Il s'agit, selon Cotton, d'une approche à la fois empirique voire « méta-éthique » – s'attachant à comprendre la nature des situations éthiques plutôt que de proposer un jugement normatif – et « constructiviste » qui réhabilite l'apprentissage par essais et erreurs. Avec le pragmatisme, il y a donc une moralité attachée à chaque situation spécifique (Cotton, 2005). Toutefois, ce volet « société » qui semble faire la part belle à la recherche de l'acceptation effective par la population des solutions proposées par l'ONDRAF est associé à « l'éthique » au sens large, qui renvoie à la polarité « acceptable » et la polarité « équitable ». Il y aurait donc comme une recherche *ex ante* d'une acceptabilité des solutions fondées tant sur l'équité que sur la sûreté qu'elles peuvent garantir. Cette référence à l'« éthique » entendue au sens large n'est pas vraiment informative mais, comme nous l'avons vu, la polarité « équitable » qu'elle soutient nous renvoie à la discussion sur l'équité tant intragénérationnelle qu'intergénérationnelle et ce, en parfaite congruence avec la durabilité (*sustainability*) annoncée.

La durabilité des ressources, valeur que Kermisch et Taebi associent à l'obligation du maintien du bien-être chez Barry, semble non pertinente dans la question de gestion des déchets à moins, comme le suggèrent ces auteurs de *Sustainability*, de l'associer à la notion de récupérabilité (Kermisch et Taebi, 2017, p. 10). En effet, la durabilité des ressources est davantage préservée avec un stockage permettant la récupérabilité (et donc la réutilisation éventuelle des déchets) qu'avec un stockage irréversible, bien que cet avantage ne vaille que pour des générations futures relativement proches qui auraient gardé vive la mémoire du stockage.

Nous savons par ailleurs que l'ONDRAF semble être partisan d'une période de récupérabilité plus raccourcie⁴³⁹, notamment avec le souci de préserver le bien-être des communautés locales de l'intérêt global que la récupérabilité pourrait (éventuellement) représenter pour la société entière, si elle était maintenue le plus longtemps possible. Il n'y aurait donc pas ici, de la part de l'ONDRAF, de réelle préoccupation au sujet de la durabilité des ressources en tant que telle. En effet, si l'ONDRAF favorise une récupérabilité courte dans le temps, elle ne fait pas primer l'éventuelle reconversion des matières enfouies en nouvelles ressources dans un avenir lointain. Ce point de vue est d'ailleurs partagé par beaucoup d'autres agences de gestion des déchets radioactifs. Si celles-ci identifient bien trois types de motifs justifiant le recours à la récupérabilité – une déviation par rapport à la sûreté, l'avènement de nouvelles technologies permettant une meilleure gestion ou encore un changement d'ordre économique ayant pour effet de modifier la valeur marchande des ressources (Winsley et Pearson, 2021, p. 9) –, nombreuses sont aussi celles qui rappellent qu'en dehors des raisons de sûreté, les autres motifs ne relèvent pas de leurs prérogatives (Fritzell, 2021). Comme nous l'écrivions déjà précédemment, en soutenant une récupérabilité limitée dans le temps, l'ONDRAF ferait clairement passer le principe de bien-être – entendu ici comme principe de bienveillance englobant la sûreté, c'est-à-dire dans la théorie de Barry, les intérêts vitaux – avant le principe d'autonomie.

Les solutions avancées par l'ONDRAF, si elles se veulent certes durables, ne cachent pas pour autant la plus grande importance qu'elles accordent à la

⁴³⁹ Nous employons ici le terme de « récupérabilité » afin de désigner sans ambiguïté la possibilité de récupération physique des déchets. C'est l'acception utilisée ici par Kermisch et Taebi que nous commentons. Cette acception est celle la plus communément admise internationalement, à la suite des publications de l'AEN. Rappelons qu'en toute rigueur et comme signalé antérieurement (voir section 10.6.2.1), c'est la réversibilité que l'ONDRAF entend restreindre. Toutefois cette « réversibilité » est à comprendre dans le vocabulaire propre de l'ONDRAF tel qu'il fut d'ailleurs repris dans la note de convergence avec l'AFCN, c'est-à-dire une récupération des déchets avant scellement des galeries. Afin de ne pas entacher le raisonnement par une diversion terminologique, nous nous alignons sur le vocabulaire employé par Kermisch et Taebi.

préservation des intérêts vitaux qu'à la possibilité de choix pour les générations futures de réutiliser ou de recycler des ressources⁴⁴⁰.

10.6.2.3 Quel modèle de justice distributive pour l'ONDRAF ?

La préoccupation des générations futures dans l'objectif général de sûreté nous a fait envisager les principales théories de justice sociale à l'aune de l'équité intergénérationnelle dans le chapitre 7, section 7.3. Nous souhaitons disposer d'une sorte de « boîte à outils » (Gosseries, 2008b) en vue de l'analyse des positions des institutions ONDRAF et AFCN en matière de justice distributive. Nous sommes conscients qu'une démarche visant la recherche de principes normatifs dans une matière aussi composite que la gestion des déchets radioactifs procède d'une nécessaire « abstraction et simplification » qui suppose un cadre de réflexion « apolitique » (Laes et Bombaerts, 2021, p. 2). Nous assumons cette stylisation car nous recherchons, tant du point de vue épistémologique qu'éthique, un archétype de pensée à la source d'une polarisation des points de vue entre l'AFCN et l'ONDRAF et non un point de vue sociologique dans un processus décisionnel ou une perspective politique, bien que nous en reconnaissons toute la pertinence⁴⁴¹.

Les sections précédentes nous ont invité à considérer l'ONDRAF dans la lignée des travaux de Barry et du suffisantisme de Brundtland. Nous renforçons ici l'adoption de ce point de vue en suivant l'analyse de Gosseries sur les différentes formes de suffisantisme (Gosseries, 2016). Avant de pouvoir conclure sur le choix du modèle de justice distributive choisi par l'ONDRAF, nous cherchons d'abord à vérifier si l'Organisme ne pourrait pas adopter une position éthique en faveur de la durabilité qui serait éventuellement compatible avec d'autres courants éthiques comme l'utilitarisme ou l'égalitarisme rawlsien.

⁴⁴⁰ En accord avec des « *mission statement* » très similaires d'autres organisations. Ainsi par exemple, celui de l'agence de gestion des déchets radioactifs suédoise (SKB) : « *The mission of SKB is to put the spent fuel underground, not take it back* » (Fritzell, 2021).

⁴⁴¹ Notre opinion et notre témoignage ont été sollicités par Erik Laes, dans le cadre de sa recherche sur une possible médiation politique dans le domaine des déchets radioactifs en utilisant une perspective foucauldienne (Laes et Bombaerts, 2021).

Commençons par les nuances du suffisantisme, en particulier celles de Daly et de Sen, celle de Pinchot⁴⁴² étant assimilable à celle du rapport Brundtland et elle ne requiert pas d'analyse spécifique (Gosseries, 2016, p. 4). Le suffisantisme de Daly – qui postule que les besoins premiers de la génération présente prévalent sur ceux des générations futures mais aussi que ces derniers ont la préséance sur les frasques extravagantes de la génération présente (Daly, 1996) – n'est pas à l'œuvre ici. Bien que la préservation des intérêts vitaux des générations futures lointaines est une absolue nécessité et que celle-ci ne pourrait être hypothéquée par des prérogatives exorbitantes des générations situées dans un futur proche – on pense à la question de la récupérabilité par exemple –, elle ne résulte pas d'un choix de l'ONDRAF. Que l'exigence de récupérabilité ne puisse en aucun cas menacer la sûreté à long terme est un fait établi indépendamment de tout choix de l'Organisme (NEA, 2001). En revanche, ce qui relève d'une caractéristique propre à l'ONDRAF, c'est de choisir entre l'autonomie de choix des générations futures proches, ayant une pertinence dans la question de la récupérabilité, et la préservation des intérêts vitaux de ces mêmes générations vivant à proximité du site de stockage. Le choix de l'ONDRAF est donc spatial et intragénérationnel.

La formulation du suffisantisme par Sen⁴⁴³, qui élargit la conception du développement durable de Brundtland en décalant le point de vue des besoins vers celui des libertés (Sen, 2014 cité dans Gosseries, 2016), ne nous paraît pas davantage pertinent pour refléter la préférence de l'ONDRAF. Précisément, la préservation des intérêts vitaux ou besoins fondamentaux est invoquée ici pour restreindre, si besoin, l'expression des libertés des générations futures.

⁴⁴² Pinchot : « *it recognizes the right of the present generation to use what it needs and all it needs of the natural resources now available, but also recognizes equally our obligation so to use what we need that our descendants shall not be deprived of what they need* » (Pinchot cité dans Gosseries, 2016) versus Brundtland « *it [sustainable development] meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs* » (WCED, 1987).

⁴⁴³ Sen : « *The idea of sustainable development can be broadened from the formulations proposed by Brundtland and Solow to encompass the preservation and expansion of the substantive freedoms and capabilities of people today without compromising the capability of future generations to have similar or more freedoms.* » (Gosseries, 2016)

Venons-en à une possible objection sur l'adoption du suffisantisme par l'ONDRAF. Le suffisantisme étant par définition non *cléronomique*, comment la position de l'ONDRAF pourrait-elle être exprimée en termes suffisantistes puisque l'héritage nucléaire des générations précédentes est bien ce dont l'ONDRAF tente d'adoucir le tribut vis-à-vis des générations futures ? Le passé intervient donc dans la manière de fixer le niveau standard de ce qui devrait être transmis à nos descendants. Pour y répondre, nous faisons une nouvelle fois appel à une réflexion d'Axel Gosseries. Le suffisantisme du rapport Brundtland n'est en réalité que *modérément* non cléronomique (Gosseries, 2016, p. 5). En effet, dans une vision cléronomique typique, c'est bien ce qui est hérité des générations précédentes qui fixe la norme de ce qui devrait être dû aux générations qui nous succèdent. Comme le rapport Brundtland ne fixe pas la norme en ces termes – l'objectif de durabilité étant indépendant de cet héritage – la théorie du WCED est *a priori* non cléronomique. Toutefois, nous dit Gosseries, ce dont nous avons hérité est indirectement pris en compte par le biais de notre préoccupation à assurer la couverture de nos propres besoins fondamentaux associée à l'effort nécessaire pour assurer ceux de la génération suivante, ce qui signifie que ce si nous avons hérité de très peu, les efforts que nous devrions fournir pour assurer les besoins fondamentaux des générations futures hypothéqueraient notre capacité à subvenir à nos propres besoins (Gosseries, 2016). L'adoption d'une position comparable à celle du rapport Brundtland n'est donc pas incompatible avec la position de l'ONDRAF qui établit une norme à garantir pour l'avenir, partiellement et indirectement conditionnée par un héritage, celui de l'ère nucléaire et auquel notre société doit sa prospérité et dont l'ONDRAF tente aujourd'hui d'adoucir la facture pour les générations futures⁴⁴⁴.

Il nous reste à nous demander s'il serait possible pour l'ONDRAF de soutenir la durabilité de solutions de gestion tout en adhérant à un autre courant éthique que le suffisantisme ? Le choix de la durabilité dans le développement des solutions de gestion ne doit pas nécessairement lier l'ONDRAF au rapport Brundtland. Ce n'est pas parce que la notion de développement durable s'est fait connaître par le rapport *Our common*

⁴⁴⁴ Pour ce que serait un suffisantisme strictement non cléronomique, voir (Gosseries, 2016).

future que celle-ci doit rester intrinsèquement liée à l'éthique qui l'a vu naître. Le concept révèle en effet une « plasticité » étonnante (Laes, 2006, p. 23) parfois au sein même du rapport Brundtland (Laes, 2006, pp. 33-34). Remarquons d'ailleurs que le rapport Brundtland ne définit pas toujours le développement durable par la satisfaction des besoins de base minimaux mais aussi, par exemple, en ligne avec Barry, par les égales opportunités :

« Hence sustainable development requires that societies meet human needs both by increasing productive potential and by ensuring equitable opportunities for all. » (WCED 1987, p. 42).

Plus encore et comme le fait remarquer Erik Laes, d'autres formulations du développement durable du rapport Brundtland semblent davantage insister sur un processus de croissance respectueux des besoins présents et futurs, et plaident pour un non-déclin du niveau de bien-être au cours du temps. Au-delà de l'orientation « environnementaliste », le rapport Brundtland comporte une orientation « économiste », cette dernière s'affranchissant même de toute considération environnementale liée à la capacité des écosystèmes (Laes, 2006, p. 33). Cet appel à la croissance non stricte⁴⁴⁵ dépasse le suffisantisme et aurait plutôt même une tendance utilitariste. Examinons donc les deux autres principaux courants éthiques : l'utilitarisme et l'égalitarisme.

Pour ce qui est de l'utilitarisme, nous avons vu qu'à moins d'appliquer un *social discount*, celui-ci pourrait conduire *in fine* au sacrifice des générations actuelles au profit des générations futures (voir section 7.3.1). Cette position semble difficilement compatible avec la préoccupation de l'ONDRAF de ne pas négliger les communautés locales présentes et dans un proche avenir. La notion de durabilité défendue par l'ONDRAF s'accommoderait également difficilement de l'utilitarisme puisqu'il existerait, pour chaque génération, une génération vis-à-vis de laquelle on puisse se sacrifier.

Qu'en est-il de l'égalitarisme ? Un critère discriminant que propose Gosseries afin de départager l'égalitarisme du suffisantisme réside dans la question de l'épargne/désépargne. Rappelons que celle-ci est interdite, selon Gosseries,

⁴⁴⁵ Égal ou croissant.

dans l'égalitarisme par l'application du *leximin/maximin* des plus désavantagés et ce, à travers toutes les générations (voir section 7.3.2). Le suffisantisme est plus souple à cet égard pour peu que le seuil de suffisance soit garanti (Gosseries, 2016). Sur un plan éthique, il est ainsi défendable, pour la génération actuelle (et éventuellement pour toutes les générations futures proches), de devoir se serrer la ceinture au profit des générations futures ou, dans notre cas, de supporter la nuisance liée à la construction d'un stockage et à son exploitation afin de garantir aux générations futures de pouvoir couvrir au moins leurs besoins fondamentaux et donc, préserver leurs intérêts vitaux. L'examen de la métrique utilisée par le suffisantisme est également pertinente dans cette distinction. En adoptant une métrique fondée sur les besoins fondamentaux, le suffisantisme est moins sensible aux préférences. Ceci signifie que dans le cas où les devoirs de distribution sont plus limités, ce qui paraît être le cas dans une situation aussi contrainte que l'enfouissement géologique des déchets radioactifs, l'approche basée sur un standard plus objectif – les besoins fondamentaux – que sur les préférences est plus respectueuse de la vision libérale qui préserve la diversité de conceptions de la vie bonne.

De la même façon, le suffisantisme adopte une approche plus insensible à la responsabilité, ce qui permet une maximisation ou une égalisation des opportunités de bien-être indépendamment des choix préalablement effectués. Rappelons en effet que dans une perspective de « *luck egalitarianism* », par exemple, particulièrement sensible à la responsabilité, un sujet souffrant d'un handicap congénital sera traité différemment du sujet devenu handicapé à la suite de la pratique d'un sport à risque. Les choix de l'individu et donc sa responsabilité sont pris en compte (Gosseries, 2008c).

Cette insensibilité du suffisantisme aux préférences et à la responsabilité offre des avantages dans le domaine des questions intergénérationnelles dont l'enfouissement géologique des déchets radioactifs. Les préférences des générations futures étant influencées par les choix des générations actuelles, on pourrait imaginer une possible dérive dans l'instillation, au travers de l'éducation, d'attentes faciles à satisfaire dans le chef des plus jeunes. Pour ce qui est de la sensibilité à la responsabilité, celle-ci pose la question de savoir si celui qui hérite d'une situation défavorable en est responsable et de décider du traitement à réserver aux difficultés

rencontrées par la personne à l'origine de ce transfert social. Dans une perspective strictement non cléronomique, la part de malchance reçue de la part des prédécesseurs ou celle rencontrée au cours de la vie n'est pas prise en compte, l'objectif devant être atteint quel que soit l'héritage. A l'inverse, une théorie très sensible à la responsabilité devrait être *de facto* fortement cléronomique (Gosseries, 2016). Mais le suffisantisme sort de cette dichotomie et parvient à adopter une position médiane grâce à une vision modérément non cléronomique en tenant compte des efforts de la génération actuelle afin de couvrir ses besoins fondamentaux.

Enfin, le système de financement à long terme du stockage géologique destiné à disposer, en temps utile, des milliards d'euros nécessaires à la construction de l'installation sans grever le budget de l'Etat est une illustration difficilement contestable du système d'épargne que le suffisantisme autorise. Pourtant, les milliards du fonds à long terme pourraient servir à venir en aide aux plus démunis de la génération actuelle et ce serait précisément l'objection de Rawls. Il est permis de penser que tant que les personnes les plus démunies de notre société peuvent bénéficier d'allocations ou d'aides leur permettant de couvrir leurs besoins de base, une épargne, à des fins d'intérêt public, d'aussi grande envergure que le fonds à long terme en vue de préserver la sûreté des générations futures peut se justifier, du moins aux yeux du suffisantisme. Même si ce choix n'a pas été posé *ab initio* par l'ONDRAF mais bien par le législateur, l'ONDRAF entérine *de facto* par son rôle d'organisme public, la constitution d'un tel fonds et peut difficilement, à ce titre, se déclarer égalitarien.

10.6.2.4 Analyse de la déclaration de sûreté de l'AFCN : conséquences en termes de justice sociale d'une conception centrifuge de la sûreté

Nous avons précédemment établi la conception centrifuge de la sûreté au départ d'un noyau constitué par la protection radiologique, confirmant une interprétation évoquée antérieurement selon laquelle la protection radiologique serait incluse dans la sûreté plutôt que d'en être un élément résultant (voir section 8.3). Dans cette conception, les deux premiers axes qui sont présentés dans la Déclaration nationale sont issus de la protection radiologique à savoir le *principe d'amélioration continue* qui puise sa source

dans le *principe d'optimisation*, et le *principe de justification*. Le troisième axe englobe deux principes de sûreté : la *défense en profondeur* et l'*approche graduée*. Les autres axes ont trait à des valeurs plus procédurales (Dignum *et al.*, 2016) que nous laissons de côté ici.

La protection radiologique est elle-même soutenue par trois piliers que la publication 138 de la CIPR formule ainsi : la science, l'éthique et l'expérience (ICRP, 2018, §13). Cette perspective tridimensionnelle invite à une comparaison avec la structure quadridimensionnelle de l'ONDRAF puisqu'elle partage avec celle-ci deux domaines : la science (sciences et techniques pour l'ONDRAF) et l'éthique. L'expérience semble renvoyer naturellement au principe d'amélioration continue, à interpréter dans le champ strict de la protection radiologique en ce qui concerne la CIPR. Cette expérience a permis d'améliorer les jugements de valeurs sur l'importance relative des différents risques ainsi que la manière d'équilibrer ceux-ci avec les bénéfices des différentes pratiques (ICRP, 2018, §14 ; ICRP, 2007).

Comme nous l'avons déjà remarqué précédemment pour l'ONDRAF, la dimension « éthique » entendue au sens large n'est pas directement informative et renvoie à nos analyses consignées aux sections 7.4 et 7.4.6 sur l'éthique sous-jacente à chaque principe de protection radiologique.

L'articulation des principes de protection radiologique aux principes de sûreté invite à tenter une cartographie les reliant aux principes éthiques sous-jacents. Résumons-les afin de les représenter.

Le principe d'optimisation (auquel nous avons associé le principe d'amélioration continue) et son origine en tant que principe ALARA est d'inspiration utilitariste (voir première partie section 7.4.2). Nous avons établi son lien avec le principe BAT à la section 7.4.4 ainsi qu'avec le principe de précaution, le principe BAT puisant sa source dans le *Vorsorgeprinzip* (principe de prévoyance) des années 70 qui renvoie naturellement à la valeur de prudence (voir section 8.4). La CIPR établit également un lien entre le principe d'optimisation et le principe de robustesse (ICRP, 2013, §86) comme nous le montrions déjà à la section 7.4.5 et donc aussi avec la valeur de prudence. La robustesse est aussi, selon l'AFCN, un élément-clé de la défense en profondeur (Bernier *et al.*, 2017, p. 2) (voir section 10.4.2). La défense en profondeur est le troisième principe auquel se réfère la déclaration de sûreté

de l'AFCN. Nous avons donc une constellation de principes de sûreté construite autour du principe radiologique de l'optimisation, principe ALARA, qui ajoute une valeur de prudence (à moins qu'il ne s'agisse de précaution ?) à l'inspiration utilitariste, comme nous tentons de l'illustrer dans la figure 10-12 ci-dessous.

La prudence est reconnue par la CIPR comme une des valeurs éthiques fondatrices du système de protection radiologique en rapport avec les incertitudes liées aux effets stochastiques (ICRP, 2018, §45). C'est le recours à la prudence qui, selon la CIPR, légitime l'emploi du modèle LNT (ICRP, 2007, §36) même s'il reconnaît que c'est plutôt le principe de précaution qui s'y substitue aujourd'hui dans le discours du législateur et du politique (ICRP, 2018, §47). La CIPR ne s'attarde pas sur la distinction qu'il conviendrait sûrement d'opérer pourtant entre prévention, précaution et prudence⁴⁴⁶. Notons que, bien que la valeur de prudence soit omniprésente, elle ne l'est que de façon indirecte et l'AFCN ne la mentionne pas explicitement dans sa déclaration. Rappelons ici, si nécessaire, que la valeur de prudence est ce à quoi aspire le *catastrophisme éclairé* de Dupuy, dans le cadre duquel nous avons interprété le scénario pénalisant de l'AFCN comme l'illustration de la focalisation sur le scénario du pire, non pas en tant qu'appel à un immobilisme mortifère, mais bien comme un élément d'une métaphysique fondant la prudence « au temps des catastrophes », c'est-à-dire un moyen de dire ce qu'aurait été l'avenir si l'on n'y avait pas pris garde (Dupuy, 2005,

⁴⁴⁶ Nous en rappelons la distinction ici : la prévention se rapporte aux risques avérés (à l'existence certaine et la probabilité plus ou moins connue). La précaution se réfère aux risques potentiels (ou suspectés) et se relie à la prudence dont elle n'est qu'une occurrence particulière, en situation d'incertitude et de responsabilité collective (Larrère dans Canto-Sperber, [1996] 2017 ; Comte-Sponville, [2001] 2013 ; Godard *et al.*, 2002). Quant à la prudence, ses interprétations sont multiples, de la *phronêsis* grecque aristotélicienne (prudence, sagesse) à la *Klugheit* allemande de Kant (impératif hypothétique assertorique), en passant par la *prudentia* latine (prévoyance). Résumons. La prudence est « l'habileté dans le choix des moyens qui conduisent à notre bonheur » (Kant [1785] 1985, Fondements de la métaphysique des mœurs, trad. Fr. V. Delbos, Gallimard, 1985, section 2, p. 278 cité dans Cassin, 2019, p. 1049). Dans un deuxième sens, le domaine propre à la prudence se limite à l'intérêt personnel dont la limite est en soi un sujet de débat (Sidgwick). Dans un troisième sens, d'après Mill, la prudence est le contraire du raisonnement à court terme et irrationnel, il s'agit d'une capacité d'anticipation rationnelle à l'aide de modes de raisonnement complexes et qui se rapproche de l'idée de prévoyance (*prudentia*) (Cassin, 2019, p. 1049).

p. 18) (voir section 6.6). C'est donc bien la *prudence* qui guide la conception centrifuge de la sûreté à laquelle adhère l'AFCN.

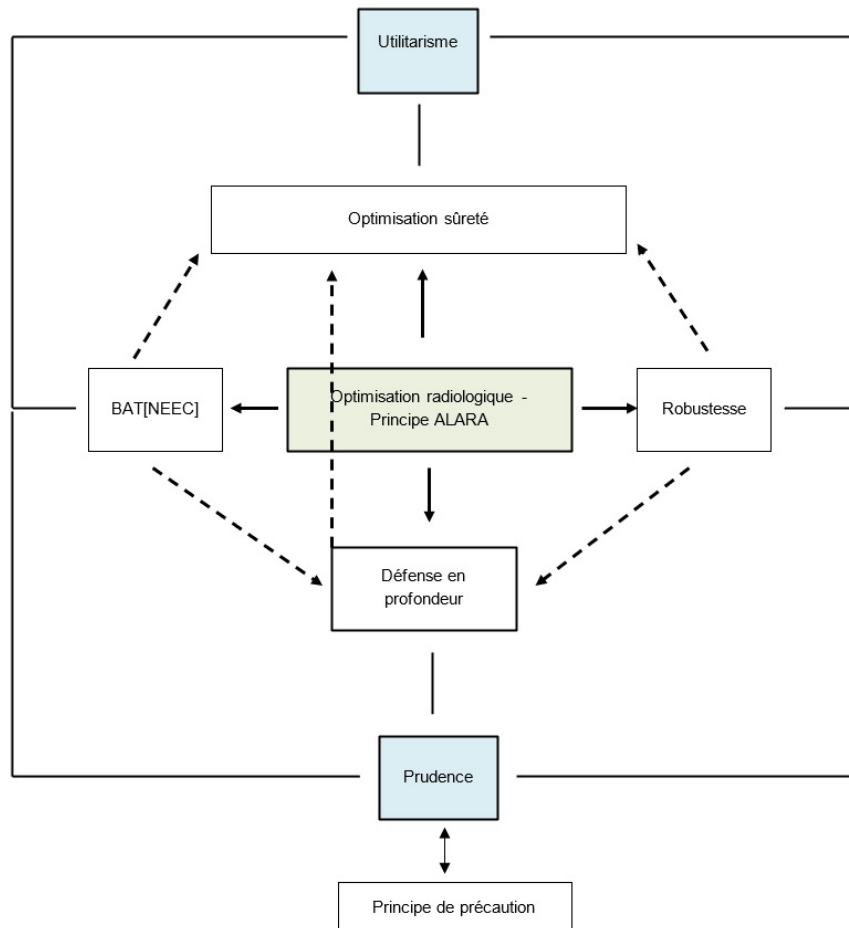


Figure 10-12 – Schéma représentant les filiations des principes de sûreté au principe général d'optimisation de la protection radiologique, en vert olive (la dépendance étant exprimée par les flèches pleines), ainsi que les liens entre les principes de sûreté (exprimés par les flèches en pointillés). En haut, le pilier éthique utilitariste, correspondant à un axe passant par le principe ALARA et le principe d'optimisation de la sûreté, et reposant sur la valeur de prudence, en bas, prodiguée par les principes BAT(NEEC), robustesse et défense en profondeur. Les traits non fléchés représentent une « charpente éthique » s'arc-boutant sur la théorie utilitariste et la valeur de prudence (en bleu).

A l'inverse, bien que la précaution soit explicitement mentionnée dans la déclaration de mission de l'ONDRAF « *L'ONDRAF conserve à l'esprit le principe de précaution dans l'exécution de ses missions (...)* » (ONDRAF, 2020c), celle-ci n'est absolument pas exploitée dans sa Déclaration stratégique.

Quant au principe de justification, deuxième principe énoncé dans la déclaration de 2018, il semble difficilement pouvoir être concilié avec l'utilitarisme (Gardiner, 2008 ; Ponthière, 2008) (voir sections 7.4.6.2 et 7.4.6) en dépit de propos tenus à une certaine époque par la CIPR elle-même (Clarke, 2003 cité dans Gardiner, 2008, p. 103). Le principe de justification semble en effet davantage répondre aux principes de bienveillance et non-malveillance (voir section 7.4.6.1) que la CIPR considère d'ailleurs comme relevant d'une valeur unique (ICRP, 2018, §38). On retrouve ces principes en tant que principes directeurs dans l'éthique biomédicale (Beauchamp et Childress, 2001) et leur origine est aussi ancienne – la bienveillance est traitée chez Aristote, Thomas d'Aquin, Leibniz, Kant ou Bentham (Canto-Sperber, [1996] 2017) – qu'elle est universelle (ICRP, 2018, C6, C20). Si la bienveillance et l'utilitarisme ne sont évidemment pas antinomiques puisque l'utilitarisme entend maximiser le bonheur du plus grand nombre, nous savons qu'il peut toutefois avoir quelques difficultés à appréhender des situations où, précisément, le malheur de quelques-uns pourrait faire la joie d'un plus grand nombre⁴⁴⁷. Notons toutefois que l'évitement de l'écueil sacrificiel de l'utilitarisme est possible, non pas par le recours au principe de justification mais bien grâce au troisième principe, celui des limites de doses qui introduit un élément de justice distributive (Cantone, 2008, p. 125). En effet, la CIPR reconnaît aujourd'hui⁴⁴⁸ avoir puisé les fondements de son système dans les sources multiples de l'éthique et ce, en se référant d'abord à l'éthique de la vertu dans ses premières publications (de 1928 aux années cinquante), ensuite à l'utilitarisme dans les années soixante et septante pour enfin se concentrer, depuis les années quatre-

⁴⁴⁷ Pour reprendre l'exemple que Michaël Sandel oppose à Peter Singer : comment l'utilitarisme traite-t-il la question des combats de gladiateurs ou de chiens ? (Sandel et Singer, 2021).

⁴⁴⁸ Cette précision nous semble utile. Si la publication 138 (ICRP, 2018) explicite l'origine éthique de ses principes, les propos tenus en 2003 par le président de la CIPR favorisaient une lecture exclusivement utilitariste.

vingt, sur l'éthique déontologique (ICRP, 2018, A7). Ainsi Hansson attribue le principe de justification à *l'éthique de la vertu* aristotélicienne⁴⁴⁹ (Hansson, 2007), le principe d'optimisation à l'utilitarisme et le principe de limites de dose à l'éthique déontologique. Dans la lignée de Kant et de David Ross, ce dernier principe tente, en effet, d'éviter une logique qui justifierait le sacrifice de quelques-uns pour le bien-être du plus grand nombre (ICRP, 2018, A11). En limitant les doses d'exposition pour tout un chacun, il rappelle, avec Kant, que chaque humain constitue une fin en soi et non seulement un moyen (Depré, 2000, p. 85).

Nous pensons cependant qu'au sein de la CIPR, ce n'est pas le seul principe des limites de doses qui tempère la visée utilitariste du principe d'optimisation mais bien, rejoignant en cela Grégory Ponthière, que c'est *l'ensemble* des trois principes qui font que la protection radiologique prend quelque distance avec l'utilitarisme. En effet, le choix de la meilleure solution, dans le respect de *tous* les principes de la CIPR combinés, conduit parfois au *second* meilleur choix du point de vue d'un calcul purement utilitariste (Ponthière, 2008, p. 119). En outre, nous critiquons la présentation linéaire de l'histoire telle que décrite dans la publication 138 de la CIPR (ICRP, 2018). Le principe des limites de doses ou principe de limitation (Godard, 2008, p. 141) puise son origine dans les années 1950, sous la forme d'un maintien des doses en dessous de seuils même s'il est vrai que l'intention de l'époque était d'éviter les effets déterministes, les seuils étant par conséquent élevés. Il ne s'agissait donc pas de limiter les effets stochastiques comme tente de le faire le principe actuel. Toutefois, même si l'esprit était différent, il est cependant difficile de ne pas y voir une descendance directe. Le problème d'exposition acceptable et, avec lui, le principe d'optimisation dans une forme encore archaïque est né au milieu des années cinquante (Gardiner, 2008). Le principe de justification n'est apparu, quant à lui, qu'en 1977 à la faveur de la publication 26 de la CIPR (IRPS, 2018c) après quoi les autres principes lui ont été subordonnés. L'histoire semble donc avoir été réécrite par la CIPR. L'ordre historique

⁴⁴⁹ Ethique qui se focalise sur le développement des traits de caractère nécessaires à l'adoption d'une bonne orientation morale. Le principe de justification peut en effet s'y relier puisqu'il repose sur l'idée de nature humaine qui tente d'éviter d'infliger le mal et de faire le bien. C'est la motivation juste de l'humain qui suit sa nature morale qui conduit à l'action juste (Hansson, 2007).

d'apparition des principes de radioprotection ne correspond pas à la description historique des influences éthiques que nous présente la CIPR dans sa publication 138 (ICRP, 2018), ce qui ne remet pas pour autant en question l'origine éthique desdits principes.

Enfin, avant de tenter d'esquisser un cadre de réflexion éthique pour l'AFCN, signalons encore que, selon nous, le principe des limites de doses appelle aujourd'hui généralement moins de commentaires, sauf éventuellement, dans le cas des applications médicales qui y dérogent systématiquement. Il ne constitue donc pas (ou plus ?) un principe stratégique qui appellerait une quelconque règle de gouvernance^{450, 451} et il n'est dès lors pas étonnant qu'il ne soit pas repris explicitement dans la déclaration de sûreté de 2018.

Si l'on considère les principes énoncés dans la déclaration de sûreté comme représentatifs de ce cadre, nous pouvons conclure à la coexistence d'une tendance utilitariste forte (représentée par le principe d'optimisation ou d'amélioration continue) augmentée d'une valeur de prudence ainsi que d'une tendance morale relevant de l'éthique de la vertu (représentée par le principe de justification).

La valeur plus procédurale de transparence que l'on retrouve dans la déclaration de sûreté de l'AFCN est la condition minimale d'implication du public (*stakeholder participation*) et se base sur la valeur de la dignité humaine, héritière de l'éthique déontologique (ICRP, 2018, A11).

Ayant acquis à présent une vision plus claire de la perspective axiologique de la sûreté pour l'ONDRAF et l'AFCN, il nous reste à traiter, de façon similaire, la question particulière de l'optimisation mais cette fois, sous l'angle de l'éthique qu'elle mobilise. C'est ce que nous entreprenons dans la section suivante.

⁴⁵⁰ Nous entendons par là une règle de gouvernance qui ne soit pas simplement technique, entendue dans le simple respect d'une norme arithmétique.

⁴⁵¹ Nous attirons l'attention du lecteur sur le fait qu'une discussion éventuelle sur le principe des limites de doses ne doit pas être confondue avec les débats actuels sur les effets radiologiques des (très) faibles doses. Le principe des limites de doses n'exclut pas l'optimisation pour réduire la dose autant qu'il est possible de le faire, précisément, en raison des possibles effets radiologiques génétiques (mais non délétères) sur l'organisme humain soumis à de très faibles doses d'exposition.

10.6.3 Positionnement de l'AFCN et l'ONDRAF par rapport à l'équité intergénérationnelle

Lors de précédents travaux, nous avons tenté de montrer quelles étaient les limites épistémologiques ainsi que les possibles implications éthiques de la requête de l'AFCN sur l'optimisation de la roche hôte (Kermisch et Depaus, 2020 ; ONDRAF, 2017b ; ONDRAF, 2018). Le résultat de ces études nous aide maintenant à compléter l'esquisse des positions éthiques actuelles de l'ONDRAF et de l'AFCN en analysant ce qui les a divisés sur la question précise de la roche hôte. Nous nous intéressons ici non plus à l'aspect épistémologique de cette question mais bien à ses implications éthiques.

Toutefois, l'un ne va pas sans l'autre. Si l'investigation épistémologique pouvait se décliner en ces termes : « *est-il seulement possible de trouver une roche hôte qui soit fondamentalement meilleure qu'une autre ?* », notre analyse éthique a pris comme hypothèse une réponse affirmative à cette question. Ceci nous a permis d'imaginer deux scénarios. Le premier correspond à la proposition faite par l'ONDRAF dans son Plan Déchets en 2010 à savoir l'enfouissement géologique dans une argile peu indurée en Campine. Cette proposition visait à valoriser plus de trente ans de recherche sur l'argile de Boom ainsi que la transférabilité de bon nombre de résultats sur une argile similaire, l'argile yprésienne. Le deuxième scénario est celui d'un enfouissement géologique dans une roche hôte réputée intrinsèquement plus sûre et inconnue à ce jour. Cette stylisation en deux scénarios n'est permise que sous la condition qu'il soit possible de trouver une telle roche et, pour éviter toute ambiguïté, également *sous réserve que le gain au point de vue de la sûreté soit significatif*. Il s'agit donc de deux conditions qui nous viennent de l'épistémologie et qui permettent de ne pas systématiquement remettre en question la pertinence de l'analyse éthique faute de pouvoir disposer d'une quantification de la sûreté qui permette une classification *a priori* des roches hôtes.

Ces travaux visaient également à donner toute la dignité possible à la question de l'AFCN. En effet, ne pas supposer un gain de sûreté significatif aurait tourné la requête du régulateur en dérision. Il faut cependant garder à l'esprit qu'il se pourrait que la réalité du terrain ne soit pas aussi clémente que la stylisation et que le gradient de sûreté entre ces deux scénarios soit

dérisoire. Enfin, il y a des conditions implicites qui n'ont pas été évoquées dans nos précédents travaux et qui ne sont pas davantage reprises dans l'analyse multicritère construite sur les attributs de sûreté. Ces conditions portent sur les contraintes de construction et d'exploitation du stockage que l'on suppose équivalentes quelle que soit la roche choisie. Autrement dit, les contraintes minières sont neutralisées dans le processus d'évaluation et n'ont aucun impact sur l'état du système au moment de son entrée en phase passive c'est-à-dire au moment où la sûreté à long terme commence. L'analyse de cette hypothèse pendant plus d'une décennie par le projet international de l'AIEA, GEOSAF⁴⁵², ainsi que par le projet européen dédié au traitement des incertitudes, UMAN, démontre l'irréalité de celle-ci lorsque l'on tient compte notamment du retour d'expérience des pays les plus avancés en matière de stockages (IAEA, 2011d ; IAEA, 2015 ; IAEA, 2021 ; Depaus *et al.*, 2018 ; Depaus C., 2021, pp. 21-23). Il faut donc s'attendre à ce que le système de stockage à la fin de la période d'exploitation soit dans un état « *as-built* » qui ne corresponde pas tout à fait à l'état initial escompté par les évaluateurs de sûreté à long terme. Une déviation par rapport à ce que les ingénieurs appellent la « *design target* » est plus que probable et il conviendra de s'assurer qu'en aucun cas l'état effectif du système ne sorte de l'enveloppe de sûreté (IAEA, 2021). Le fait que certaines roches puissent, plus que d'autres, rendre cet équilibre plus ou moins délicat à atteindre nous sera donné par le retour d'expérience⁴⁵³.

⁴⁵² L'acronyme désigne la sûreté (*safety*) pour les stockages géologiques (GEO). Le projet a plus d'une décennie d'existence et a connu, jusqu'à ce jour, trois éditions. Pour plus d'informations, consulter : <https://www.iaea.org/topics/disposal/international-project-on-demonstrating-the-safety-of-geological-disposal> [Dernière consultation le 22 août 2022].

⁴⁵³ Il s'agira donc de s'assurer que les propriétés favorables données *a priori* pour une roche puissent être maintenues à la fin de la période de construction et d'exploitation de manière à garantir un état initial du système de stockage pour la période de long terme, conforme aux conditions de départ imaginées par les évaluateurs. Les retours d'expérience finlandais et allemand semblent montrer que ce n'est jamais le cas et les évaluateurs doivent constamment revoir leurs hypothèses et ajuster les calculs de sûreté. Si certaines roches prometteuses sur papier se révélaient calamiteuses à exploiter, elles devraient être exclues. Jusqu'ici, les calculs de sûreté n'ont pas intégré les contraintes d'ingénierie minière et l'aléa du terrain. Ce fait n'a rien d'étonnant pour les spécialistes dès lors qu'un stockage géologique réunit deux mondes d'ingénieurs que tout oppose à première vue : le génie minier et le génie nucléaire. A commencer par exemple, par le fait que dans le cas d'un stockage, la roche est une barrière à préserver et non une matière première à exploiter.

L'exercice d'évaluation de deux scénarios auquel nous nous sommes adonnés est donc une idéalisation. Il a cependant le mérite de révéler les limitations sur le plan éthique, limitations qui seraient peut-être à jamais restées cachées si on n'avait pu les débarrasser, le temps de la réflexion, des multiples contraintes du terrain et des inconnues de la science.

10.6.3.1 Enjeux éthiques associés à l'application du principe d'optimisation au choix de la roche hôte

Dans cette section, nous reprendrons les points saillants de nos précédents travaux (Kermisch et Depaus, 2018a ; ONDRAF, 2018) sans les détailler exhaustivement et tout en conservant une distance critique afin d'en nuancer les conclusions et utiliser celles-ci aux fins de la présente question de recherche.

Le scénario 1 postule un enfouissement géologique dans une argile peu indurée et correspond à la proposition faite par l'ONDRAF à l'occasion de la remise de son Plan Déchets en 2010. Ce scénario qui s'appuie sur une longue recherche implique un déploiement relativement rapide des phases de choix de site et de construction du stockage. Le deuxième scénario résulte d'une application préalable du principe d'optimisation au choix de la roche hôte et sous-entend *de facto*, la prolongation de la phase de recherche exploratoire et ce, de manière à obtenir un niveau de connaissances équivalent pour toutes les roches à l'étude. Il en résulte que dans le séquençage des différentes étapes du processus d'enfouissement des déchets, démarrant avec l'obtention d'une politique nationale relative au stockage géologique et se terminant avec la fin de la période de contrôle institutionnel après fermeture du stockage, un décalage de quelques décennies peut s'observer. Nous avons représenté la temporalité spécifique de ce processus de la façon suivante (Kermisch et Depaus, 2020) :

- t_0 : aujourd'hui,
- t_1 : obtention d'une politique nationale établissant le stockage géologique comme solution de gestion à long terme des déchets hautement radioactifs et moyennement radioactifs à vie longue,
- t_2 : choix d'un site d'enfouissement. Le site est supposé unique,
- t_3 : obtention du permis de construction de l'installation,

- t_4 : clôture de l'installation de stockage et début de la phase de contrôle institutionnel incluant une surveillance et un monitoring dit d'après fermeture,
- t_5 : fin de la période de contrôle institutionnel et entrée dans la phase de sûreté passive.

Afin de révéler les enjeux éthiques sous-jacents et les conflits potentiels, nous avons eu recours à l'outil des matrices éthiques, particulièrement pertinent dans l'évaluation de nouvelles technologies (Mephram, 2000 ; Kermisch et Depaus, 2018a). Les matrices sont construites avec d'une part, les parties prenantes au processus ou à la technologie à l'étude et d'autre part, les principes éthiques retenus. Les cellules de la matrice correspondent aux enjeux ou difficultés rencontrés par chaque partie prenante en regard du principe éthique considéré (ONDRAF, 2018). Dans nos travaux de 2018, nous avons considéré les communautés locales, la société en général, l'environnement, les travailleurs sur le site de l'installation de stockage ainsi que les producteurs de déchets comme étant les preneurs d'enjeu les plus pertinents. Nous n'avons pas représenté les générations futures comme un preneur d'enjeu distinct mais avons plutôt opté pour une évolution de la matrice au cours du temps pour l'ensemble des acteurs, levant ainsi la difficulté du manque de spécificité de cette partie prenante⁴⁵⁴ (Cotton, 2009) et créant ainsi le principe des matrices éthiques temporalisées (Kermisch et Depaus, *submitted*). Quant aux principes éthiques, nous avons adopté une approche pluraliste en retenant les principes les plus souvent mobilisés dans la littérature lorsqu'il est question d'éthique des technologies ou d'éthique du risque, à savoir le consentement informé face au risque, le rapport coût-bénéfice de l'activité à risques à l'étude et la répartition des risques et avantages de cette activité (Asveld et Roeser, 2009 ; van de Poel et Royakkers, 2011).

Le consentement éclairé est lié au principe d'autonomie, le ratio coût/bénéfice au principe de bien-être, et la distribution des risques au

⁴⁵⁴ Les générations futures constituent, par essence même, un groupe disparate reprenant toutes les strates de la société. En outre, les générations futures peuvent désigner des collectivités séparées de plusieurs décennies ou siècles. Il s'agit donc d'une partie prenante artificiellement construite qui subsume d'autres catégories d'acteurs.

respect d'un principe de justice⁴⁵⁵ (Kermisch et Depaus, 2018a). Cette correspondance est suggérée par Beauchamp et Childress en éthique biomédicale dont l'intention était de capturer, dans ces principes, l'essence des grandes traditions éthiques, à savoir : l'éthique déontologique d'inspiration kantienne pour le principe d'autonomie, l'utilitarisme (Bentham) pour le principe de bien-être résultant du ratio coût/bénéfices et enfin, la théorie libérale-égalitaire pour le principe de justice distributive de Rawls (Cotton, 2009). Précisons que pour le principe de bien-être, nous avons adopté l'acception la plus large possible, de manière à non seulement englober la sûreté et la sécurité, conditions nécessaires, mais également le bien-être psychologique, économique et social. Nous obtenions une matrice dont les principes éthiques étaient semblables à ceux de la matrice éthique de Cotton pour une thématique similaire (Cotton, 2009, p. 159) et que nous reproduisons dans le tableau 10-9 ci-dessous.

⁴⁵⁵ Dans notre communication de 2020 au *workshop* de l'AEN, nous (Kermisch et Depaus) parlions du principe de respect de l'équité et non du principe de justice (Kermisch et Depaus, 2020). Nous (je) tenons ici à corriger une assimilation quelque peu abusive : l'équité implique la reconnaissance de la dignité du sujet et ne souffre dès lors pas de compromis. Le principe de justice entraîne la réalisation d'efforts afin d'obtenir les arrangements nécessaires qui satisfassent des conditions équitables de répartition des biens. Dans l'équité, il y a donc une dimension distributive et une dimension inaliénable de droits humains. Nous devons cette réflexion à un relecteur (anonyme) que nous remercions.

Tableau 10-9 – Enjeux éthiques liés à l’application du principe d’optimisation au choix de la roche hôte pour le stockage géologique (adaptation d’après Kermisch et Depaus, 2018b).

Principes éthiques / Preneurs d’enjeu	Principe de bien-être	Principe d’autonomie	Principe de justice
Communautés locales	- Bien-être physique - Bien-être psychologique - Bien-être socio-économique	Consentement libre et informé vis-à-vis de l’accueil des déchets	Équité intragénérationnelle
Société (appréhendée dans son ensemble)	- Bien-être physique - Impact économique - Durabilité des ressources	Respect des procédures démocratiques et transparence du processus de décision	- Respect du principe pollueur-payeur - Équité intergénérationnelle
Environnement	Protection des écosystèmes	Dignité et respect de l’intégrité des espèces	Distribution du risque
Travailleurs sur site	Sûreté (nucléaire et conventionnelle)		Équité intragénérationnelle
Producteurs de déchets	Bien-être économique		Respect du principe pollueur-payeur

Cette matrice appelle encore quelques commentaires avant de poursuivre. Certains enjeux identifiés lors de nos études préalables se sont révélés non discriminants dans le choix entre les deux scénarios. Certains acteurs identifiés *ab initio* se sont aussi révélés, après analyse, peu pertinents vis-à-vis du choix entre les deux scénarios. Parmi eux, citons notamment les décideurs politiques et les experts. Ils ont été retirés de la matrice car les enjeux éthiques les concernant telles que l’indépendance, l’impartialité ou l’objectivité relevaient de valeurs procédurales liées à l’implémentation du processus décisionnel et ce, indépendamment des scénarios. Les acteurs

étrangers ont été également retirés de la matrice car seuls les acteurs de proximité constituaient des preneurs d'enjeux réellement pertinents. En suivant ce raisonnement, ils pouvaient être assimilés aux communautés locales. Un raisonnement similaire a été conduit vis-à-vis des enjeux tels que la transparence et le caractère démocratique du processus décisionnel ou encore, le système de compensation salariale des travailleurs dont la matrice a pu également être délestée.

D'autres enjeux éthiques non nécessairement liés à des valeurs procédurales sont également non discriminants.

La « sécurité » par exemple, identifiée comme pertinente pour les communautés locales, la société en général ainsi que les travailleurs sur site a ainsi été retirée de l'analyse. Une objection vis-à-vis de son retrait de la matrice serait également recevable. Si la nature de la roche hôte est sans conséquence directe sur les actes de sabotage ou de terrorisme, le choix de la roche hôte a bien une incidence indirecte dès lors qu'une des deux options implique la prolongation de l'entreposage de surface, plus vulnérable aux actes malveillants. Nous pensons cependant que la prise en compte de cet enjeu n'aurait pas conduit à des conclusions fondamentalement différentes de celles que nous avons obtenues pour l'évaluation de la temporalité t_1 - t_4 , seule pertinente à cet égard. En effet, comme nous le détaillons ci-après, l'impact d'une prolongation de l'entreposage est déjà suffisamment repris dans une perspective de sûreté, avec une incidence immédiate sur le bien-être des différents acteurs. Notons également après coup que cette omission, sans doute trop peu argumentée dans de précédents travaux (Kermisch et Depaus, *submitted* ; ONDRAF, 2018), a malgré tout permis d'éviter une polarisation vers la dimension de la sécurité, dimension qui est difficilement opposable à celle de la sûreté⁴⁵⁶.

Il en va de même de la liberté des producteurs de déchets de générer ceux-ci dans le respect de certaines limites. Le choix de la roche hôte n'a aucune

⁴⁵⁶ Il est pour ainsi dire impossible de pondérer l'importance de l'une par rapport à l'autre, un défaut de sécurité entraînant in fine des conséquences sur la sûreté. Remarquons à toutes fins utiles que si la sûreté est laissée à la discrétion des états dans le respect de standards internationaux, la sécurité est en partie directement auditée par des instances internationales (cf. Euratom et AIEA pour les *safeguards* du combustible de réacteur).

influence sur cette production. Nous devons cependant reconnaître que certaines critiques peuvent être émises à l'égard de ce type de simplification, ne serait-ce que vis-à-vis de l'interdépendance des différentes étapes de gestion des déchets radioactifs, principe sur lequel devraient normalement reposer les politiques nationales, selon la directive 2011/70/Euratom (EC, 2011, art. 4, §3, al. b). En effet, si le choix de la roche hôte ne devrait avoir aucune incidence sur la production des déchets, la temporalité associée à ce choix pourrait en avoir. Opter pour le scénario 2 entraîne *de facto* un retard dans la mise en œuvre du stockage (par rapport à l'adoption du scénario 1) et c'est ce retard qui pourrait influencer la politique énergétique en amont de la production des déchets soit parce que l'absence apparente de solution pour les déchets entraîne un arrêt anticipé de la production nucléaire soit, à l'inverse, parce que ce choix de la roche hôte étant ainsi repoussé de quelques décennies, il laisse entrevoir encore un bel avenir à cette technologie avant qu'il ne soit nécessaire de s'intéresser à sa fin de cycle. Cette réflexion, bien que plus récente, ne fait cependant que confirmer l'analyse des précédents travaux. En effet, il est impossible de prédire l'influence qu'aurait le scénario 2 sur la production des déchets. Ajoutons que l'observation de la politique énergétique belge, à l'heure d'écrire ces lignes, semble montrer une indifférence du processus décisionnel vis-à-vis du choix de la roche hôte.

En étudiant chaque principe éthique pour chaque partie prenante, les deux scénarios peuvent être comparés. Ainsi, en termes de bien-être, le premier scénario, préconisant l'enfouissement dans les argiles peu indurées bien connues, prend l'avantage jusqu'à la clôture de l'installation de stockage (t_4). En effet, le retard de prise en charge des déchets vers une solution définitive, de l'ordre du demi-siècle dans le cas du deuxième scénario, est défavorable tant aux communautés locales qu'à la société dans son ensemble et à l'environnement. La plupart des experts s'accordent en effet à dire que tout entreposage de surface est nécessairement moins sûr qu'une installation souterraine et ce constat est d'ailleurs relayé explicitement par la directive 2011/70/Euratom dans son préambule :

« L'entreposage des déchets radioactifs, y compris à long terme, n'est qu'une solution provisoire qui ne saurait constituer une alternative au stockage. » (EC, 2011, considérant 21)

« Il est communément admis que sur le plan technique, le stockage en couche géologique profonde constitue, actuellement, la solution la plus sûre et la plus durable en tant qu'étape finale de la gestion des déchets de haute activité (...) » (EC, 2011, considérant 23).

L'incertitude quant à la décision finale dans le scénario 2 nuit également au bien-être psychologique des communautés vivant déjà au voisinage des installations d'entreposage ; la construction de nouvelles installations de surface – pour faire face à la prolongation du processus décisionnel – engendre en effet une série de nuisances pour ces mêmes communautés (Kermisch et Depaus, *submitted* ; ONDRAF, 2018).

A partir de t_4 , le scénario 2 prend l'avantage au niveau de la sûreté, par hypothèse. Remarquons que ce gain pourrait se payer cher. Non seulement le *statu quo* engendre un surcoût mais celui-ci pourrait ne pas être adéquatement provisionné selon le principe du pollueur-payeur. Dans le contexte belge de la sortie du nucléaire, plus l'échéance du stockage est repoussée, plus le provisionnement financier repose sur des hypothèses qui pourraient se voir dépassées ou erronées au moment de la mise en œuvre du stockage. Le surcoût endossé *a priori* par les producteurs de déchets pourrait être déchargé partiellement sur les épaules de l'Etat et donc *in fine* sur celles du citoyen.

En outre, par hypothèse encore, la durabilité des ressources (e.g. protection des aquifères) pourrait être plus grande dans le cas du deuxième scénario. Cet avantage devrait cependant être tempéré par le fait que l'entretien et la maintenance de l'entreposage prolongé pourrait être préjudiciable aux travailleurs sur site⁴⁵⁷.

En ce qui concerne le principe d'autonomie qui implique le consentement informé des parties, le scénario 2 devrait logiquement prendre l'avantage s'il s'accompagne d'une communication transparente des nouvelles connaissances à tous les acteurs de la société. En ce qui concerne l'environnement, l'autonomie des espèces s'interprète comme le « *droit à la vie en accord avec leur nature* » (Oughton *et al.*, 2004) et rejoint donc les

⁴⁵⁷ Pour plus d'informations sur les résultats de cette étude voir (Kermisch et Depaus, 2018b) et (ONDRAF, 2018).

principes de dignité et d'intégrité pour lesquels les scénarios sont équivalents (ONDRAF, 2018). Les enjeux en termes de justice sont à nuancer sur le plan de l'équité intra- et intergénérationnelle. Dans le premier cas, il nous a semblé pertinent de suivre une conception d'inspiration rawlsienne en appliquant le principe du *maximin* (Kermisch *et al.*, 2016). La sûreté dominant le débat sur l'équité dans ce contexte, c'est le scénario qui offre les meilleures conditions sanitaires aux parties prenantes jugées les plus vulnérables – les communautés locales et les travailleurs – qui est favorisé. Jusqu'à t_4 , le scénario 1 prend l'avantage sur le scénario 2 mais ce dernier reprend la main pour les temporalités plus lointaines puisqu'il offre, par hypothèse, une plus grande sûreté à long terme. Dans le deuxième cas, le retard engendré par le choix du deuxième scénario viole le principe de protection des générations futures puisque ce retard est estimé à un demi-siècle soit l'équivalent de près de deux générations.

Il ressort de l'analyse qu'aucun des deux scénarios ne peut satisfaire simultanément toutes les exigences associées aux principes éthiques, ce que nous nommons, en suivant Taebi, des *conflits internes* (Taebi, 2011). En outre, aucune option n'est satisfaisante sur toute la durée du processus, depuis l'adoption de la politique nationale jusqu'à la fin de la période de contrôle institutionnel, ce que nous nommons, avec Taebi, un *conflit temporel* (Taebi, 2011). L'outil des matrices éthiques ne permet donc pas de choisir l'un ou l'autre scénario car il est analytique et ne contient aucun principe normatif⁴⁵⁸.

Une règle de priorité entre les valeurs peut être introduite, selon laquelle un devoir négatif est plus impérieux qu'un devoir positif, c'est-à-dire qu'il est plus impérieux de ne pas causer de préjudice (principe de non-malveillance) que de maintenir le bien-être (principe de bienveillance) (Ross, [1930] 2002 dans Taebi, 2011). Nous devons immédiatement préciser que cette règle de priorisation opérée par David Ross (1930) dans la définition d'obligations « *prima facie* » a été également discutée par Rawls qui distingue, dans les devoirs naturels, les devoirs positifs (l'aide mutuelle) et les devoirs négatifs

⁴⁵⁸ Nous devons nuancer ce propos et peut-être reconnaître que l'outil des matrices éthiques est *davantage* analytique que normatif. Dans la mesure où il implique de comparer certaines options entre elles mais uniquement enjeu par enjeu, il est partiellement normatif. Toutefois, il ne possède aucun mécanisme de pondération.

(ne pas faire de mal) et conclut que : « *il semble plausible de dire que, quand la distinction est claire, les devoirs négatifs ont plus de poids que les devoirs positifs* » (Rawls, [1971] 2009, p. 144). Précisons que, dans la perspective intergénérationnelle, ne pas causer de tort est un prérequis fondamental au fait d'assurer la pérennité du bien-être mais a une portée plus large⁴⁵⁹ (Taebi, 2011). La façon la plus évidente de s'en rendre compte est de considérer la temporalité. Il est évident qu'assurer le bien-être des générations futures implique de ne pas les faire souffrir mais ce devoir positif ne s'extrapole que de façon limitée dans le temps. Qui peut préjuger de ce qui constituera une vie bonne pour les générations futures au-delà du prochain siècle, par exemple ? En revanche, le devoir négatif de ne pas causer de préjudice et donc d'assurer la sûreté des générations futures à l'égard du danger potentiel des déchets peut s'envisager sur plusieurs milliers d'années. De cette façon, quand il est impossible de satisfaire à ces deux devoirs simultanément, c'est-à-dire si nous sommes aux prises avec des conflits internes, le devoir négatif est plus contraignant que le devoir positif.

En suivant cette règle, la préservation de ce que Barry appelle « intérêts vitaux » dans le cadre de la durabilité prend le pas sur la préservation des opportunités de bien-être⁴⁶⁰, lesquelles ne sont éventuellement garanties que jusque dans un futur proche. Entre t_1 - t_2 , le scénario 1 prenait l'avantage sauf à l'égard du consentement libre et informé. Comme ce consentement n'est pas associé au devoir de préserver les intérêts vitaux, qui prévaut, on peut conclure à la supériorité du scénario 1 sur le scénario 2 pendant cet intervalle de temps. Entre t_2 - t_3 et t_3 - t_4 , le scénario 1 est plus avantageux mais la situation bascule après t_4 . Après t_4 , la sûreté offerte par le scénario 2 prend le pas sur les enjeux favorisés par le scénario 1 tels le respect du principe du

⁴⁵⁹ Et inversement. Il est aussi vrai que ne pas garantir de bien-être durable aux générations futures en les privant par exemple, de ressources énergétiques abondantes et abordables peut également nuire à leurs besoins fondamentaux comme les soins médicaux, par exemple (Taebi, 2011, pp. 178-179).

⁴⁶⁰ Notons que le principe de bien-être doit être nuancé par rapport à l'acception inclusive qui avait été utilisée pour la matrice éthique. En effet, s'il était licite de regrouper les principes de bienveillance et de non-malveillance de l'éthique biomédicale de Beauchamp et Childress sous le principe de bien-être (Gamborg, 2002 ; Jensen *et al.*, 2011, Kaiser et Forsberg, 2001 ; Kaiser *et al.*, 2007 ; Kermisch et Depaus, 2018a, Mepham, 2000 ; Mepham *et al.*, 2006 ; Oughton *et al.*, 2004 ; Cotton, 2009), il convient à présent d'opérer à nouveau la distinction entre la non-malveillance qui touche à la préservation de la vie et la bienveillance, qui touche à la qualité de la vie.

pollueur-payeur, l'équité intergénérationnelle, etc. Comme la sûreté sert un intérêt vital, le scénario 2 devient plus favorable entre t_4 - t_5 de même qu'après t_5 . Il en résulte que le scénario 1 est à privilégier jusqu'à t_4 et que le scénario 2 prend ensuite l'avantage à partir de ce moment, en préservant les intérêts vitaux de façon plus satisfaisante.

En appliquant cette « règle de priorité », ces conflits éthiques internes ont disparu. Toutefois, l'analyse laisse le conflit temporel non résolu puisque le décideur (politique) aura à choisir entre privilégier les générations jusqu'à t_4 , auquel cas il optera pour le premier scénario, ou privilégier les générations au-delà de t_4 , en favorisant le deuxième scénario.

La première attitude peut être attribuée à la position de l'ONDRAF alors que la seconde peut être associée à celle de l'AFCN. Toutefois, il serait abusif de conclure que le motif est exclusivement d'ordre éthique. La position de l'ONDRAF peut se justifier à l'aune de la seule incertitude épistémologique entourant la possibilité de trouver une roche hôte intrinsèquement plus sûre. Remarquons également que l'orientation de l'ONDRAF vers la durabilité des solutions ne joue aucun rôle direct sur le conflit temporel puisque que la règle de priorisation utilisée dans le cadre normatif de la durabilité n'opère que sur les conflits internes.

En revanche, la sûreté, vue dans une perspective agrégée ou cumulative, justifie l'adoption du deuxième scénario et ce, au mépris éventuel des incertitudes entourant l'existence d'une roche hôte intrinsèquement plus sûre ou le respect du principe pollueur-payeur ou encore de l'équité intergénérationnelle. Cette polarisation autour de la sûreté est bien compatible avec les valeurs éthiques de l'AFCN identifiées dans la section précédente. Maximiser la sûreté sur le très long terme se justifie dans une perspective utilitariste jusqu'à éventuellement porter préjudice aux intérêts des générations proches. Pour que l'approche tienne, encore faut-il que ce ne soit pas directement les intérêts vitaux des générations futures proches que l'on oppose aux intérêts vitaux des générations futures plus lointaines sous peine de contradiction logique et directe. En effet, l'AFCN ne pourrait pas justifier de préserver les intérêts vitaux d'une génération sur ceux d'une autre et certainement pas de la génération la plus éloignée sur la génération la plus proche. Il n'est possible de justifier la maximisation de la sûreté pour les générations les plus éloignées qu'à la condition que celle-ci ne réduise

éventuellement que des opportunités de bien-être des générations les plus immédiates, pas leurs intérêts vitaux.

10.6.3.2 Un point commun qui sépare : la préservation des intérêts vitaux

Malgré la différence d'approches, l'ONDRAF et l'AFCN semblent pourtant s'entendre sur l'importance de la préservation des intérêts vitaux sans pour autant se rejoindre sur ce point. Dans la question de la récupérabilité par exemple, nous avons vu que, pour l'ONDRAF, la préservation des intérêts vitaux des générations proches l'emportait sur leur liberté de choix en introduisant un caractère spatial fort associé à l'intérêt des communautés locales. Les intérêts vitaux ou les besoins fondamentaux du suffisantisme peuvent être invoqués pour restreindre, au besoin, l'expression des libertés des générations futures.

En optant pour une maximisation de la sûreté, quitte à ce que celle-ci ne profite qu'aux générations lointaines, l'AFCN entend également favoriser la préservation des intérêts vitaux par rapport à d'autres enjeux que le scénario 1, préféré par l'ONDRAF, permettait d'envisager.

Si l'ONDRAF entend privilégier les intérêts vitaux au respect des libertés, elle le fait dans une perspective intragénérationnelle, en comparant les différentes strates de la société. En privilégiant l'adoption du scénario 2, l'AFCN semble ne pas reculer devant le fait de réduire les opportunités de bien-être des générations présentes au nom de la protection des générations futures, tout en axant sa politique, elle aussi, sur la préservation des intérêts vitaux.

Tout se passe donc comme si l'ONDRAF et l'AFCN entretenaient un rapport différent à la temporalité, non pas celle du projet de stockage mais celle du processus de décision. La question de la justice intergénérationnelle induit habituellement deux positions : soit celle de ne pas mettre en danger les générations présentes au nom d'hypothétiques générations futures dont on ignore le mode de vie et les valeurs (Cotton, 2005) et dont la venue au monde résultera de toute façon des choix opérés par les générations actuelles (Parfit, 1984), soit, à l'inverse, celle de faire supporter tous les risques aux générations ayant bénéficié de l'énergie nucléaire afin de protéger les

générations futures (NEA, 1995). On serait tenté de penser que l'AFCN adopte résolument cette deuxième position, en cherchant à exempter les générations futures, qui seront libérées de l'énergie nucléaire, de toute responsabilité et de toute préoccupation relative à celle-ci. La perspective intragénérationnelle, fondamentalement liée au problème du *siting*, relèverait, dans cette perspective, davantage des prérogatives de l'ONDRAF que de l'AFCN, cette dernière ne veillant au choix du site que du strict point de vue de la sûreté. Dans cette hypothèse, il est également possible pour l'AFCN d'avoir une conception plus monolithique de la société, en distinguant les experts de la société civile mais sans chercher à pousser plus loin la différenciation de celle-ci en distinguant différents acteurs.

Une possible explication de la position de l'AFCN, en relation avec son éthique, serait l'exacerbation de la valeur de prudence. Nous avons vu à la section précédente que l'utilitarisme dominant dans les principes directeurs de l'AFCN pouvait éventuellement expliquer l'importance de la sûreté calculée comme une intégrale, au sens mathématique, sur un futur lointain. Toutefois, se restreindre à cette seule explication nous paraît quelque peu grossier car la relative moins-value des générations présentes par rapport aux générations futures ne serait pas expliquée. Le devoir négatif de ne pas nuire est le crédo de l'éthique biomédicale (Beauchamp et Childress, 2009) ainsi que du principe de précaution, dérivé de la valeur de prudence, dans le domaine des politiques énergétiques et environnementales ou le développement de nouvelles technologies. Ce principe invite à l'adoption de mesures permettant de se prémunir contre de possibles effets délétères d'une nouvelle technologie même si ceux-ci ne sont pas (encore) démontrés. A l'instar du devoir de ne pas nuire, il cherche à ne pas porter préjudice aux générations futures. Selon cette idée, plus encore que de vouloir garantir l'égalité des chances pour les générations futures, ce qui constituerait un devoir positif, il est plus important de tout mettre en œuvre pour ne pas mettre en danger ce principe même d'égalité des chances pour la postérité (Taebi, 2011, p. 175). Il s'agirait donc ici de répondre à un devoir négatif encore plus impérieux.

10.6.3.3 Équité et incertitude : le tribut justifié des générations présentes

Des sections précédentes, il semble se dégager une tension entre l'équité *intragénérationnelle* dont l'ONDRAF se ferait davantage l'ambassadeur et l'équité *intergénérationnelle* à laquelle l'AFCN donnerait la priorité. Nous savons que le débat ne peut pas se résumer à cette opposition même si certains la reconnaissent sans détour dans le contexte des stockages de déchets (Okrent, 1999), car nous savons que ces deux dimensions de l'équité coexistent dans le chef des deux institutions et que toute stigmatisation en ce sens procéderait donc d'une grossière simplification.

Toutefois, la question de savoir si l'on peut augmenter l'injustice parmi nos contemporains et désavantager les plus vulnérables de notre société actuelle afin de réduire la possibilité de porter préjudice aux générations futures (Taebi, 2011, p. 188) se pose bel et bien. Dans quelle mesure peut-on justifier d'adopter le scénario 2 alors que le scénario 1 est déjà sûr et permet une mise en œuvre plus rapide de la solution ? Dans quelle mesure pouvons-nous donc défendre la position de l'AFCN ?

Benham Taebi a discuté une problématique similaire en confrontant les technologies nucléaires avancées, à savoir le *partitioning & transmutation* (*P&T*)⁴⁶¹, au stockage géologique. Nous gardons une distance critique par rapport à sa réflexion dans la mesure où ne pouvons souscrire à la manière

⁴⁶¹ Le partitioning du combustible nucléaire usé (UOX ou MOX) est séparé par des techniques de retraitement avancées en plusieurs flux de matières. Certains d'entre eux pourraient être réutilisables (actuellement U et Pu ; éventuellement d'autres radionucléides) tandis que les autres devraient être conditionnés comme des déchets. Les techniques avancées de séparation ne sont pas encore appliquées à l'échelle industrielle. La transmutation consiste en la transformation des actinides en radionucléides de plus courte durée de vie (ONDRAF et SCK CEN, 2019).

dont les avantages de cette technologie sont présentés⁴⁶² pas plus que nous ne pouvons considérer, avec lui et Okrent, le modèle américain de Yucca Mountain comme représentatif des stockages géologiques de déchets radioactifs (Taebi, 2011 ; Okrent, 1999). Toutefois, sa réflexion philosophique nous inspire et nous la pensons applicable au cas qui nous occupe. Taebi établit que si le P&T peut être considéré comme une technologie complémentaire au cycle fermé du combustible⁴⁶³ qui présente l'avantage de réduire la durée de vie des déchets⁴⁶⁴, cette technologie fait peser un lourd tribut aux générations actuelles et aux générations futures proches impliquées dans son développement et ce, en matière de sûreté (transport du combustible vers de usines de retraitement à l'étranger) et de sécurité (risque de prolifération accru lié à la récupération du plutonium), pour un bénéfice entièrement voué aux générations futures lointaines. Ce qui est intéressant dans l'exemple que donne Taebi, c'est l'incertitude qui entoure les technologies P&T, une incertitude relative à la possibilité d'industrialiser

⁴⁶² Parmi les arguments (nombreux) contre l'engouement pour le P&T, citons : 1) la technologie P&T transmute les seuls actinides alors que ceux-ci sont immobiles dans un stockage géologique et qu'ils n'atteignent donc pas la biosphère. S'ils représentent la plus grande radiotoxicité, celle-ci n'est dangereuse que dans le scénario d'intrusion humaine, scénario marginal par rapport au scénario de référence ou au scénario d'évolution attendue. 2) les principaux contributeurs de la dose sont les produits de fission et d'activation mobiles et à longue demi-vie (e.g. Se-79, I-129, Cl-36, C-14, ...) pour lesquels aucune transmutation n'est possible. 3) La transmutation est impossible sur les déchets existants déjà conditionnés (CSS, 2021). 4) un cycle de combustible P&T devrait produire des déchets vitrifiés hautement radioactifs, des déchets métalliques de moyenne activité provenant du combustible utilisé ainsi que des déchets hautement radioactifs et de moyenne activité de l'accélérateur ADS (Accelerator Driven System) nécessaire au P&T. 5) Ce scénario exige des pistes de R&D afin de séparer les actinides mineurs du combustible, à savoir Np, Am et Cm. 6) Cette technologie n'aurait de plus-value en Belgique, autre que celle de la recherche fondamentale, que s'il avait été décidé de prolonger l'énergie nucléaire et de développer de nouveaux réacteurs. Etc.

⁴⁶³ C'est-à-dire un cycle avec retraitement du combustible afin d'en récupérer l'uranium et le plutonium en vue d'une possible réutilisation.

⁴⁶⁴ Taebi ne parle pas, dans sa description du retraitement, du moindre pouvoir chauffant des déchets vitrifiés par rapport au combustible utilisé directement stocké (après refroidissement en piscine). En effet, la puissance thermique est initialement déterminée par les produits de fission Cs-137 et Sr-90 principalement. L'Am-241 et certains isotopes du Pu y contribuent également. Après plusieurs années de décroissance, seuls l'Am et le Pu constituent les contributeurs thermiques. Il ne parle pas davantage des bénéfices d'une standardisation du terme source dès lors que les déchets issus du retraitement sont des déchets vitrifiés « moyennés » et qu'il en résulte une gestion facilitée en installation de stockage. Pour ce qui est de la durée de vie, nous sommes en désaccord avec les chiffres annoncés dans la publication de Taebi, qui identifie la durée de vie d'un déchet issu du P&T à la seule radiotoxicité de l'U/Pu. Ces chiffres sont par conséquent, sous-estimés.

un jour une technologie éprouvée uniquement à l'échelle du laboratoire. Il s'agit d'une incertitude que nous retrouvons également, de façon formelle, dans la recherche d'une roche hôte intrinsèquement plus sûre. Si de meilleures valeurs pour les paramètres clés de la sûreté peuvent être imaginés ou trouvés dans la littérature, comme, par exemple, une conductivité hydraulique plus basse, la réalité sur site est plus qu'incertaine. Les deux problématiques partagent donc des prémisses – et donc des incertitudes – similaires. Il semble en effet, sur un plan formel, tout aussi incertain d'espérer trouver une roche hôte intrinsèquement meilleure sur le plan de la sûreté que de miser sur l'industrialisation du P&T pour optimiser une installation de stockage.

Selon Taebi, si la technologie P&T permet simplement de réduire la durée de vie des déchets, il paraît injustifié et injustifiable de faire courir aux générations actuelles plus de risques alors que des stockages sont déjà en exploitation dans certains pays et ont donc fait leurs preuves⁴⁶⁵. Mais la question centrale avec les stockages de déchets radioactifs est l'incertitude sur le long terme qui touche à la fois la prédiction du comportement des systèmes de stockages et l'évolution de nos sociétés (Okrent, 1999). Nous avons déjà discuté les devoirs à l'égard des générations dans un lointain futur et la possibilité de concevoir une responsabilité décroissante envers elles (Vetter, 1970 ; Callahan, 1980 ; Ouchene et Moroncini, 2016). Toutefois, soutient Taebi, les besoins physiologiques essentiels ou intérêts vitaux (Barry, 1997) des générations futures sont connus avec certitude et, dans cette perspective, il serait injustifié de modifier le standard de sûreté pour le futur lointain⁴⁶⁶. Taebi rejette donc l'idée d'un estompement du standard de sûreté après un certain laps de temps au prétexte de l'incertitude qui entoure le futur lointain. Nous souscrivons d'ailleurs totalement à ce point de vue, en adéquation avec le principe d'égale protection prôné par l'AEN

⁴⁶⁵ Des stockages géologiques ont déjà fait leurs preuves mais pas (encore) pour les déchets hautement radioactifs. Notons que la durée de vie des déchets n'est absolument pas diminuée de moitié par le P&T comme certaines présentations de cette technologie uniquement centrées sur la radiotoxicité du Pu et de l'U pourraient le laisser croire.

⁴⁶⁶ Comme cela semble avoir été le cas dans les évaluations de Yucca Mountain (Taebi, 2011, p. 186). C'est sur la base de cet exemple que Taebi montre que le principe d'égalité de protection prôné par l'AEN (NEA, 1984) n'est pas respecté dans le cas des stockages géologiques. Nous contestons le choix de cet exemple comme emblématique des stockages géologiques.

(NEA, 1984). Mais Taebi va plus loin dans son raisonnement en remettant en question les fondements mêmes de ce principe d'égal traitement entre générations. Il observe en effet que pour qu'il y ait égal traitement, il faudrait qu'il y ait aussi égale distribution des bénéfices afin de justifier une égale distribution des charges. Or peut-on prétendre que les bénéfices de l'énergie nucléaire sont équitablement répartis sur les générations (Shrader-Frechette, 1994) ? Certes, dans une perspective utilitariste, il serait sans doute possible de défendre que la prospérité d'une société future, sans énergie nucléaire, mais construite sur l'héritage de notre société actuelle, est due, en partie, à l'ère nucléaire. Taebi fait cependant remarquer que même si on se crédite de cette réflexion, il serait difficile de prétendre que la distribution des bénéfices aura été homogène et équitable jusqu'à un futur très distant de la société actuelle (Taebi, 2011, p. 187). La société présente tire, de toute évidence, un bénéfice plus grand que la société future éloignée de quelques siècles. Par conséquent, et comme le soutient également l'AEN, il paraît donc raisonnable de faire peser le tribut le plus lourd à la génération ayant directement bénéficié des fruits de l'énergie nucléaire (NEA, 1995).

Il y a donc chez Taebi deux arguments majeurs, l'un est purement éthique tandis que l'autre est à mi-chemin entre l'éthique et l'épistémologie. Il y a d'abord l'argument selon lequel il paraît injustifié de tolérer une diminution du standard de sûreté au-delà d'un certain laps de temps, fût-il lointain. Cet argument est renforcé par le fait qu'en outre, les générations lointaines n'auront eu qu'un bénéfice indirect très faible de l'énergie nucléaire dont elles seraient héritières. Taebi souscrit donc dans un premier temps à l'égalité de traitement entre générations afin d'aligner le standard de sûreté applicable aux générations futures sur celui des générations présentes. Cependant, dans un second temps, il dépasse cet argument et en dénonce les fondements erronés : en réalité l'égal traitement entre générations suppose une égale répartition des bénéfices et, à défaut, il paraît donc justifié d'alourdir la charge des générations ayant tiré le plus grand bénéfice de l'énergie nucléaire. De ce point de vue, les générations futures s'en sortent donc avec plus d'égards que les générations actuelles. Le deuxième argument est celui de l'incertitude que l'on exprime sur le très long terme sous forme de scénarios de dommages. Juger l'acceptabilité d'une technologie sur de telles bases conduit, selon Taebi, à des « défis inextricables » (Taebi, 2011, p. 185).

Nous voyons, dans le développement de cette opinion, une grande similitude avec le raisonnement supposé de l'AFCN. Si l'AFCN plaide pour le scénario 2 en dépit des incertitudes qui l'entourent et même si ce scénario pourrait faire peser un tribut plus lourd aux générations actuelles et celles d'un futur immédiat qu'aux générations futures éloignées, ce tribut est justifié. Il est donc possible pour l'AFCN, à la fois de s'aligner sur l'opinion de l'AEN d'égale protection et d'exiger, pour y parvenir, que les charges de gestion sur les générations nanties des bénéfices de l'ère nucléaire soient plus lourdes que pour celles qui leur succèdent.

Remarquons que ce point n'est nullement en contradiction avec ce que nous écrivions en conclusion de la section 10.6.3.1 : la maximisation de la sûreté pour les générations les plus éloignées n'est défendable pour l'AFCN qu'à la condition de ne réduire éventuellement que des opportunités de bien-être des générations les plus immédiates, pas leurs intérêts vitaux. C'est bien le cas.

Enfin, ajoutons que compter sur les générations actuelles pour gérer la fin du cycle de l'ère nucléaire, c'est miser sur les générations disposant de toutes les compétences pour ce faire et donc, garantir une *gestion en toute sûreté*.

10.7 Vers une hybridation des rationalités : application de la TCR et de la TRO à l'AFCN et l'ONDRAF

La présente section prolonge la section 10.3 dans la comparaison des acteurs AFCN et ONDRAF vis-à-vis de la problématique du choix de la roche hôte en y adjoignant la perspective axiologique. En effet, il nous paraît pertinent de tenter de compléter le profilage de l'AFCN et l'ONDRAF esquissé précédemment, en ajoutant leurs motivations d'ordre moral. Rappelons que nous avons cherché à investiguer la subjectivité psychologique de ces acteurs afin de comprendre non seulement *comment* ils se différenciaient mais aussi *pourquoi*. Au-delà de ce qui a rendu possible cette divergence, c'est-à-dire au-delà des conditions nécessaires de celle-ci – conditions proprement épistémologiques dont l'origine se logerait dans l'imprécision de la doctrine internationale de sûreté –, nous recherchons aussi les conditions suffisantes

de ce mouvement. Cette quête nous a conduit à la recherche des *bonnes* raisons au sens de la rationalité ordinaire. Ces raisons ou conditions ne sont plus d'ordre épistémologique mais relèvent de l'éthique.

Le tableau 10-10 ci-dessous fournit une vision synoptique des principales caractéristiques des deux institutions, réunies dans les deux modèles de rationalités – rationalité instrumentale (substantive et procédurale) et rationalité ordinaire – que nous avons explorés jusqu'ici et que nous avons décidé d'hybrider.

Dans ce tableau, les cadres de Simon et de Boudon ont été combinés afin d'esquisser les profils de rationalité respectifs des deux institutions. Les différences observées au niveau de la rationalité instrumentale sont d'ordre épistémologique, elles mettent en évidence la tension existant entre optimisation et *satisficing*. Nous les avons discutées à la section 10.3.

Les différences relevées au niveau de la rationalité ordinaire sont quant à elles d'ordre éthique. Nous ne revenons plus ici sur l'identification des courants éthiques dominants de chacune des institutions puisque nous les avons déjà largement commentés. Observons simplement que les objectifs fondamentaux de ces deux acteurs – appelés *focales* dans le tableau synoptique – confèrent un angle d'approche des problématiques significativement différent : la durabilité des solutions résulte d'un équilibre entre plusieurs dimensions parfois contradictoires (voir section 10.6.2.2), alors que les principes de radioprotection et de sûreté se renforcent mutuellement dans un mouvement d'accumulation centrifuge (voir section 10.6.2.4).

Quant à l'équité intergénérationnelle, elle est une préoccupation importante pour les deux acteurs, en adéquation avec le courant de pensée international. Toutefois, nous avons vu que l'AFCN pouvait accepter un tribut plus important pour les générations héritières directes de l'ère nucléaire si cela permettait de garantir l'égalité des chances pour la postérité (voir section 10.6.3.3). Cette conception n'est pas partagée par l'ONDRAF qui ne peut justifier d'alourdir exagérément la charge des générations actuelles au profit des générations subséquentes. Dans ce même esprit, l'ONDRAF veille également à une équité sur un plan spatial au sein même des générations

présentes, en veillant au bien-être des communautés locales. Cet aspect est moins présent dans la perspective agrégative de l'AFCN.

*Tableau 10-10 – Synopsis reprenant les caractéristiques principales et discriminantes de l'AFCN et l'ONDRAF dans les différents cadres de rationalités explorés : rationalité instrumentale (substantive et procédurale) et rationalité ordinaire. *Les opportunités de bien-être sont ici envisagées par rapport aux communautés locales et la société en général qui subiraient le tribut d'une prolongation de l'entreposage temporaire.*

TCR/ TRO	Composantes instrumentales/ axiologiques	AFCN	ONDRAF
Rationalité instrumentale (Cadre théorique de Simon)	Rationalité substantive/procédurale	Optimisation	Satisficing
	Fonction d'utilité/degré d'aspiration	Max (sûreté)	d°(aspiration) = sûreté
	Environnement externe (paramètres)	Paramètres socio-économiques (e.g. cadre législatif)	Paramètres socio-économiques (e.g. cadre législatif)
	Environnement interne (contraintes)	- Solution en Belgique	- Solution en Belgique - Résultats du programme R&D
	Variable(s)	Choix de la roche	Incertitude(s)
Rationalité ordinaire (Cadre théorique de Boudon)	Ethique dominante	Utilitariste (+ prudence + éthique de la vertu)	Suffisantiste (Brundtland)
	Focale	Principes de radioprotection et de sûreté	Durabilité des solutions
	Equité intergénérationnelle	Générationnelles actuelles exclues (sauf pour sûreté)	Générationnelles actuelles incluses
	Equité intragénérationnelle	Faible	Forte
	Intérêts vitaux/opportunités de bien-être & choix	Préservation des intérêts vitaux > opportunités de bien-être des générations actuelles*	Préservation des intérêts vitaux > opportunités de choix des générations futures

Enfin, si toutes deux donnent pourtant la priorité à la préservation des intérêts vitaux, les institutions se distinguent dans la temporalité du processus de décision. L'AFCN peut concevoir de restreindre le bien-être des générations actuelles afin de garantir la pérennisation des intérêts vitaux dans le lointain futur alors que l'ONDRAF, en poursuivant le même objectif, souhaite prendre des décisions rapides allégeant l'incertitude qui pèse sur les épaules des générations présentes et ce, quitte à restreindre les possibilités de choix des générations futures.

Remarquons que nous avons envisagé ici les opportunités de bien-être par rapport aux communautés locales et la société en général qui subiraient le tribut d'une prolongation de l'entreposage temporaire tant dans les nuisances directes éventuelles que dans les charges liées au fait de différer une solution définitive de gestion. Mais il nous faut cependant noter que prolonger la R&D pour envisager plusieurs roches hôtes offrirait plus de choix aux générations actuelles. Pour assumer le signe d'inégalité dans la dernière ligne du tableau 10-10, nous avons donc dû considérer que les charges étaient plus dommageables pour le bien-être des générations présentes que l'avantage apporté à celui-ci par une plus grande liberté de choix.

10.8 Synthèse et conclusions du chapitre 10

Le chapitre 10 est consacré à une étude de cas dans une démarche à la fois prospective et relevant du test d'hypothèse. L'étude porte sur l'application du principe d'optimisation au choix de la roche hôte, une application demandée par l'AFCN mais contestée, dans ses fondements, par l'ONDRAF. C'est ce cas pratique, cette difficulté rencontrée sur le terrain d'exercice de l'ingénieur, qui est à l'origine de l'investigation philosophique entreprise dans cette thèse. Si l'étude de cas a servi d'horizon de recherche sur ce qui, de la sûreté ou de la protection radiologique, pouvait éloigner l'ONDRAF de l'AFCN, elle sert aussi à en confirmer les raisons et à les approfondir.

Une différence de rationalités au sens où l'entend Herbert Simon a été identifiée lors de l'investigation menée dans les précédents chapitres, et nous avons proposé d'associer, sous réserve de confirmation, une *rationalité substantive* à l'AFCN et une *rationalité procédurale* à l'ONDRAF. Cette différence de rationalités a pu naître et prendre appui sur une ambiguïté

résidant dans la doctrine internationale de sûreté et, en particulier, dans la généralisation sans doute abusive du principe d'optimisation radiologique à la sûreté. L'étude de cas a avant tout permis de confirmer ce diagnostic par l'analyse de documents exprimant la prise de position de l'AFCN sur les travaux de l'ONDRAF et, en particulier, sur le choix de la géologie pour un stockage de déchets radioactifs. La confirmation de ce qui n'était initialement qu'une hypothèse a également mis en lumière d'autres dimensions non exclusivement épistémologiques – des *indices* socio-politiques – que nous avons choisi de ne pas approfondir afin de ne pas détourner la question de recherche.

Fort de cette confirmation, le cadre théorique de Simon a été concrètement appliqué à la question de l'optimisation de la roche hôte et a révélé une différence de cadrage de la problématique à l'examen. Cette différence, bien que significative, peut passer inaperçue dans les échanges entre ingénieurs des deux institutions. La sûreté, un *maximum* pour l'AFCN et un *degré d'aspiration* pour l'ONDRAF, apparaît seulement, en première instance, comme une préoccupation commune sans laisser sa dimension métaheuristique⁴⁶⁷ se dévoiler. Les contraintes et variables du problème se déclinent également différemment pour ces deux acteurs, les acquis du programme de recherche, notamment, constituant une composante de l'environnement interne pour l'ONDRAF et non pour l'AFCN. Cette différence fondamentale permet à l'AFCN de proposer à tout moment une sortie de cadre qui crée un facteur d'instabilité dans le chef de l'ONDRAF.

L'analyse systématique des roches hôtes articulée autour de la notion d'attribut de sûreté, d'ailleurs non univoquement définie, a suivi une méthodologie nécessairement empreinte de subjectivité. L'analyse multicritère, outil d'optimisation multi-objectif, sollicite le jugement d'expert à différents niveaux, dans l'attribution des scores ainsi que dans celle des pondérations. Si la première relève d'une *subjectivité épistémique*, fondée sur l'extrapolation de connaissances constituées vers un champ moins maîtrisé, la seconde traduit des préférences dont l'origine est à chercher en

⁴⁶⁷ Voir note de bas de page n° 5.

dehors de l'espace du problème et se caractérise par une *subjectivité psychologique*.

Par la description détaillée de l'analyse multicritère, la *subjectivité épistémique* apparaît dans tout ce qu'elle a d'approximatif et de pré-orienté. La dépendance des critères génériques entre eux, *dépendance intra-système*, révèle le caractère artificiel de l'entreprise de comparaison systématique et interroge la légitimité de celle-ci en tant que *cadre normatif* permettant de choisir la *meilleure* roche hôte. L'analyse de sensibilité effectuée sur les premiers résultats de l'exercice de comparaison des roches hôtes montre l'importance de la pondération des principes et piliers de sûreté dans le choix final. Il suffit de privilégier tel pilier ou principe de sûreté pour faire ressortir telle option préalablement identifiée, aucune option ne pouvant, en tenant compte des incertitudes, réellement prendre l'ascendant sur les autres. Ce constat nous a invité à quitter le registre de la *rationalité instrumentale* de Simon afin de partir à la recherche d'un cadre completif qui permettrait de saisir les valeurs et les normes à l'œuvre derrière les préférences. Nous avons trouvé ce cadre dans la théorie de la *rationalité ordinaire* de Boudon.

Une distance critique par rapport à la théorie de la rationalité instrumentale était également nécessaire afin d'échapper au développement spontané d'un *habitus utilitariste* attaché à la question de l'optimisation, la frontière entre *l'instrumental* et *l'axiologique* n'étant pas totalement hermétique. Le cadre d'analyse de Simon, connoté implicitement sur le plan éthique, aurait donc pu rendre impossible toute investigation dans ce domaine. En outre, se concentrer sur la seule optimisation ramène les différences entre les deux institutions à cette seule pomme de discorde alors que la formulation des préférences – précisément à rechercher en dehors de l'espace du problème – requiert un élargissement de vues. Cette prise de recul nous a ramené une nouvelle fois à l'étude de la sûreté. Cette dernière a été conduite avec la méthodologie qui sied à l'étude de cas, c'est-à-dire l'analyse de textes rédigés par les deux acteurs à l'examen et définissant les missions stratégiques de l'AFCN et de l'ONDRAF.

L'analyse de la *Déclaration stratégique* de l'ONDRAF et de la *Déclaration nationale de sûreté* de l'AFCN nous a permis de leur associer une théorie de justice sociale spécifique : un *suffisantisme* avec une prépondérance de la *durabilité* pour l'ONDRAF et un *utilitarisme* renforcé par la valeur de

prudence pour l'AFCN. Le *profilage* des deux institutions a pu être poursuivi en revenant sur la question spécifique de l'optimisation dans le choix de la roche hôte mais cette fois, sous un angle éthique. La compatibilité de leurs prises de position sur cette question avec l'éthique plus générale de la sûreté, qui venait d'être identifiée, a été vérifiée. En retenant comme facteurs discriminants l'équité intergénérationnelle, l'équité intragénérationnelle ainsi que l'équilibre entre la préservation des intérêts vitaux et la préservation des opportunités de bien-être – dans une perspective non inclusive –, nous avons dressé les cartes d'identité respectives de l'AFCN et de l'ONDRAF. Ces fiches signalétiques, loin des descriptions officielles des institutions, résultent de la combinaison de deux cadres théoriques, celui de la *rationalité instrumentale* et celui de la *rationalité ordinaire*. Elles révèlent l'implicite des débats et nous éclairent à la fois sur le *non-dit* voire le *non-pensé* et sur les raisons premières de ces différences de vues. Nous pouvons comprendre à présent *comment* l'AFCN et l'ONDRAF diffèrent mais aussi *pourquoi*.

Conclusions générales

Chapitre 11 Bilan

La question de recherche – *portant sur la différence de posture intellectuelle des acteurs institutionnels que sont l'ONDRAF et l'AFCN, au sujet de la problématique de l'application du principe d'optimisation au choix de la roche hôte pour un stockage géologique de déchets radioactifs* – a été soulevée par la pratique de notre métier d'ingénieur. Elle porte donc, par définition, sur une étude de cas. Cette étude de cas est à la fois initiatrice, prospective et *in fine* un test d'hypothèse. Nous y avons consacré un important chapitre qui constitue, malgré ses nombreux apports formels, la partie *pratique* de cette thèse.

Avant d'entamer l'analyse proprement dite de la divergence de vues entre l'ONDRAF et l'AFCN, nous avons interrogé les prédicats visibles et invisibles de la question, dans une démarche de problématisation. Il s'agit de la *sûreté nucléaire*, du *principe d'optimisation* dans son expression originelle et de la *protection des générations futures* en ce que celle-ci constitue l'argument cardinal de justification du stockage géologique. Cette mise en perspective des différentes interrogations sous-jacentes à la question principale a révélé de multiples dimensions, tant dans le champ de l'épistémologie que dans celui de l'éthique et constitue la première partie *théorique* de notre recherche.

A l'image d'une sonate, nous retraçons *ici* le fil rouge de notre travail, par trois différents mouvements. Le premier concerne l'analyse des questions sous-jacentes et comporte trois étapes de problématisation. Le deuxième porte sur le cadrage théorique de la rationalité et le troisième, sur l'étude de cas proprement dite.

11.1 Premier mouvement : l'analyse des questions sous-jacentes

11.1.1 La sûreté

Interroger la sûreté, son sens et sa définition, c'est d'abord interroger le sens commun, une notion mêlée à un sentiment qui a érigé un besoin en concept. La nature de la sûreté se confond avec son utilité et c'est la perception qui vaut pour définition. Nous sommes face à *l'obstacle épistémologique* dénoncé par Bachelard et, si la science peut peut-être légitimer l'opinion, c'est toujours pour d'autres raisons que celles qui l'ont fondée (Bachelard, [1934] 1999). Pourtant, inspirer la *confiance* est l'objectif du dossier de sûreté, le *safety case*, qui contient la démonstration de sûreté et qui fait ainsi s'entrechoquer une aspiration de rigueur avec l'inspiration d'un sentiment. La sûreté est donc portée par la dialectique intrinsèque de son principal véhicule, le *safety case*, en tant que celui-ci mêle conviction et savoir méthodiquement fondé. Bien que l'AIEA ait défini la *sûreté nucléaire* comme l'obtention de conditions d'exploitation correctes, la nature profonde de celle-ci résiste à l'investigation. Au prix de l'hypothèse que le stockage géologique peut s'apparenter à un système industriel, nous avons donc cherché, dans le domaine de la *sûreté de fonctionnement*, les éléments capables de nous renseigner sur la nature même de la sûreté et la visée de sa démonstration. Cette hypothèse a été jugée raisonnable compte tenu d'une part, de la nature hybride des stockages, à la croisée de la sûreté nucléaire et de la sûreté conventionnelle, et d'autre part, de l'origine de la sûreté nucléaire dont les fondamentaux se sont inspirés des secteurs plus classiques de l'ingénierie. Toutefois, la particularité des stockages géologiques ne peut jamais être occultée car, au sein même de la *sûreté nucléaire*, une distinction doit s'opérer d'emblée entre les *risques avérés*, relatifs à l'exploitation des réacteurs de puissance par exemple, et les *risques potentiels* relatifs aux stockages, à l'échelle des temps géologiques. Cette distinction induit une transition du domaine de la *prévention* vers celui de la *précaution*.

L'étude de la *sûreté de fonctionnement* nous a conduit à la *démonstration de fiabilité*, établie depuis les années 50, qui pourrait être à l'origine de la

démonstration de sûreté telle qu'elle est entendue aujourd'hui. Celle-ci repose notamment sur des principes de *simplicité de conception*, de *redondance* et de *dimensionnement pessimiste* auxquels il est facile de faire correspondre, dans le domaine de la *sûreté nucléaire*, les principes de *robustesse*, de *défense en profondeur* et l'usage du *conservatisme* tant dans la conception des systèmes de stockage que dans les évaluations de sûreté.

Cette *sûreté de fonctionnement*, qui établit « l'aptitude à fonctionner comme requis quand cela est requis » (Norme ISO, 2015), est aussi la description de la *disponibilité* (i.e., accomplir une fonction requise dans les conditions données au moment requis) et des facteurs qui la conditionnent dont la *fiabilité*. Cette disponibilité (*availability*), qui peut à son tour être vue comme l'un des *attributs* de la *sûreté de fonctionnement*, est celle visée par le principe BAT (*Best Available Techniques*), qui fait référence à des techniques éprouvées et robustes. Le BAT est l'un des principes qui renforce le *principe d'optimisation*, objet de notre recherche, en traversant les domaines de la sûreté de fonctionnement, du droit environnemental qui le formalise et enfin, de la *sûreté nucléaire*. De cette façon, les liens entre *sûreté* et *fiabilité*, *fiabilité* et *disponibilité*, *disponibilité* et *sûreté*, *disponibilité* et *optimisation* se laissent entrevoir, mais si des liens se tissent, la circularité des définitions ne permet pas de pousser plus loin l'investigation sur la nature profonde de la sûreté. Cependant, l'analyse de *l'arbre de la sûreté de fonctionnement* permet de dégager une piste en ajoutant, aux côtés des attributs de *fiabilité* et de *disponibilité*, celui de *l'innocuité*. Or, l'exigence d'innocuité a été abondamment discutée dans le cadre du principe de *précaution*, un domaine qu'il est pertinent d'envisager en raison de la spécificité des stockages géologiques et, comme mentionné précédemment, de leurs *risques potentiels*. Le contexte d'incertitudes ainsi que la grande temporalité qui caractérisent les stockages rendent le rapprochement avec le principe de *précaution* d'autant plus légitime. Cette légitimité est encore renforcée par le principe de *protection des générations futures* érigé par l'AIEA comme principe fondamental de sûreté et qui fonde, par ailleurs, la démarche de *précaution*. Notons que le principe de *précaution* est également présent dans le « *mission statement* » de l'ONDRAF.

Toutefois, l'usage d'un même mot dans des contextes distincts ne doit pas nous abuser. L'*innocuité* entendue par la *sûreté de fonctionnement* comme

l'absence de catastrophes n'est pas celle entendue comme l'absence de dommage, dans le cadre de la *précaution*. C'est sur ce point que Dupuy, catastrophiste, se démarque de la critique du principe de précaution faite par Godard, Lagadec et Michel-Kerjean autour d'une lecture pourtant commune de Jonas. Avec le *Principe de responsabilité* et ses impératifs moraux tournés vers la protection des générations futures et « la permanence d'une vie authentiquement humaine sur terre » (Jonas, [1979] 1995), l'éthique se mêle au versant épistémologique de notre recherche tout en l'éclairant. En outre, la norme d'un dommage zéro (innocuité), l'inversion de la charge de la preuve et la focalisation sur le scénario du pire qui constituent les composantes de la *preuve d'innocuité* font apparaître, en filigrane, certaines requêtes de l'AFCN à l'ONDRAF : une optimisation du système sans limite préétablie, une démonstration de sûreté visant l'absence de nocivité et la formulation de scénarios pénalisants. Cette découverte fut un moment crucial dans nos travaux et correspond à une **première étape de problématisation** de la recherche. L'analyse de la *sûreté*, de la *protection des générations futures* et de l'*optimisation*, a initié une dynamique qui a rendu la réflexion sur la nature de la sûreté et la démonstration de celle-ci indissociables, de même qu'elle a lié, en entremêlant épistémologie et éthique, cette dernière réflexion à la question de la divergence de vues des acteurs institutionnels en charge de la sûreté des déchets radioactifs.

En démontant chacune des composantes de la *preuve d'innocuité*, les penseurs critiques de la *précaution* compromettent indirectement le sens donné aux requêtes de l'AFCN. L'absence de dommage se heurte à l'exigence de ressources infinies et, plus fondamentalement encore, à l'exigence, au niveau éthique, d'une scientificité d'un ordre de grandeur supérieur à celle disponible. L'inversion de la charge de la preuve bute sur l'objection poppérienne de la falsifiabilité. Quant à la focalisation sur le scénario du pire, elle entraîne un *nivellement par le pire* fondé sur une règle d'abstention jonassienne. Mais, en remplaçant, comme le fait Dupuy, l'absence de dommage par l'absence de catastrophe, en réhabilitant le cadre statistique du risque et en introduisant l'hypothèse conditionnelle dans le scénario du pire (Dupuy, 2002), la démonstration d'innocuité retrouve une place digne d'intérêt dans les tentatives d'explicitation de la sûreté. Ainsi, la focalisation sur le scénario du pire, à l'image du scénario pénalisant de l'AFCN, ne relève pas de la prévision mais vise à *minimiser le pire* dans le cadre d'un scénario

postulé comme certain. Le subterfuge intellectuel repose sur le fait que seule l'inévitabilité du scénario peut conduire réellement à la *prudence* et jouer tant sur la prise de conscience que sur l'action, de manière que la catastrophe puisse révéler son ultime contingence et, *in fine*, ne pas avoir lieu. L'analyse des exigences attachées aux scénarios pénalisants de l'AFCN semble confirmer cette interprétation. En effet, la valeur de référence préconisée pour ces scénarios étant trente fois supérieure à la contrainte de dose pour le scénario d'évolution attendue, le « scénario du pire » ne vise clairement pas l'absence de dommage et s'aligne, de ce fait, sur la définition de l'*innocuité* que propose la *sûreté de fonctionnement*. L'interprétation conflictuelle du scénario pénalisant entre l'ONDRAF et l'AFCN pourrait trouver son origine dans un héritage, pour l'ONDRAF, de l'esprit de la critique du principe *précaution* de Godard et ses collègues, et pour l'AFCN, dans celui de la *sûreté de fonctionnement* et du catastrophisme. Si l'on prolonge cette idée, l'AFCN entreverrait la démonstration de sûreté dans l'esprit d'une démonstration de fiabilité. Or celle-ci répond à l'axiome de Peirce – chaque élément constitutif d'un système se doit d'être maximisé pour conférer la solidité de l'ensemble – et pourrait bien influencer l'interprétation du principe d'optimisation, piste que nous avons d'ailleurs suivie.

11.1.2 L'éthique du système de la protection radiologique et la protection des générations futures

Après cette incursion dans le domaine de la sûreté, nous avons orienté notre propos sur la protection radiologique, envisagée d'abord de manière globale, avant d'analyser plus spécifiquement le principe d'optimisation et progresser ainsi vers le cœur de notre question de recherche. Les principes de protection radiologique, dont le principe d'optimisation fait partie, ne peuvent être séparés du cadre moral qui leur a donné naissance. De façon concomitante, la CIPR et l'AIEA nous renvoient à l'obligation de *protection des générations futures* dans une perspective de *durabilité* et de *précaution*. Ce devoir envers les générations futures se devait donc aussi d'être interrogé au-delà de son évidence apparente, à l'instar de ce qui fut fait pour la sûreté, afin de ne pas laisser l'opinion parler seule sur l'agora. L'obstacle n'est pas proprement épistémologique ici, puisqu'il s'agit d'emblée de devoir moral,

mais les textes légaux et réglementaires postulent la protection des générations futures plus qu'ils ne la défendent, recourant, une fois encore, à un certain sens commun pour sa validation. Qui plus est, ce sens commun n'entérine cette obligation qu'à un horizon qui lui est familier, à savoir les générations futures qui nous succèdent immédiatement alors que l'argument en faveur des stockages géologiques porte sur des milliers de générations. Ce constat a d'ailleurs motivé des travaux sur une découpe temporelle de la notion de « générations futures », une distinction particulièrement pertinente pour les stockages lorsqu'il s'agit de discuter les notions de surveillance, de réversibilité et de récupérabilité par exemple. L'analyse du cadre moral de la protection radiologique passe donc par le traitement de la question « Avons-nous *réellement* des obligations vis-à-vis des générations futures ? », ce qui constitue une **deuxième étape de problématisation** de notre recherche dans une perspective proprement éthique.

Notre point de départ a été celui de l'éthique du futur de Jonas qui, en reformulant des impératifs kantien, allie la dimension déontologique à une perspective conséquentialiste tournée vers le futur lointain. Si cette perspective déontologique est renforcée par les textes de l'ONU et de l'UNESCO, la préservation des générations futures a fait l'objet de moult critiques dont nous avons voulu brosser le tableau. Parmi elles, notons la question du droit des êtres non encore venus à l'existence et celle de la responsabilité individuelle et collective à leur égard, une question immédiatement liée à celle des provisions nucléaires et la sécurité de financement des stockages. Ces critiques sont elles-mêmes controversées et l'argument de « non-existence » ne suffit pas à nous absoudre de toute responsabilité envers les générations futures, en dépit des incertitudes qui entourent ces dernières. Des arguments plus subtils tels que le problème de « non-identité » posé par Parfit a également été travaillé et, à son tour, critiqué (Parfit, 1984). L'argument d'absence de relations avec les générations futures, porté par MacLean (MacLean, 1984), a lui aussi été analysé en pointant l'absence de réciprocité intergénérationnelle directe. Mais face à la notion de chaîne d'obligations, l'argument a dû être nuancé. L'argument d'absence d'amour et d'empathie, bien que pertinent à l'échelle individuelle, nous a semblé faible dans une perspective de philosophie politique, de même que celui de l'absence d'avantages mutuels entre

générations. Au-delà de la *protection*, l'enjeu réel est *l'équité intergénérationnelle* au sujet de laquelle de nombreuses théories de justice sociale ont été convoquées : *l'utilitarisme*, l'approche *libérale-égalitaire* de John Rawls et ses variantes ou théories dérivées comme celles de Amartya Sen (*capabilités*) ou de Brian Barry (*durabilité*), le rapport Brundtland (*suffisantisme*) et enfin, l'approche *commutative*.

Certaines notions ont été plus particulièrement discutées au sein de ces grands courants de pensée comme celle du *Social discount rate* de l'utilitarisme, afin de tenir compte des incertitudes entourant l'existence même des générations futures et d'éviter la dérive sacrificielle des générations présentes à leur profit. Il en est de même du *principe de juste épargne* que Rawls a ajouté à ses principes de justice dans le cadre d'un modèle en deux temps afin de garantir l'équité intergénérationnelle (Rawls, [1971] 2009). Nous avons notamment discuté cette approche face à l'argument de réciprocité. Les autres théories de justice distributive ont également permis d'aborder l'analyse éthique des principes de la protection radiologique de même que de planter les bases de la réflexion sur les valeurs éthiques portées par les acteurs institutionnels – ONDRAF et AFCN – sur lesquelles nous sommes revenus, plus tard, dans le cadre de l'analyse de la *rationalité ordinaire* de Boudon (Boudon, 2007 ; Boudon, 2012).

Les fondements éthiques des trois principes de la protection radiologique ont été analysés au gré de l'évolution de ces derniers. Ainsi l'ancrage utilitariste du principe d'optimisation, dans son expression originelle ALARA, a été nuancé afin de tenir compte du remplacement de la notion de groupe critique par celle de personne représentative, introduisant une perspective plus déontologique attachée aux droits des individus et tempérer l'implacable logique de l'approche coûts-bénéfices. Le principe de limites de doses articulé autour de la valeur de prudence découle d'un modèle de justice distributive, mais plutôt *prioritarien* qu'égalitariste. Cette nuance a permis de comprendre pourquoi, dans certaines situations, l'ordre lexicographique des principes de d'optimisation et de limites de doses pouvait s'inverser. Mais le système de la CIPR est loin d'être infaillible et il est mis à mal tant dans ses fondements scientifiques que dans son éthique, notamment par le concept *de minimis* et les effets des (très) faibles radiations sur les êtres vivants. Celui-ci pourrait opposer le principe de

justification à l'encontre même du système de radioprotection, en rappelant qu'une pratique n'est admissible que si les avantages l'emportent sur les risques. L'objection du *sophisme naturaliste* est, à cet égard, éclairante et également pertinente dans le cadre des stockages géologiques puisqu'elle dénonce la production d'un jugement moral (i.e., « c'est acceptable ! ») sur la base de circonstances existantes factuelles (i.e., la radioactivité naturelle). Enfin, le principe de justification, mobilisé à l'instant comme contrepoin, découle d'une éthique de la vertu, comme la CIPR le défend aujourd'hui après l'avoir, à tort, justifié par le biais de l'utilitarisme. Il s'associe également au principe d'optimisation pour traiter les pratiques historiques et lui cède le pas, dans le contexte particulier des déchets radioactifs, la gestion de ceux-ci ne requérant pas de justification.

Ajoutons que, même approché de façon systémique, dans le contexte de la protection radiologique formalisé par la CIPR, le principe d'optimisation se drape déjà d'une certaine ambiguïté dès lors qu'il s'applique aux stockages. La CIPR lui adjoint le principe BAT et confère à l'optimisation une interprétation débordant de la seule protection radiologique pour s'entendre en un sens plus large afin de réduire les impacts radiologiques et non radiologiques du système de stockage. La CIPR fait ainsi écho à la nature hybride des stockages que nous mentionnions précédemment, à mi-chemin entre la *sûreté nucléaire* et la *sûreté de fonctionnement* conventionnelle. Mais ce qu'il convient surtout de relever, c'est que l'hybridation d'un tel système n'entraîne pas une simple adjonction d'un principe (de sûreté de fonctionnement) à un principe (radiologique), elle entraîne une transformation de ce dernier en un concept d'optimisation plus large et non clairement défini (NEA, 2010). Cette optimisation devient alors celle de la sûreté, située à un niveau comparable à celui de la *sûreté de fonctionnement* des systèmes classiques. Le *principe d'optimisation radiologique* occupe donc une place centrale dans l'établissement de liens explicites entre la protection radiologique et les principes de sûreté.

11.1.3 Le principe d'optimisation

Le principe d'optimisation est la troisième facette de notre question de recherche dont les développements sur la sûreté et la protection des générations futures ont révélé la prégnance. L'emploi moderne de ce principe tant en protection radiologique que dans le domaine de la sûreté interroge le lien qui existe entre ces deux domaines. Nous avons vu que la définition de la sûreté (nucléaire) assigne la protection radiologique aux résultats de la sûreté, la première s'intéresse donc aux sources du danger et à la prévention de celui-ci alors que la seconde est établie par rapport à ses récepteurs. La sûreté et la protection radiologique diffèrent donc en objet. Mais plus encore, la protection contre les risques radiologiques apparaît, selon l'AIEA, comme un sous-ensemble de la sûreté (nucléaire), ce qui traduit également une différence d'échelle. A ce constat s'ajoute le fait que le stockage géologique n'est pas uniquement affaire de *sûreté nucléaire* mais aussi de *sûreté conventionnelle de fonctionnement* des systèmes. D'autre part, en tant que résultat du déploiement des mesures de sûreté, la protection radiologique est aussi, en quelque sorte, « consécutive » à la sûreté. Lorsque le principe d'optimisation passe du domaine de la protection radiologique à celui de la sûreté nucléaire et ensuite, à la sûreté plus globale des stockages, il le fait donc au prix de plusieurs transgressions. Nous avons appelé ces transgressions des « glissements » qui correspondent aux « différences fondamentales » identifiées entre les domaines de la protection radiologique et de la sûreté.

Pour révéler ces *glissements*, nous avons entrepris une analyse critique des textes de la CIPR dans une perspective historique afin de comprendre l'évolution du principe d'optimisation depuis ses plus lointaines racines jusqu'à ce jour, ce qui constitue une **troisième étape de problématisation**. Nous nous sommes attardés sur les deux publications majeures à caractère général de la CIPR avant d'approfondir les publications spécifiques aux stockages, afin de tenter de saisir le moment et les raisons de l'élargissement de la portée du principe d'optimisation. Le *premier glissement* conceptuel apparaît comme l'élection de l'optimisation en un état d'esprit ainsi que comme un outil de la *culture de sûreté*. Dans cette mouvance, le principe BAT vient compléter le principe d'optimisation, mais uniquement, au départ, dans le cadre du contrôle des effluents radioactifs, prolongeant ainsi l'esprit

de la directive environnementale de 1996 qui l’a formalisé (EC, 1996). Même si les origines du BAT sont plus anciennes (Lannoy, 2008), il sera ignoré par la CIPR jusqu’à ce qu’il soit mis en exergue par la législation européenne. Il sera ensuite simplement mentionné, non sans une certaine réticence, comme l’attestent les publications de la CIPR qui ont suivi celle de la directive (ICRP, 1997), pour enfin être reconnu d’application plus large (ICRP, 2013). De façon quasi simultanée, *l’optimisation de la protection* devient *l’optimisation de la protection et de la sûreté*, la CIPR validant implicitement le rôle de liaison du principe d’optimisation entre ces deux domaines. L’AIEA conforte la position de la CIPR et exhorte *l’optimisation de la protection* à contribuer à la *maximisation* de la sûreté (IAEA, 2006a). L’AIEA n’hésitera d’ailleurs pas à recommander l’élargissement de l’approche d’optimisation aux aspects non radiologiques (IAEA, 2012), c’est le *deuxième glissement*.

Après avoir écarté l’hypothèse que cet élargissement du principe d’optimisation ne soit causalement lié, dans le chef de l’AIEA, à un autre élargissement, celui du concept d’évaluation de sûreté – bien que nous ne puissions pas exclure qu’ils appartiennent à une mouvance commune –, nous avons relevé que le principe d’optimisation gagne non seulement la sphère technique générale, mais aussi celle de la *gestion* de la conception des systèmes (IAEA, 2011b). Une autre hypothèse à la cause de ces deux glissements se devait d’être examinée. Est-ce que l’application du principe d’optimisation spécifiquement aux stockages géologiques, un objet hybride, ne suffirait-elle pas à expliquer ce fait ?

C’est en recourant aux publications *générales* de la CIPR que nous avons écarté cette possibilité puisque celles-ci montrent le rattachement de la sûreté à l’optimisation de même que l’inclusion du principe BAT à celle-ci (ICRP, 2007). L’analyse du principe BAT nous a semblé cruciale puisque la transition de l’optimisation originelle vers le domaine non radiologique ne pouvait pas s’entreprendre sans lui. Son lien avec le principe d’optimisation est notamment établi historiquement par l’intermédiaire du principe de précaution. Le lien entre l’optimisation et le principe BAT n’est donc pas contingent, en lien avec l’objet « stockage géologique », mais trouve une origine plus substantielle dans l’histoire du principe de précaution.

Une fois l’origine de ces liens clarifiée, nous avons cherché à comprendre l’influence du BAT sur l’optimisation, dans le cas particulier des stockages. En

quittant la sphère radiologique, l'optimisation perdait aussi de sa substance et la CIPR, plutôt que d'analyser alors la licéité du débordement qu'elle avait initié, a préféré chercher une solution pratique, qui plus est en dehors de son corpus, en le principe BAT dont elle fut, jadis, si réticente à reconnaître l'utilité. Ce faisant, la CIPR a redonné une matérialité et une capacité d'action au principe d'optimisation. Mais l'élargissement du principe d'optimisation, vers un principe de gestion gouvernant la conception des systèmes, a eu aussi pour effet d'englober les résultats des évaluations de sûreté dans l'optimisation, générant un élargissement, sur le plan conceptuel, encore plus important. Tout se passe comme si la sûreté se voyait phagocytée par le principe d'optimisation devenu entretemps un méta-principe. Cette *optimisation hyperbolique* constitue, selon nous, un *troisième glissement*.

Ces *glissements* successifs ont engendré de surprenants constats, comme le rapport de l'optimisation au concept de dose. Alors que l'utilisation de la dose doit être relativisée sur le très long terme, il est remarquable de constater que l'optimisation des systèmes de stockages doit prendre de la distance par rapport au concept auquel elle était chevillée, à l'origine, lorsqu'elle n'était que ALARA ! Nous soutenons que, face à une évolution aussi interpellante, les conditions de validité du principe d'optimisation auraient dû être questionnées par la CIPR et l'AIEA. Cette lacune se manifeste aujourd'hui par un décrochage conceptuel incarné par une dualité du *principe d'optimisation* puisque celui-ci, en dépit de son évolution, n'a pas entraîné la disparition de l'ALARA originel. S'il est permis de regretter que le système de protection radiologique de la CIPR n'ait pas été à cet égard plus cohérent, ce sont surtout les *conséquences* de ce manque de réflexivité que nous dénonçons, comme par exemple, le fait d'envisager l'optimisation des stockages pas à pas, dans une perspective séquentielle. Cette approche séquentielle fait davantage penser à l'application de l'axiome de Peirce dans le domaine de la fiabilité des systèmes qu'à celui de l'optimisation, intrinsèquement non additive. Pourtant, ce qui pourrait s'apparenter à un manque de rigueur ne semble pas illégitime au premier abord, en raison des *incertitudes* qui entourent le développement des stockages géologiques sur toute la durée de leur conception et vis-à-vis desquelles une démarche prudente, qui cherche à maîtriser un composant du système à la fois, semble s'imposer. Mais cette difficulté pratique de mise en œuvre de l'optimisation n'en modifie pas pour autant les propriétés intrinsèques. En outre, nous

pensons qu'il faut se garder de faire une analogie entre un processus de recherche, certes progressif, et la conception de l'objet qui bénéficie des résultats de cette recherche, car rien ne prouve que ces deux processus soient en miroir l'un de l'autre.

S'il faut reconnaître que la CIPR invite au dialogue dans la mise en œuvre de l'optimisation, celui-ci s'entame par une aporie. Nous soutenons que c'est sur cette aporie que la différence de rationalités entre l'ONDRAF et l'AFCN, éventuellement préexistante, se cristallise et gagne en puissance.

Enfin, l'analyse des techniques d'aide à la décision permettant la mise en œuvre du principe d'optimisation ne semblent pas avoir été ni revues ni questionnées à l'aune de l'élargissement dont le principe a fait l'objet. La validité d'outils comme l'analyse coûts-bénéfices ou l'analyse coûts-efficacité n'a pas été établie pour la sûreté et préconiser leur emploi, dans ce contexte, soulève la question de la possibilité de réduire la sûreté à une fonction d'utilité. Quant à l'analyse multicritères, technique la plus appropriée en présence d'attributs multiples et à laquelle nous avons eu recours dans notre étude de cas, elle affuble implicitement, à chaque option à l'étude, une fonction d'utilité qui est définie par l'attribution de scores et selon des critères jugés pertinents. Nous avons interrogé la validité de tels modèles d'aide à la décision appliqués à la sûreté, en introduisant, par analogie aux « limites de validité » des modèles descriptifs, la notion de « limites de légitimité » pour des modèles normatifs.

11.1.4 Fin du premier mouvement

L'analyse des questions sous-jacentes a révélé un foisonnement d'aspérités sur le plan conceptuel et celles-ci sont autant de difficultés potentielles dans le dialogue entre l'ONDRAF et l'AFCN. Nous avons formulé l'idée que leurs désaccords n'étaient pas chaotiques ou disparates mais qu'ils pourraient relever d'une différence structurelle dans la manière de raisonner. Cette structure pouvant s'expliquer par l'influence des courants de pensée qui ont nourri tant la sûreté que l'optimisation. Cherchant à retrouver l'origine de ces influences chez ces acteurs institutionnels et analyser la manière dont ils se les sont appropriées (rationalité), nous avons eu recours aux travaux de

Herbert Simon sur la rationalité. C'est le deuxième mouvement de notre réflexion.

11.2 Deuxième mouvement : le cadrage théorique de la rationalité

Herbert Simon a critiqué les insuffisances théoriques et pratiques de l'optimisation dans l'aide à la décision. Dans l'exercice du choix, Simon a mis en évidence une taxonomie de *rationalités* du sujet en fonction de sa capacité à appréhender le réel. En particulier, il a dénoncé le *hiatus* existant entre d'une part, la rationalité supposée parfaite de l'*homo economicus* des modèles économétriques et d'autre part, la réalité des affaires humaines rarement guidées par la recherche d'optimum. Ce cadrage théorique nous a donc semblé particulièrement adéquat pour traiter notre question de recherche. Simon oppose au processus d'*optimisation* qui requiert l'exercice d'une *rationalité substantive* et la traduction du problème en une *fonction d'utilité*, la recherche du *satisficing* qui répond à une *rationalité procédurale* (souvent *limitée*) par rapport à des *degrés d'aspiration* (Simon, [1969] 2004 ; Simon, 1982 ; Simon, 1997).

La critique de Simon à l'encontre de l'optimisation est triple : la réalité ne livre pas toutes les informations pour être décrite exhaustivement et quand bien même ces informations seraient accessibles, nous ne disposons pas des ressources suffisantes pour les traiter adéquatement ; l'arbitrage entre les dimensions incommensurables d'une situation est difficile et requiert plutôt une délibération qu'un calcul ; la recherche d'optimum se restreint aux alternatives directement disponibles et n'en génère pas de nouvelles, à la différence d'une *heuristique de recherche*. Notre lecture de Simon est partie de l'idée que la sûreté constituait, en elle-même, une situation complexe, difficilement réductible à une *fonction d'utilité* en raison d'une multiplicité de dimensions incommensurables. En effet, à la différence de la protection radiologique qui est souvent réductible à la dose finale reçue par un récepteur, la sûreté d'un stockage ne peut être résumée à ce seul indicateur, comme le reconnaît d'ailleurs la CIPR (ICRP, 2013).

Les travaux de Simon montrent que la recherche d'une solution non optimale n'est pas une démarche pour autant irrationnelle et, dans le cas d'étude qui nous occupe, nous avons cherché à vérifier la validité de cette affirmation. En nous posant la question de « qu'est-ce qu'une décision rationnelle ? », nous avons testé, à l'aide du formalisme logico-mathématique proposé par Simon et Rubinstein, si l'optimisation du choix de la roche hôte satisfaisait toujours *l'axiome d'indépendance* qui garantit la rationalité d'une décision (Rubinstein, 1998). Le problème se pose comme suit : l'AFCN demande à l'ONDRAF d'investiguer d'autres roches hôtes potentielles éventuellement meilleures que celles qui sont étudiées depuis des décennies et qui sont prometteuses. L'ONDRAF conteste le sens d'une telle requête (objection épistémologique) et interroge sa légitimité au regard de l'investissement de recherche déjà consenti (objection éthique).

Sans discuter la pertinence, sur un plan épistémologique, de l'hypothèse qu'une roche puisse être intrinsèquement plus sûre qu'une autre, difficulté reportée à l'étude de cas, nous avons traduit la requête de sûreté de l'AFCN en une règle de préférences et le niveau de connaissances acquis à ce jour en une règle d'ordonnancement préalable. Nous avons montré qu'opposer l'option la mieux connue à celle la moins connue pouvait, sous certaines hypothèses simplificatrices fortes, dérationnaliser la recherche de solutions. Ce *biais de simplification* dans la prise de décision est engendré par la rencontre brutale de l'histoire avec une requête qui fait totalement abstraction de cette dernière dans ses présupposés.

Simon souligne également que la mathématisation forte requise pour trouver la solution optimale d'un problème se paie au prix de grandes simplifications. Si un optimum se trouve à ce prix, il est peu probable qu'il corresponde à celui de la situation réelle. Prolongeant sa réflexion sur les différentes rationalités, Simon distingue la *planification substantive* de la *planification procédurale* au sein des entreprises et administrations (Simon, [1945] 1997). La requête de l'AFCN d'appliquer le principe d'optimisation jusqu'au choix de la roche hôte, requête qui puise sa légitimité dans la doctrine internationale de la CIPR et de l'AIEA, traduit une rationalité et une planification *substantives*. L'ONDRAF, pour qui l'optimisation est avant tout celle de la protection radiologique, voit dans le choix de la roche hôte une recherche de *satisficing* et conteste la possibilité d'optimiser un élément

naturel, qui plus est, dans un espace aux dimensions multiples et incommensurables qu'est la sûreté. Il incarne une rationalité et une planification *procédurales*. Le cadrage théorique donné par Simon à la différence de vues de l'AFCN et l'ONDRAF fournit une hypothèse que l'étude de cas nous a permis de tester.

L'analyse de l'étude de cas est le troisième mouvement de notre recherche et répond à la question principale posée par celle-ci, à savoir la différence de posture intellectuelle entre l'ONDRAF et l'AFCN.

11.3 Troisième mouvement : l'étude de cas (application du principe d'optimisation au choix de la roche hôte)

Après avoir confirmé, par l'analyse de documents officiels, les positions de l'ONDRAF et de l'AFCN sur la problématique soulevée par l'optimisation du choix de la roche hôte, nous avons appliqué, **en deux étapes**, le cadrage théorique de Simon. Lors d'une **troisième étape**, nous avons eu recours à un cadrage théorique complémentaire, celui de la rationalité ordinaire de Boudon.

11.3.1 Première étape (Simon)

La première étape a consisté à appliquer à nouveau le formalisme logico-mathématique de la rationalité, mais, cette fois, de façon à envisager toutes les alternatives, chaque type de roche pouvant tour à tour être jugée la plus « sûre ». Ayant confirmé la possibilité d'obtenir une décision non rationnelle en fonction de la nature des prémisses posées, nous nous sommes demandé si la dissension entre l'ONDRAF et l'AFCN relevait bien d'une différence de rationalités, comme nous l'avions supposé précédemment, ou plutôt, d'une simple distorsion du choix rationnel. La question du niveau de connaissances préalables étant centrale à cet égard – il s'agit de la règle d'ordonnancement –, elle nous a conduit à commenter la notion de « circonstances existantes », présente à la fois dans les textes réglementaires de la CIPR et de l'AFCN. Selon l'ONDRAF, l'état de l'art constitue une

circonstance existante alors que l'AFCN refuse de considérer, dans le cadre du processus décisionnel, les résultats du programme de recherche comme un incontestable *déjà là*. Nous avons proposé une explication à cette divergence de vues, en lien avec le moment de la décision, c'est-à-dire, pour l'AFCN, en lien avec le moment de la délivrance d'un permis de construire et d'exploiter. Selon nous, la réticence de l'AFCN trouve une explication dans la temporalité de la mobilisation de l'argument du niveau de connaissances. Certes, au moment de la décision d'autoriser la construction d'un stockage *in tempore non suspecto*, l'état de l'art est une *circonstance existante*. Toutefois, l'état de l'art ne peut être invoqué à n'importe quel autre moment pour dicter l'instant de cette décision. Cette nuance d'interprétation est importante et nous fait basculer de l'épistémologie à l'éthique : si le manque de connaissance ne peut servir à exclure, dans une *perspective substantive*, les options méconnues (épistémologie), l'accroissement de la connaissance, afin de pouvoir prendre la meilleure décision possible au moment opportun, doit s'analyser à l'aune du débours sociétal consenti pour retarder la décision d'enfouir les déchets radioactifs, au profit de l'investigation d'une éventuelle meilleure solution (éthique). Nous remarquons cependant que l'exclusion des options méconnues pourrait se justifier dans une *perspective procédurale*, ce qui ramène le cœur de la querelle au seul niveau de l'épistémologie. C'est l'analyse de certains documents, comme l'avis de l'AFCN sur le programme national belge et la note de convergence sur l'optimisation qui a fait pencher notre jugement vers la différence de rationalités plutôt que vers une simple distorsion de rationalité dans le choix, confirmant ainsi notre intuition première.

11.3.2 Deuxième étape (Simon)

Ce constat étant posé, nous avons ensuite poussé plus loin l'application du cadre d'analyse de la rationalité de Simon, en distinguant le *sujet* de son *environnement* et en y définissant les *contraintes internes* et les *contraintes externes*. Les *contraintes internes* de l'*environnement* (i.e., *environnement interne*), nous dit Simon, peuvent résider dans la peau même du sujet comme les contraintes physiologiques auquel il serait soumis, par exemple. A nouveau, dans notre cas d'étude, le niveau de connaissance joue un rôle central dans la définition de l'*environnement interne*, c'est-à-dire

l'environnement qui définit l'espace du problème. En récusant le niveau de connaissance comme possible *circonstance existante*, l'AFCN semble vouloir s'affranchir des *contraintes internes* pour ne garder que les *contraintes externes*, à savoir les *facteurs socio-économiques*, comme définition de l'environnement (i.e., *environnement externe*). Pourtant, l'un ne peut exister sans l'autre, nous dit Simon, même si plusieurs *environnements internes* peuvent évoluer dans des *environnements externes similaires*, comme le fait qu'un oiseau et un avion volent tous deux dans les airs, par exemple. Cet ajustement du sujet ou du système intelligent à son milieu externe est l'ambition de la *rationalité substantive*, mais le sujet est limité par sa capacité cognitive ou opératoire à élaborer des comportements appropriés guidés par la *rationalité procédurale*. Les buts de l'adaptation de *l'environnement interne* à *l'environnement externe* sont définis par une *fonction d'utilité*. Dans ce formalisme, *l'environnement externe* du problème de conception du stockage géologique est bien commun aux deux acteurs institutionnels et réside dans les *facteurs socio-économiques*. En revanche, *l'environnement interne* intègre, pour l'ONDRAF, les résultats du programme de recherche, mais pas pour l'AFCN, pour qui seule la nécessité de trouver une solution sur le territoire national constitue une *contrainte interne*. En outre, l'ajustement de *l'environnement interne* à *l'environnement externe* a lieu pour l'AFCN par le biais d'une fonction d'utilité « sûreté à long terme » dont la variable est le choix de la roche hôte. Pour l'ONDRAF, la fonction d'utilité est remplacée par un *degré d'aspiration*, propre à la recherche de *satisficing*, exprimé, lui aussi, par rapport à la « sûreté long terme » mais dont la variable est le niveau d'incertitude relatif à la solution proposée.

Ce formalisme prodigué par Simon est un outil analytique puissant car il révèle que la divergence de vues entre l'ONDRAF et l'AFCN ne se résume pas à l'opposition entre d'une part, une *fonction d'utilité* et d'autre part, un *degré d'aspiration*, pour appréhender la sûreté. La théorie de Simon met en lumière une différence de *cadrage* du problème à l'examen tout en expliquant les raisons pour lesquelles les deux acteurs ont néanmoins le sentiment de développer un discours commun, leurs différences se dissimulant dans un second degré de théorisation du problème.

La question de la possibilité de trouver une roche hôte qui soit intrinsèquement plus sûre qu'une autre, problématique épistémologique, a

été maintes fois reportée en raison du foisonnement d'interrogations périphériques qu'elle a générée et que nous avons tenté de traiter une à une. Elle ne pouvait être plus longtemps différée et nous avons tenté d'y répondre en prenant le parti suggéré par l'AFCN, c'est-à-dire en procédant à une comparaison systématique des roches hôtes, par l'intermédiaire de l'outil multicritère recommandé par la CIPR. Bien que, dans notre développement théorique, nous ayons émis de nombreuses réserves à son endroit, nous avons voulu vérifier, en pratique, leur pertinence. En nous inspirant de nos précédents travaux menés à l'ONDRAF, nous avons analysé le développement et les résultats d'une analyse multicritère construite, comme souhaité par l'AFCN, autour de la notion d'attribut de sûreté et utilisant des critères déduits des guidances réglementaires. Cette analyse a révélé différents niveaux de subjectivité, tant dans l'attribution des scores que dans les facteurs de pondération. Les résultats de la comparaison n'ont pas révélé de différences flagrantes, compte tenu des incertitudes, à l'exception d'un type de roches peu étudié jusqu'ici, qui pourrait proposer une configuration de sûreté meilleure que la solution de référence de l'ONDRAF. Mais ce résultat doit s'apprécier à la mesure des plus grandes incertitudes qui entourent cette option et qui témoignent de la résilience de notre question épistémologique première : est-il possible de trouver une roche intrinsèquement meilleure sur le plan de la sûreté, à *niveau de connaissances égal* ? Remarquons que les enjeux éthiques ne sont jamais loin : à quel coût sociétal cette mise à niveau de la connaissance serait-elle acceptable ?

Pour prolonger la réflexion épistémologique, des *analyses de sensibilité*, visant à évaluer la robustesse du résultat final, ont été conduites, en favorisant *a priori* certains principes de sûreté par rapport à d'autres. Ces analyses ont révélé l'importance de la subjectivité du décideur, le résultat final – peu robuste – semblant toujours être piloté par la définition initiale des préférences. Cette subjectivité, qui semble prendre le pas sur l'existence objective d'une « meilleure » solution, est double. A côté de la subjectivité inhérente au jugement d'expert que nous avons baptisé *subjectivité épistémique*, nous en avons identifié une autre, qui réside en dehors de l'espace du problème, et que nous avons nommé *subjectivité psychologique*. Nous avons défini celle-ci comme recouvrant l'ensemble des facteurs implicites qui président aux choix et aux préférences, en dehors de la connaissance des données et qui pourrait donc être en lien, par exemple,

avec la perception de la situation ou avec une conception éthique ou morale préalable.

L'existence de la *subjectivité psychologique* mise en évidence par l'exercice de la comparaison des roches hôtes *via* l'outil multicritères a souligné une faiblesse, une question laissée en creux, que nous avons pressentie tout au long de notre recherche et à laquelle la théorie de Simon ne nous permettait pas de répondre. Quelle place donner aux valeurs morales de l'AFCN et l'ONDRAF dans le processus de décision ? Quel rôle jouent ces valeurs dans le choix d'un jugement *substantif* ou *procédural* ? Si les différences de vues ont pu être identifiées, leurs conditions d'existence circonscrites dans la doctrine internationale, leur expression formalisée par la théorie de la rationalité de Simon, les valeurs éthiques ou morales de l'ONDRAF et l'AFCN avaient, quant à elles, été laissées de côté jusqu'ici. Cet élément ne pouvait être plus longtemps ignoré vu la constante interaction de l'épistémologie et de l'éthique dans notre question de recherche et le contenu de la protection radiologique, hautement chargé, sur le plan éthique.

11.3.3 Troisième étape (Boudon)

Nous devons donc recourir à un cadre théorique complémentaire et ce, pour deux raisons. La première, évoquée à l'instant, était d'intégrer les valeurs morales des acteurs institutionnels dans l'explication de leurs divergences de vues. La seconde, plus subtile à nos yeux, allait conditionner la manière dont ce cadre completif, une fois trouvé, allait être utilisé. Les travaux de Simon auxquels nous avons fait appel étant concentrés sur l'optimisation et la rationalité y afférente, nous craignions l'influence de l'éthique inhérente à celle-ci. En effet, nous avons montré la dominante utilitariste du principe d'optimisation – du moins avant la transition du groupe critique vers la personne représentative – et il nous semblait possible que cet *habitus* vienne biaiser toute analyse des valeurs de l'ONDRAF et de l'AFCN, si ces acteurs étaient interrogés par rapport à la seule question de l'optimisation. Il nous fallait donc reprendre de la hauteur et par conséquent, repartir du concept de sûreté entendu *lato sensu*. Ce tournant dans notre réflexion a constitué une troisième étape, indépendante de la théorie de Simon. Nous avons eu recours à la théorie de la *rationalité ordinaire* de Boudon qui nous a permis

d'élargir la perspective instrumentale de la rationalité de Simon à une perspective axiologique (Boudon, 2007 ; Boudon, 2012).

Dans la théorie de la rationalité de Boudon, les croyances, les représentations et les valeurs des sujets propres à la *subjectivité psychologique* trouvent une place. Mais la théorie de la rationalité ordinaire offre un autre avantage. Elle est réellement complémentaire de la rationalité instrumentale (substantive ou procédurale) et elle nous a donc permis de poursuivre, sans rupture, notre entreprise de profilage de l'AFCN et de l'ONDRAF. Toutefois, il nous fallait chercher un matériel adéquat pour l'analyse. Nous l'avons trouvé dans la *Déclaration stratégique* de l'ONDRAF et la *Déclaration nationale de sûreté* de l'AFCN.

Avant d'entreprendre l'analyse de ces documents, dans une démarche qui sied à l'étude de cas, nous n'avons pas résisté à l'envie d'appliquer la théorie de la rationalité ordinaire aux notions de sûreté et d'optimisation radiologique, en utilisant la typologie des croyances, proposée par Boudon, en fonction de leur « système de raisons ». Cet exercice théorique nous a permis de souligner derechef la discontinuité entre la protection radiologique et la sûreté, une discontinuité passée sous silence par la CIPR. Le principe d'optimisation radiologique, fort du modèle LNT et en dépit des critiques faites à celui-ci, s'inscrit dans une rationalité instrumentale conséquentialiste, il constitue une croyance forte, indépendante du contexte, au même titre ou presque, qu'une vérité scientifique. En revanche, la sûreté apparaît, selon les critères de Boudon, comme une croyance faible qui se doit d'être négociée pour atteindre un consensus normatif. Si l'optimisation de la protection radiologique semble relever résolument de la théorie du choix rationnel (Simon), celle de la sûreté ressort de la théorie de la rationalité ordinaire (Boudon). La question de *l'optimisation de la sûreté* prend donc, à nouveau, un tour singulier, celui de se retrouver à l'intersection de deux rationalités.

L'analyse des documents stratégiques de l'ONDRAF et l'AFCN a requis un devoir d'investigation complémentaire sur le principe de « l'amélioration continue » de la sûreté, un concept disputé au sein même du cénacle des régulateurs et que, pourtant, l'ONDRAF et l'AFCN partagent. Ce principe pose la question du « suffisamment sûr » et semble constituer une condition

nécessaire au principe SAHARA qui ne peut dissimuler sa filiation avec le principe ALARA.

Pour l'AFCN, nous avons examiné deux éditions de la *Déclaration nationale de sûreté*, de 2017 et 2018, car elles sont toutes deux référencées sur le site web de l'agence et l'analyse de leurs différences permet de refléter la tension existant entre certains principes de sûreté en même temps qu'elle confronte, pensons-nous, la vision plus intime du régulateur à celle, plus policée, du gouvernement. Les deux textes reflètent une vision centrifuge de la sûreté construite autour de la protection radiologique avec, en son cœur, le principe d'optimisation comme premier principe. Si l'utilitarisme domine dans l'optimisation, c'est l'éthique de la vertu qui est habituellement associée au principe de justification et l'éthique déontologique au principe de limites de doses. La *Déclaration nationale de sûreté* reflète donc une tendance utilitariste forte augmentée de la valeur de prudence et d'une éthique de la vertu.

La *Déclaration stratégique* de l'ONDRAF révèle que l'Organisme s'appuie sur le principe de *précaution* et sur le développement de solutions *durables*. Cette vision, sans rien concéder en matière de sûreté, cherche à réaliser un équilibre avec les impératifs de faisabilité, d'équité et d'acceptabilité. L'analyse du document s'est révélée moins fertile que pour celui de l'AFCN et a exigé une mise en perspective de ce que l'ONDRAF pouvait réellement entendre par le concept de *durabilité*. L'ONDRAF souscrit au principe de *protection des générations futures* dans sa formulation la plus ambitieuse, à savoir éviter le report de charges *indues* ou *excessives* sur lesdites générations. Nous avons donc analysé la volonté de l'ONDRAF de prendre une décision *sans délai* pour l'enfouissement de déchets radioactifs ainsi que sa position relativement à la notion de *réversibilité*, que l'ONDRAF entend limiter à la seule phase opérationnelle du stockage. Nous avons mis en évidence la prééminence, pour l'ONDRAF, de la préservation des intérêts vitaux sur l'autonomie laissée aux générations futures avec, également, la prise en considération d'une équité intragénérationnelle résultant d'une préoccupation spatiale liée au choix du site d'enfouissement. En prolongeant la conception du développement durable héritière du rapport Brundtland, nous concluons que l'ONDRAF semble répondre au courant du *suffisantisme*, après avoir pris le soin d'écarter la possibilité, pour l'Organisme, de défendre

la notion de durabilité en se créditant d'un autre courant éthique, comme l'utilitarisme ou l'égalitarisme rawlsien. L'objection de non *cléronomie* du *suffisantisme* n'est pas fatale à l'attribution de cette position éthique à l'ONDRAF car, en dépit de sa mission de régler le tribut lié à l'*héritage* nucléaire des générations précédentes, le *suffisantisme* que nous lui associons est bien celui du rapport Brundtland, *modérément cléronomique* (Gosseries, 2016), qui ne rend pas incompatible ce courant de pensée avec la posture d'exécuteur testamentaire de l'ONDRAF.

Ayant pris suffisamment de distance et, afin d'approfondir les différences de positions éthiques de l'ONDRAF et de l'AFCN, il nous a semblé légitime de confronter à nouveau ces deux acteurs sur le terrain de l'application du principe de l'optimisation au choix de la roche hôte, mais sur le plan de l'équité intergénérationnelle. Pour ce faire, deux scénarios représentatifs des institutions ont été considérés : l'enfouissement sans délai des déchets radioactifs dans une argile peu indurée suffisamment connue (ONDRAF) et la recherche d'une autre roche hôte, encore inconnue et éventuellement intrinsèquement meilleure (nous avons supposé qu'elle existât), avant de procéder à l'enfouissement (AFCN). L'analyse révèle qu'aucun scénario ne peut satisfaire simultanément toutes les exigences associées aux principes éthiques de bien-être, d'autonomie et de justice ; ce sont des *conflits internes*. En outre, aucune option n'est satisfaisante sur toute la durée du processus ; c'est un *conflit temporel*. Les conflits internes peuvent être levés en introduisant une règle de priorité, à la différence des conflits temporels qui subsistent quoi que l'on fasse. Le scénario porté par l'AFCN ne porte ses fruits, en matière de sûreté à long terme, qu'au-delà d'un horizon relativement lointain, situé dans la phase d'après fermeture du stockage alors que le scénario porté par l'ONDRAF est plus avantageux jusqu'à cet instant. La maximisation de la sûreté sur le très long terme, éventuellement au préjudice des générations futures plus proches, ne peut s'envisager que dans une perspective utilitariste. Cette analyse renforce donc la posture utilitariste de l'AFCN sous la réserve néanmoins que le préjudice aux générations proches ne soit pas un préjudice affectant directement leurs intérêts vitaux mais uniquement leurs opportunités de bien-être, sans quoi le régulateur serait frappé d'une intenable contradiction : privilégier la sûreté de générations lointaines hypothétiques au détriment de celles des générations présentes !

Cette analyse, par l'outil analytique des matrices éthiques, révèle une nouvelle fois un second degré dans la théorisation du problème de la divergence de vues entre l'ONDRAF et l'AFCN. Certes, la préoccupation de préservations des intérêts vitaux des générations présentes et à venir est partagée par les deux institutions, mais selon des modalités différentes. En effet, nous avons pu montrer que, pour l'AFCN, la préservation des intérêts vitaux est plus importante que les opportunités de bien-être des générations actuelles alors que pour l'ONDRAF, la préservation des intérêts vitaux est plus importante que les opportunités de choix laissées aux générations futures. Il n'y a donc pas d'opposition directe mais seulement un glissement de plan.

Il en va de même de la conception de l'équité intergénérationnelle, une préoccupation partagée par les deux institutions. A l'exception de ce qui relève uniquement de la sûreté, nous avons montré que la conception de l'équité intergénérationnelle n'inclut les générations présentes que pour l'ONDRAF, l'AFCN défendant l'idée que les générations nanties des bénéfices de l'ère nucléaire paient un tribut plus lourd que celles qui leur succèdent.

Le tableau 10-10 résume les résultats de notre recherche, en juxtaposant les différences observées entre les deux institutions, dont nous venons de rappeler les différentes composantes. L'intérêt d'une présentation synoptique est de souligner l'absence d'opposition réelle entre l'ONDRAF et l'AFCN et surtout de mettre en évidence une série de décalages dans la pensée, qu'ils relèvent de la rationalité instrumentale ou qu'ils soient axiologiques. Les difficultés soulevées par l'application de l'optimisation de la roche hôte trouvent une explication à la fois au niveau où le problème s'est initialement posé mais aussi au niveau supérieur qui l'englobe, celui de la conception de la sûreté. Cette dernière, sans surprise à la lumière de notre développement, a requis une investigation d'ordre éthique, conduite au niveau des valeurs des deux institutions, pour livrer quelques réponses.

D'aucuns s'étonneront de ne pas retrouver, dans le tableau récapitulatif, la composante du *catastrophisme* évoqué à l'endroit des scénarios pénalisants, en réponse à la question de la *preuve d'innocuité* comme démonstration de la sûreté ni celle de la critique de la *précaution*, que nous lui avons opposée. Nous avons considéré que l'interprétation catastrophiste du scénario pénalisant était incluse dans la valeur de *prudence* qu'elle venait renforcer,

dans le chef de l'AFCN. La *précaution*, bien que présente dans le *Mission statement* de l'ONDRAF, n'est pas exploitée dans sa *Déclaration stratégique* et nous avons donc préféré considérer la *durabilité* des solutions plutôt que l'esprit de *précaution* comme représentative de la *focale* de l'ONDRAF. Ces raisons s'ajoutent au fait que tant le *catastrophisme* que la *précaution* ont été mobilisés afin d'analyser le concept de sûreté, dans une entreprise plus épistémologique qu'éthique et qu'il nous semblait dès lors artificiel de tenter de « récupérer » ces notions dans le cadre théorique de la *rationalité ordinaire* sans leur avoir consacré une réflexion dédiée sur le plan éthique. Nous reconnaissons le côté discutable de ce choix.

11.4 Epilogue

Nous n'avons évidemment pas répondu à toutes les questions et celles auxquelles nous avons apporté des éléments de réponse n'ont pas été épuisées par notre réflexion.

Ainsi, par exemple, nous avons laissé de côté la discussion d'indices socio-politiques que nous avons pourtant identifiés dans l'analyse transversale des avis de l'AFCN (voir section 10.2.6). Les divergences de vues de l'ONDRAF et de l'AFCN trouvent probablement, aussi, des explications dans leurs différences de postures institutionnelles. L'analyse de cette dimension aurait très certainement éclairé notre propos.

L'étude des scénarios pénalisants aurait pu constituer une étude de cas en elle-même, mobilisant son propre cadre d'analyse – *catastrophisme* et *précaution* –, et venir compléter la fiche signalétique de nos acteurs. Nous avons préféré limiter nos réflexions à ce sujet à l'analyse de la sûreté, bien que nous reconnaissions à cette problématique le mérite d'une réflexion dédiée.

Quant à la question épistémologique première, relative à la possibilité de trouver *a priori* une roche hôte intrinsèquement meilleure qu'une autre (déjà bonne) sur le plan de la sûreté, elle demeure semi-ouverte. Nous pensons avoir montré que les outils utilisés ont été impuissants à y répondre. Par l'analyse multicritère, il ne semble pas possible de démontrer, *a priori*, qu'une telle roche existe, sans se voir happer par les incertitudes ou la

subjectivité des préférences initiales. Quand bien même nous pourrions conclure à l'impossibilité de répondre à cette question par le biais des outils mis à notre disposition, nous n'avons pas fourni de réponse formelle, générale et définitive. Notre recherche a simplement instillé le doute.

Cependant, l'objectif de nos travaux n'était pas de statuer sur le bien-fondé de cette épineuse question, mais de s'en servir pour découvrir les raisons implicites, non dites voire non conscientes, des divergences de vues entre l'ONDRAF et l'AFCN. En révélant l'implicite, nous avons avant tout dénoncé un certain manque de rigueur dans la doctrine internationale de sûreté ou, à tout le moins, des lacunes de justification. Ces manquements constituent l'extériorité du désaccord auxquels s'ajoute la *subjectivité psychologique* des acteurs, comme facteur interne. En reprenant le formalisme de Simon mais, cette fois, en l'abstrayant de la question spécifique de la roche hôte, nous pourrions sans doute dire, que, dans *l'environnement externe* que constitue la doctrine de la sûreté et la protection radiologique, les *environnements internes* de l'ONDRAF et l'AFCN s'ajustent différemment. Cet ajustement est gros de tous les présupposés et valeurs des sujets que jamais une *fonction d'utilité* ne pourra décrire.

Enfin, nous espérons également avoir illustré comment une démarche d'analyse philosophique pouvait compléter l'approche classique de l'ingénieur. Lorsqu'une question complexe est posée, l'ingénieur universitaire ne cherche certes pas à trouver une réponse immédiate, mais il tente d'abstraire le problème, pour développer une théorie plus générale qui permettra, ensuite, de fournir – en toute rigueur – la solution particulière au problème initial. Toutefois, cette abstraction ne s'accompagne pas toujours ni de la problématisation ni de la démarche réflexive chères au philosophe. Dans notre cas d'étude, la question posée par l'application du principe d'optimisation au choix de la roche hôte a bel et bien suscité, au niveau de l'ONDRAF et l'AFCN, une réflexion sur le principe d'optimisation (note de convergence), mais pas sur l'ensemble des éléments sous-jacents que la problématisation, entreprise dans une démarche plus épistémologique, a pu révéler. Une réflexion sur le mode de pensée lui-même était également absente.

C'est néanmoins avec la naïveté de l'ingénieur, « orienté solution », que nous concluons cette thèse en espérant que cette recherche permettra de

dégager des pistes de résolution du différend. Concrètement, nous pourrions, par exemple, suggérer à l'AFCN et à l'ONDRAF d'unir leurs efforts, au sein des différentes commissions (i.e. CIPR, AIEA, AEN), à leurs niveaux d'intervention respectifs, afin clarifier la doctrine internationale relative à l'optimisation de la sûreté et de la protection radiologique. Nous pensons également que la différence de rationalité, mise en évidence par notre recherche, pourrait être revisitée afin de circonscrire la part de celle-ci qui incombe réellement aux positions institutionnelles et celle qui, éventuellement, pourrait être réduite grâce à un partage des mécanismes de raisonnement et des valeurs éthiques auxquels ces deux acteurs sont attachés. Enfin, la résolution de l'étude de cas, particulièrement revêche, pourrait être coconstruite sans pour autant affecter le devoir d'indépendance des deux institutions. En effet, l'exercice étant théorique, à ce stade du développement du programme belge, il se prête à la mise à l'épreuve tant des méthodes de résolution de l'ONDRAF que des consignes données par l'AFCN. Un « jeu sérieux » procédant à une inversion des rôles pourrait être, à cet égard, révélateur des obstacles érigés dans la subjectivité et la rigidité des postures mais aussi, le cas échéant, de la part d'indétermination de la solution sur un plan théorique. Quoi qu'il en soit, nous pensons que les recommandations qui pourraient être émises sur la base de ces quelques pistes requièrent les deux acteurs autour de la table.

*

Annexes

Les annexes sont consignées dans le **volume II** de cette thèse.

Elles sont à diffusion limitée et ne sont disponibles qu'après demande expresse, faite à l'auteur de cette thèse, par l'intermédiaire de la Faculté de philosophie de l'UCL.

Les références versées dans les annexes et leurs appels correspondants dans le texte sont mentionnés avec un astérisque *.

Références

*Remarque : les publications de l'ONDRAF suivent différentes règles de référencement selon leur nature. Les **notes et rapports de mission** de l'ONDRAF sont référencées par leurs auteurs, comme des articles scientifiques. En ce qui concerne les **rapports** de l'ONDRAF, l'appel à référence dans le texte se fait par (ONDRAF, année) et les auteurs sont mentionnés dans la présente bibliographie sauf lorsqu'il s'agit d'un grand collectif d'écriture (e.g. Waste Plan ; Rapport d'activités ; Research, Development and Demonstration Plan). Enfin, les **courriers** et les **procès-verbaux** de réunions suivent la convention de référencement des rapports.*

*Les références marquées d'une * sont jointes dans le volume de la thèse réservé aux annexes (documents à diffusion limitée).*

(Aerts *et al.*, 2010) Aerts N., Bauwens M., Catteeuw I., Dockx M., Kuijken E., Neuteleers C., Rega J., Vandenhove H., Van Echelpoel E., Verhaegen K., Verheyen W., Versieren J., Wauters E. et Resource Analysis – Technum – Tractebel Engineering NV, « Strategic Environmental Assessment (SEA) pour le Plan Déchets de l'ONDRAF », Rapport principal n° 5249-506-073, version 05, 2 juin 2010.

(Aertsens *et al.*, 2005) Aertsens M., Dierckx A., Put M., Moors H., Janssen K., Van Ravestyn L., Van Gompel M. et De Cannière P., « Determination of the hydraulic conductivity, the product ηR of the porosity η and the retardation factor R , and the apparent diffusion coefficient D_p on Boom Clay cores from the Mol-1 drilling », SCK CEN, Mol, Report R-3503, 2005.

(Aït Abderrahim, 2013) Aït Abderrahim H., « Systèmes nucléaires avancés du futur et le rôle de MYRRHA comme installation de transmutation des déchets », Revue Générale Nucléaire (RGN) n°3, pp. 58-65, Mai-Juin 2013.

(ANDRA, 2005), ANDRA, « Dossier 2005 Argile, Tome Evaluation de sûreté du stockage géologique », Coll. Les Rapports, Juin 2005.

(AFCN, 2009a) Mertens J., « Near surface disposal, on Belgian territory, of short-lived low and intermediate level radioactive waste. “Earthquakes” guidance ». Note AFCN N°007-125-N, rev.4 (courtesy translation), 17 décembre 2009.

(AFCN, 2009b) AFCN, « Guide technique dépôt géologique (déchets de type B&C) », Note draft, AFCN, Bruxelles, 2009.

(AFCN, 2011a) AFCN, « Avis de l’AFCN sur le Projet de Plan Déchets et sur le SEA qui lui est associé », Note n° 010-149-F, Bruxelles, 2 février 2011.

(AFCN, 2011b) AFCN, « Guide technique “Critères de Radioprotection pour la sûreté post-opérationnelle” », Note externe n°2011-06-28-CAD-5-4-3-FR (rév. 2011-08-23), Bruxelles, 2011.

(AFCN, 2011c*) AFCN, « Guide Technique Dépôt Géologique (guidance SR 3) », annexe du procès-verbal n°2011-07-01-FB-5-6-3-FR, Bruxelles, 2011.

(AFCN, 2011d) AFCN, « Rapport de réunion externe Note convergence optimisation – Circonstances existantes – Méthodologie sélection roche hôte », Note N° 2011-07-01-FB-5-4-6-FR, Bruxelles, 29 juin 2011.

(AFCN, 2011e) AFCN, « Discussion de l’application du principe d’optimisation dans le cadre du développement et de l’implémentation des dépôts géologiques », Réunion bilatérale du 22 mars 2011, Addendum 11, Rapport n°2011-03-31-FB-5-6-2-FR, Bruxelles, 2011.

(AFCN, 2012a) AFCN, « Guide technique “Critères de Radioprotection pour l’évaluation de la sûreté post-fermeture des dépôts de déchets radioactifs” », Note externe n°2011-06-28-CAD-5-4-3-FR (rév. 2012-04-24), Bruxelles, 2012.

(AFCN, 2012b) AFCN, « Projet de Guide technique “Analyse de La Sûreté Post-Fermeture Des Établissements de Stockage Définitif de Déchets Radioactifs” », Note AFCN n°2012-02-28-FLE-5-4-4-FR (rév. 0), Bruxelles, 2012.

(AFCN, 2012c) AFCN, « Acceptabilité des expositions potentielles dues à des événements initiateurs d'origine externe ou interne visant des établissements de dépôt de déchets radioactifs », Note AFCN n°2012-06-21-JPW-5-4-5-FR, Bruxelles, 2012.

(AFCN, 2013a) AFCN, « Avis de l'AFCN sur le "Référentiel pour la gestion à long terme des déchets radioactifs" », lettre de Jan Bens et Manfred Schrauben à Jean-Paul Minon, réf. 2013-08-30-GVO-5-1-001-NL, Bruxelles, 30 août 2013.

(AFCN, 2013b) Depaus C., Capouet M., Bernier F., Volckaert G., « Note de convergence optimisation », Note externe n°2013-12-18-FB-5-4-7-FR, 18 décembre 2013.

(AFCN, 2013c) AFCN, « Rapport de réunion externe du 27/06/2013 Principes d'examen / Optimisation, n°2013-07-04-FB-5-4-6-FR avec Annexe 1 : "Optimisation & flexibility. AFCN proposal (including ONDRAF comments)" », 5 juillet 2013.

(AFCN, 2013d) AFCN, « Prescriptions de sûreté pour les établissements de stockage définitif de déchets radioactifs », Note AFCN n°2012-12-12-LB-4-4-01-FR, 8 janvier 2013.

(AFCN, 2013e) AFCN, « Scénarios pénalisants. Optimisation », Rapport de réunion externe n°2013-07-04-FB-5-4-4-FR, 12 mars 2013.

(AFCN, 2014a) AFCN, « Note de positionnement de l'AFCN relative au stockage géologique et à la gestion à long terme des déchets B&C dans le cadre de l'établissement des politiques nationales et du programme national », lettre de Jan Bens à Jean-Paul Minon, réf. 2014-12-09-FB-5-1-2-FR, 9 décembre 2014.

(AFCN, 2014b) AFCN, « Guide de sûreté des stockages définitifs géologiques v.0 (guide intégré) », annexe du procès-verbal n°2015-02-17-FB-5-4-3-FR, 2014.

(AFCN, 2014c) AFCN, « Projet de Guide technique "Analyse de La Sûreté Post-Fermeture Des Établissements de Stockage Définitif de Déchets Radioactifs" », Note AFCN n°2012-02-28-FLE-5-4-4-FR (rév. 1), 2014.

(AFCN, 2015a) AFCN, « Avis de l'AFCN sur le Programme National dans sa version du 10 avril 2015 », Note réf. 2015-04-29-AW-5-4-1-FR, 2015, 7 mai 2015.

(AFCN, 2015b) AFCN, « Avis de l'AFCN sur le "Référentiel pour la gestion à long terme des déchets radioactifs" », lettre de Jan Bens à Jean-Paul Minon, réf. 2015-03-04-AW-5-1-1-NL-NL, 5 mars 2015.

(AFCN, 2016*) AFCN, « Referentiescenario voor de conservatieve bepaling van de kosten voor een geologische berging », lettre de Jan Bens à Luc Dufresne, Président de la Commission des Provisions Nucléaires (CPN), réf. 2016-05-12-GVO-5-1-4-NL, 13 mai 2016.

(AFCN, 2017a) AFCN, « Déclaration nationale sur la sûreté et la sécurité nucléaire 2017 », AFCN, 2017. [En ligne]. Disponible sur : <https://afcn.fgov.be/fr/system/files/declaration-nationale-surete-securite-nucleaire-2017-fr.pdf>. [Consulté le 30 avril 2021].

(AFCN, 2017b) AFCN, « Guide technique : Critères de Radioprotection pour l'évaluation de la sûreté post-fermeture des dépôts de déchets radioactifs en surface », n°2011-06-28-CAD-5-4-3-FR (rév. 2017-07-21), 2017.

(AFCN, 2017c*) AFCN, « Arrêté royal complétant l'arrêté royal du 30 novembre 2011 portant prescriptions de sûreté des installations nucléaires pour ce qui concerne les établissements de stockage de déchets radioactifs. Projet. », version du 24 mars 2017, 2017.

(AFCN, 2018a) AFCN, « Sûreté et sécurité : deux termes à distinguer », AFCN, 2018. Disponible sur : <https://afcn.be/fr/dossiers-dinformation/le-transport-de-matieres-radioactives/surete-et-securite-du-transport-de-4>, mis à jour le 26 janvier 2018. [Consulté le 4 août 2021].

(AFCN, 2018b) AFCN, « 31/08/2018 Déclaration Nationale sur la Sûreté Nucléaire, la Sécurité Nucléaire et la Radioprotection », Moniteur belge du 12 octobre 2018, AFCN base de données Jurion, 2018. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.jurion.fanc.fgov.be/jurdb-consult/consultatieLink?wettekstId=26808&date=30-04-2021&appLang=fr&wettekstLang=fr>. [Consulté le 30 avril 2021].

(AFCN, 2020) Bernier F., Govers K., Maudoux J., De Clercq O., Lemy F., Detilleux V. et Mertens J., « Avis de l'AFCN sur le plan de gestion à long terme des déchets radioactifs conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie, le rapport d'incidences sur l'environnement qui l'accompagne et le résumé non technique », Note AFCN n°2020-05-29-FB-5-4-1, 11 juin 2020.

(AFCN/ONDRAF, 2013) AFCN/ONDRAF, « Protocole entre l'Agence fédérale de Contrôle nucléaire (AFCN) et l'Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies (ONDRAF) », Bruxelles, 1^{er} octobre 2003.

(AFCN/ONDRAF, 2020) AFCN/ONDRAF, « Werkprogramma 2020-2022 in het kader van de samenwerkingsovereenkomst FANC-NIRAS », Brussel, 10 juni 2020.

(Alexandre, 1997) Alexandre D., « Conditionnement des déchets nucléaires », dans *Les Déchets Nucléaires, un dossier scientifique*, Société Française de Physique, Les éditions de Physique, France, pp. 181-202, 1997.

(Allègre, 1997) Allègre M., « La gestion des déchets radioactifs » dans *Les Déchets Nucléaires, un dossier scientifique*, Société Française de Physique, Les éditions de Physique, France, pp. 171-179, 1997.

(Allemand, 2002) Allemand S., « Les paradoxes d'une "société du risque" », *Sciences Humaines*, n°124, pp. 24-27, février 2002.

(ANDRA, 2005), ANDRA, « Evaluation de sûreté du stockage géologique », dans *Dossier 2005 Argile*, Coll. Les Rapports, Juin 2005.

(Arnsperger et Van Parijs, 2003) Arnsperger C. et Van Parijs P., « Ethique économique et sociale », Coll. Repères, Ed. La Découverte, Paris, 2003.

(ASN, 2008) Autorité de Sûreté nucléaire, « Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde », France, Indice 0, version du 12 février 2008.

(Asveld et Roeser, 2009) Asveld L. et Roeser S. (eds.), *The ethics of technological risk*, London, Earthscan, 2009.

(Avizienis *et al.*, 2001) Avizienis A., Vytautas U., Laprie, J.-C. et Randell B. « Fundamental Concepts of Dependability », *Researchgate*, 2001. [En ligne]. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/2403425_Fundamental_Concepts_of_Dependability. [Consulté le 5 août 2021].

(Bachelard [1934] 1999) Bachelard G., *La formation de l'esprit scientifique*, Vrin, Paris, (1934 pour la 1^{ère} édition), 1999.

(Baier, 1973) Baier A., « The Rights of Past and Future Persons », *Symposium at the Eastern Meeting of the American Philosophical Association*, 28 December 1973.

(Barbey *et al.*, 2013) Barbey P., Josset M., Pigrée G. et Boilley D., « Implication citoyenne et point de vue de l'association ACRO sur la gestion des déchets radioactifs », *Journées de la Société française de Radioprotection /Section Environnement*, octobre 2013.

(Barry, 1997) Barry B., « Sustainability and Intergenerational Justice », *Theoria* 45 (89) in *A Journal of Social and Political Theory, Poverty, Justice and the Economy*, 1997, pp. 43-65.

(Barthe, 2002) Barthe Y., « Rendre discutable. Le traitement politique d'un héritage technologique », dans *Politix, Démocratie et délibération*, vol. 15, n°57, pp. 57-78, Premier trimestre 2002.

(Baudinet, 1993) Baudinet M., « Introduction à l'Informatique. Approche algorithmique de la programmation », MATH 305, Ecole Polytechnique – Université Libre de Bruxelles, année académique 1992-1993.

(Beauchamp et Childress, 2001) Beauchamp T. et Childress J., *Principles of biomedical ethics*, New York: Oxford University Press, 2001.

(Beck, [1986] 2001) Beck U., *La société du risque*, Ed. Flammarion, Paris, 1^{ère} édition 1986, 2001.

(Becker, 2005) Becker L. C., « Reciprocity, Justice, and Disability », *Ethics*, 116, pp. 9-39, October 2005.

(Bel V, 2019) Bel V, « Preliminary results of Bel V review of ONDRAF/NIRAS report NIROND-TR 2017-25 F 'Analyse des attributs de sûreté des potentielles roches hôtes pour un stockage géologique des déchets B&C (version 1.0)' », 4 novembre 2019.

(Belga, 2017) Agence Belga, « Ecolo réclame une étude alternative à l'enfouissement des déchets nucléaires dans l'argile », *RTBF*, 19 janvier 2017. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.rtbf.be/article/ecolo-reclame-une-etude-alternative-a-l-enfouissement-des-dechets-nucleaires-dans-l-argile-9507088>. [Consulté le 5 mai 2022].

(Belga, 2018) Agence Belga, « L'ONDRAF propose un "enfouissement passif" des déchets nucléaires, Jean-Marc Nollet s'insurge », *RTBF*, 9 février 2018 à 21 :55. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.rtbf.be/article/l-ondraf-propose-un-enfouissement-passif-des-dechets-nucleaires-jean-marc-nollet-s-insurge-9835938?id=9835938>. [Consulté le 4 décembre 2019].

(Ben Mena, 2000) Ben Mena S., « Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision », *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **4** (2), pp. 83–93, 2000.

(Berthet *et al.*, 1992) Berthet A., Boussard P., Lochard J., Brissaud A., Rollin Ph. et Lefauve C., « Valeurs de référence de l'unité de dose collective professionnelle pour la mise en œuvre de la politique "ALARA" dans les centrales nucléaires d'Electricité de France », *Radioprotection*, vol. 27, n°4, pp. 411-421, 1992.

(Bernier *et al.*, 2017) Bernier F., Lemy F., De Cannière P. et Detilleux V. « Implications of Safety Requirements for the Treatment of THMC Processes in Geological Disposal Systems for Radioactive Waste », *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Volume 9, Issue 3, pp. 428-434., 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.04.001>

(Blue Ribbon Commission, 2012) Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, « Report to the Secretary of Energy », January 2012.

(Boisson, 1996a) Boisson J.-Y., « Caractérisation d'une formation argileuse. Etudes des transferts au laboratoire à partir des argilites du tunnel de Tournemire », DPPE/SERGD, Report 96/06, 1996.

(Boisson, 1996b) Boisson J.-Y., « Caractérisation d'une formation argileuse. Caractérisations hydrogéologiques in situ des argilites du Tunnel de Tournemire », DPPE/SERGD, Report 96/11, 1996.

(Bolado *et al.*, 2009) Bolado R., Badea A. et Poole M., « EC - PAMINA Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the development of the Safety Case, Review of expert judgment methods for assigning PDFs milestone (n°M2.2.A.3) », 2009.

(Bonin, 2012) Bonin B., « Le nucléaire expliqué par des Physiciens », EDP Sciences, Paris, 2012.

(Boucher, 2004) Boucher P., « Aspects du calcul des risques chez Leibniz [Le traitement juridique de la question du risque chez Leibniz et ses présupposés philosophiques] », *Revue juridique de l'Ouest*, 2004/3. 2004. pp. 297-319. <https://doi.org/10.3406/juro.2004.2781>

(Boudon, 1999) Boudon R., « La "rationalité axiologique" : une notion essentielle pour l'analyse des phénomènes normatifs ». *Sociologie et sociétés*, 31(1), pp. 103–117, 1999. <https://doi.org/10.7202/001082ar>

(Boudon, 2007) Boudon R., « Essais sur la théorie générale de la rationalité », Presses universitaires de France, Coll. Quadrige, Paris, 2007.

(Boudon, 2012) Boudon R., « La rationalité », Presses universitaires de France, Coll. Quadrige, Paris, 2012.

(Boussaïd, 2013) Boussaïd I., « Perfectionnement de métaheuristiques pour l'optimisation continue ». Thèse de doctorat. Université Paris-Est, 2013.

(Burton *et al.*, 1968) Burton I., Kates R. et White G., « The human ecology of extreme geophysical events », Working Paper n°1, University of Toronto, Toronto, 1968.

(Brassinnes, 2007a) Brassinnes S., « Description of the evaporitic rocks of Belgium », Note ONDRAF/NIRAS n°2007-1403, 2007.

(Brassinnes, 2007b) Brassinnes S., « Description of the crystalline rocks occurring in Belgium », Note ONDRAF/NIRAS n°2007-1405, 2007.

(Brassinnes, 2010) Brassinnes S., « Assessment of the schists as potential host formations for high-level and/or long-lived radioactive waste disposal in Belgium – a desk study », Note ONDRAF/NIRAS n° 2010-0898, 2010.

(Buch *et al.*, 1994) Buch P., Mund E. et Vandelinden J., « Aux origines de l'effort nucléaire belge », *Un demi-siècle de nucléaire en Belgique – Témoignages*, Belgian Nuclear Society, pp. 21-52, 1994.

(Buchanan A., 1990) Buchanan A., « Justice as Reciprocity versus Subject-Centered Justice » *Philosophy & Public Affairs*, JSTOR, vol. 19, no. 3, 1990, pp. 227-252. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.jstor.org/stable/2265395>. [Consulté le 7 juillet 2022].

(Buchanan N.H., 2009) Buchanan N.H., « What Do We Owe Future Generations? », *The George Washington Law Review*, vol. 77, No. 5/6, pp. 1237 -1297, September 2009.

(Bultynck et Dejonghe, 2001) Bultynck P. et Dejonghe L., « Dévonien lithostratigraphic units (Belgium) ». *Geologica Belgica* 4 (1-2), pp. 39-69. 2001.

(Callahan, 1980) Callahan D., « What Obligations Do We Have to Future Generations? », dans *Responsibilities to Future Generations: Environmental Ethics*, Partridge, E., New York, Buffalo, 1980.

(Callon *et al.*, 2001) Callon M., Lascoumes P. et Barthe Y., « Agir dans un monde incertain. Essai sur la démocratie technique », Ed. Seuil, Paris, 2001.

(Canto-Sperber, [1996] 2017), Canto-Sperber M., « Dictionnaire d'éthique et de philosophie morale », Ed. Quadriga, Presses universitaires de France, Paris, 2017.

(Cantone, 2008) Cantone M-C, « A reflection on ethical basis in the principles of radiological protection », *Ethics and radiological protection*, Eggermont G. and Feltz B. (eds), Academia Bruylant, Collection Science, éthique et société de l'Institut Supérieur de Philosophie de l'Université Catholique de Louvain, 2008.

(Cassin, 2019) Cassin B. (Dir. d'éd.), « Vocabulaire européen des Philosophies », *Le Dictionnaire des Intraduisibles*, Editions du Seuil/Dictionnaires Le Robert, 2019.

(Cavedon, 2012) Cavedon J-M., « Les effets des rayonnements sur le vivant », *Le nucléaire expliqué par des Physiciens*, Bonin B., EDP Sciences, Paris, pp. 29-50, 2012.

(CERRIE, 2004) Goodhead D., Bramhall R., Busby C., Cox R., Darby S., Day P., Harrison J., Muirhead C., Roche P., Simmons J., Wakeford R., Wright E., Report of the Committee Examining Radiation Risks of Internal Emitters (CERRIE). Committee Examining Radiation Risks of Internal Emitters, London, October 2004, www.cerrie.org, ISBN 0-85951-545-1.

(Chafik) Chafik A., « Sûreté de fonctionnement ». Support de cours. Université de Batna 2 (Algérie). Département informatique. Non daté.

(Chambre des représentants, 1993) Chambre des représentants, « Résolution 541/9-91/92 relative à l'utilisation de combustibles contenant du plutonium et de l'uranium dans les centrales nucléaires belges, ainsi qu'à l'opportunité du retraitement des barres de combustibles », adoptée le 22 décembre 1993.

(Chambre des représentants, 2011) Chambre des représentants, « Note de politique générale (Intérieur) », Doc 53 1964/(2011/2012), p. 46, 30 décembre 2011.

(Chambre des représentants, 2012) Chambre des représentants, « Justification générale du budget général des dépenses pour l'année budgétaire 2013 par le SPF Économie », Doc 53 2523/018, p. 55, 17 décembre 2012.

(Chanut *et al.*, 2011) Chanut V., Guibert N., Rojot J. et Dubois P., « Les limites de la rationalité limitée ? Un essai de réflexion en sciences de gestion », *Management & Avenir*, 8(8), pp. 97-117, 2011. <https://doi.org/10.3917/mav.048.0097>.

(Chapman et Hooper, 2012) Chapman N.A. et Hooper A., « The disposal of radioactive waste underground », *Proceedings of the Geologists Association* 123(1), pp. 46-63. 2012.

(Chateauraynaud et Torny, 1999) Chateauraynaud F. et Torny D., *Les Sombres précurseurs, une sociologie pragmatique de l'alerte et du risque*, Éditions de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales, Paris, 1999.

(Chossat *et al.* [2001] 2012) Chossat M. et Privat Y., *Aide-mémoire de mathématiques de l'ingénieur*, Dunod, 3^e édition, Paris, 2012.

(Clarke, 2003) Clarke R.H., « Changing philosophy in ICRP: the evolution of protection ethics and principles », *International Journal of Low Radiation*, vol. 1, Issue 1, pp. 39-49. 2003.

(CNSC, 2013) Canada Nuclear Safety Commission, *Linear-Non-Threshold Model*, fact sheet, April 2013.

(Colin, 1989) Colin J.P., *Dictionnaire des Difficultés du français*, Dictionnaires Le Robert, Paris, 1989.

(Conseil des ministres, 1998a) Conseil des ministres, « Mise en œuvre de la résolution de la Chambre des Représentants, relative à l'utilisation de combustibles contenant du plutonium et de l'uranium dans les centrales nucléaires belges, ainsi qu'à l'opportunité de retraitement des barres de combustible », *Compte-rendu de la séance du 4 décembre 1998*, 1992A74770.042, 1998.

(Conseil des ministres, 1998b) Conseil des ministres, « Gestion à long terme des déchets radioactifs de faible activité », *Séance du 16 janvier 1998*, 98A40450.039, 1998.

(Conseil des ministres, 2006) Ministerraad, « Berging van radioactief afval (categorie A) », *Vergadering van 23 juni 2006*, 2006A42450.020, 2006.

(Conseil d'Etat, 2008) Conseil d'Etat, Principes de technique législative. Guide de rédaction des textes législatifs et réglementaires, 2008.

(Comte-Sponville, [2001] 2013) Comte-Sponville A., « Dictionnaire philosophique », Presses universitaires de France, 1^{ère} édition 2001, 4^e édition « Quadrige », 2013.

(CoRWM, 2018) Committee on Radioactive Waste Management, « Position Paper: Why Geological Disposal? », CoRWM doc. 3521, 17 November 2018.

(Cotton, 2005) Cotton M., « The problem of moral philosophy and intergenerational equity in a potential radioactive waste siting process: an ethical conundrum with a pragmatic solution » dans *ICEM'05: The 10th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management*, Scottish Exhibition & Conference Centre, Glasgow, Scotland, September 4-8, 2005.

(Cotton, 2009) Cotton, M., « Evaluating the 'Ethical Matrix' as a Radioactive Waste Management Deliberative Decision-Support Tool », *Environmental values*, 18(5), 153-176, 2009.

(CPNPC, 2015) Royaume de Belgique, Programme national de gestion des combustibles usés et des déchets radioactifs, Document établi par le Comité du programme national⁴⁶⁸ en application de la loi du 3 juin 2014 transposant la directive européenne 2011/70/Euratom du 19 juillet 2011, Première édition, juin 2015.

(Craeye, 2010) Craeye B., « Vroegtijdig thermodynamisch gedrag van betonnen Supercontainers voor de berging van radioactief afval », Proefschrift ingediend tot het behalen van de graad van Doctor in de Ingenieurwetenschappen: Bouwkunde, Universiteit Gent, Academiejaar 2009-2010, 2010.

⁴⁶⁸ Dont l'acronyme bilingue est CPNPC (Comité du Programme National / Comité van het Nationale Programma (Nationale Programme Comité)

(CSS, 2021) Conseil Supérieur de la Santé, « Risque nucléaire, développement durable et transition énergétique », Avis n°9576, octobre 2021

(Dagorne et Dars, 2005) Dagorne A. et Dars R., *Les risques naturels*, Coll. Que sais-je ?, PUF, Paris, 2005.

(Daly, 1996) Daly H.E., *Beyond Growth: The Economics of Sustainable Development*, Beacon Press Book, Boston, 1996.

(Delumeau, 1989) Delumeau J., *Rassurer et protéger. Le sentiment de sécurité dans l'Occident d'autrefois*, Paris, Fayard, 1989.

(Demeulenaere, 2014) Demeulenaere P., « Are there many types of rationality? », *Papers. Revista de Sociologia*, 99 (4), pp. 515-528, 2014.

(Deming, 1991) Deming W.E., *Quality, Productivity and Competitive Position*, Quality Enhancement Seminars, Inc. Los Angeles, California, 1991.

(Depaus, 2006) Depaus C., « Le risque technologique. Analyse épistémologique, dimensions sociologiques », Travail de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies en Philosophie des Sciences (Programme commun UCL/ULB/ULg), Université Catholique de Louvain, Institut Supérieur de Philosophie, année académique 2005-2006, 2006.

(Depaus, 2010) Depaus C., « Principe d'optimisation : essai de synthèse », Note ONDRAF/NIRAS 2010-0726 (rév.0), 12 mai 2010.

(Depaus, 2012), Depaus C., « Discuss the EU's legal framework on nuclear safety and waste management and elaborate on whether or not this framework represents a comprehensive regime, on its role and importance in international nuclear law and on the next steps necessary to reach the EU's objectives in nuclear safety and waste management », Note ONDRAF/NIRAS n°2012-2524 (rev.0), 19 décembre 2012, Note basée sur la dissertation originale C. Depaus pour l'obtention du diplôme universitaire de Droit Nucléaire International (International School of Nuclear law organisée conjointement par l'Université de Montpellier et l'Agence pour l'Energie Nucléaire) par C. Depaus, Université de Montpellier, 2013.

(Depaus, 2016a) Depaus C., « Analyse des avis de l'AFCN sur d'importants documents publics (co-) rédigés par l'ONDRAF (Plan Déchets, SEA, Programme national) », ONDRAF/NIRAS, Note 2016-0796, 4 June 2016.

(Depaus, 2016b) Depaus C., « Overview des pratiques internationales en matière de sélection de la roche hôte et du site (siting process). Rôle des régulateurs », ONDRAF/NIRAS, Note 2016-1064, 5 février 2016.

(Depaus, 2016c) Depaus C., « Traitement des recommandations AFCN (telles que formulées dans la note CDE/2016-0796) dans l'élaboration du SFC1v1 », ONDRAF/NIRAS, Note 2016-0805, 29 mars 2016.

(Depaus, 2017a) Depaus C., « Overview des pratiques internationales en matière de sélection de la roche hôte et du site (siting process). Rôle des régulateurs », ONDRAF/NIRAS, Note 2017-0911 (révision de la Note 2016-1064), 27 avril 2017.

(Depaus, 2017b) Depaus C., « Analyse des avis de l'AFCN sur d'importants documents publics (co-) rédigés par l'ONDRAF (Plan Déchets, SEA, Programme national) », Note 2017-1014 (révision de la Note 2016-0796), 21 avril 2017.

(Depaus, 2019) Depaus C., « 2nd International Conference on Monitoring in Geological Disposal of Radioactive Waste, Paris, 9-11 April 2019 », Rapport de mission ONDRAF 2019-0852, 2019.

(Depaus, 2020a) Depaus C., « Optimisation: Rethinking the Art of Reasonable », présentation faite au Comité de direction de l'ONDRAF, 6 février 2020.

(Depaus, 2020b) Depaus C., « NEA Workshop on Optimisation: Rethinking the Art of Reasonable, January 2020 » Rapport de mission ONDRAF 2020-0160, 2020.

(Depaus, 2021) Depaus C., EURAD, UMAN workshop 2 : Management options for uncertainties related to the human factor, presentation from WMO group, subtask 4.3, WS2, 23 June 2021. [En ligne]. Disponible sur : <https://service.projectplace.com/#project/1773014053/documents/43181890>. [Consulté le 25 juin 2021].

(Depaus et Capouet, 2012) Depaus C. et Capouet M., « The use of safety statements in the achievement of SFC 1 », Note ONDRAF/NIRAS n°2012-1390, 9 juillet 2012.

(Depaus et Capouet, 2013) Depaus C. et Capouet M., « Points d'attention communiqués par l'AFCN en vue de l'examen du SFC 1 », Note ONDRAF/NIRAS 2013-2535, 25 novembre 2013.

(Depaus *et al.*, 2020) Depaus C., Capouet M., Van Geet M., Bernier F., Volckaert G., Lemy F., Detilleux V. et Mommaert C., Note AFCN/Bel V – ONDRAF décrivant une réflexion commune sur les notions de réversibilité, récupérabilité et concepts associés (« note de convergence R&R »), référence AFCN : Bernier F., Note convergence R&R, 2020-03-17-FB-5-1-2-FR, 17 mars 2020 ; référence ONDRAF : Depaus C., Note de convergence (ONDRAF-AFCN-Bel V) sur les notions de réversibilité, récupérabilité et concepts associés, Note 2020-0707, 24 mars 2020

(Depaus *et al.*, 2018) Depaus C., Skagius K., Buckau G., Svensson F. et Fass T., « Demonstration of operational and long-term safety of geological disposal: the IAEA's GEOSAF II project », Task group on Operational Safety, NEA Integration Group for the Safety Case (IGSC), Symposium 2018 Current understanding and future direction for the geological disposal of radioactive waste, 10-11 October 2018, Rotterdam, forthcoming.

(Depaus *et al.*, 2021) Depaus C., Léonard D. et Raymaekers D., « Geological disposal facility for category B and C waste – Operational safety – Risk matrices », Note ONDRAF 2021-0507, 7 juin 2021.

(Depré, 2000) Depré O., *Philosophie morale (2^e édition)*, Academia-Bruylant, Louvain-la-Neuve, 2000.

(De Sadeleer, 2000) De Sadeleer N., « Réflexions sur le statut juridique du principe de précaution », dans *Le Principe de Précaution, signification et conséquences*, Eds Zaccai E., Missa J-N., Editions de l'Université Libre de Bruxelles, ISBN 2-8004-1246-1. 2000.

(De-Shalit, 1995) De-Shalit A., *Why posterity matters: Environmental policies and future generations*. Hove: Psychology Press, 1995.

(Detilleux *et al.*, 2021) Detilleux V., Bernier F. et Surkova M., « SITEX.Network. European network of experts on RWM Involving TSOs, Regulators and Civil Society Experts. General overview of the Network & Interactions with Civil Society », SITEX – Meeting 2021-06-07 – FANC – Bel V/NIRAS, Présentation faite dans le cadre de l’addendum 11, dans *Rapport de réunion externe avec l’AFCN et Bel V (addendum 11). SITEX : General overview of the Network & Interactions with Civil Society*, Depaus C., Note ONDRAF n°2021-2054, 17 juin 2021.

(de Unamuno, 1917) de Unamuno M., *Le sentiment tragique de la vie*, Editions de la Nouvelle Revue française, Paris, 1917.

(Dignum *et al.*, 2016) Dignum, M., Correljé A., Cuppen E., Pesch U. et Taebi B., « Contested Technologies and Design for Values: The Case of Shale Gas », *Science and engineering ethics*, 22, pp. 1171–1191, 2016.

(Di Rupo, 1998) Lettre du ministre de l’Economie Elio Di Rupo à l’ONDRAF, *Décision du Gouvernement sur les déchets radioactifs de catégorie A*, réf. BL/vd/203-Cab., 26 janvier 1998.

(D’Orazio *et al.*, 2019) D’Orazio D., Léonard D. et Raymaekers D., « Les déchets de forte activité et/ou de longue durée de vie. Le design et architecture du stockage géologique », *Journée d’étude SBGIMR – Le stockage des déchets nucléaires*, Liège, 21 février 2019.

(Dratwa, 2007), Dratwa J., « Risque, rixe, rhizome : guerre et paix avec l’analyse des risques et les organisations internationales », dans *Techniques et philosophie des risques*, Kermisch C. et Hottois G., Coll. Pour Demain, Ed. Librairie Philosophique J. Vrin, Paris, 2007.

(Dupont, 2012) Dupont M., « Rapport de stage de fin d’étude : Evaluation des propriétés de confinement des pélites paléozoïques belges à des fins de mise en dépôt géologique des déchets de haute activité et/ou longue demi-vie », Sorbonne Universités, Polytech Paris UPMC, Sciences de la Terre, 2012.

(Dupuis, 2000) Dupuis M., « Anthropologie philosophique », Université Catholique de Louvain, notes de cours FILO1350/FILO1351, 2000-2001, 2000.

(Dupuy, 2002) Dupuy J-P., *Pour un catastrophisme éclairé : Quand l'impossible est certain*, Ed. du Seuil, Paris, 2002.

(Dupuy, 2005) Dupuy J-P., *Petite métaphysique des tsunamis*, Ed. du Seuil, Paris, 2005.

(EC, 1979a) European Commission, « European Catalogue of geological formations having favourable characteristics for the disposal of solidified high-level and/or long-lived radioactive wastes - 1/ Introduction and summary Vol. 1. », European Atomic Energy Community, 1979.

(EC, 1979b) European Commission, « European Catalogue of Geological Formations Having Favourable Characteristics for the Disposal of Solidified High-Level and/or Long-Lived Radioactive Wastes. Vol. 2, - Belgium / Belgique / Etat au 01-01-1978 », European Atomic Energy Community, 1979.

(EC, 1984) European Commission, Council Directive of 28 June 1984 on the combating of air pollution from industrial plants (84/360/EEC), Official Journal of the European Economic Communities, L 188, 16 July 1984

(EC, 1991) Directive 91/156/CEE du Conseil du 18 mars 1991 modifiant la directive 75/442/CEE relative aux déchets. Journal officiel de l'Union européenne L 78 du 26 mars 1991, pp. 32-37

(EC, 1992) Commission des Communautés Européennes, Evacuation des déchets radioactifs : critères recommandés pour l'emplacement d'un dépôt, Série Euradwaste n°6, Luxembourg, 1992, ISBN 92-826-4850-8

(EC, 1996) EU-IPCC (Integration Prevention Pollution and Control), Council Directive 96/61/EC of 24 September 1996 concerning integrated pollution prevention and control, Official Journal of the European Communities, L 257, 10 October 1996, pp. 26-40

(EC, 1998) Council Decision of 7 October 1997 on the conclusion of the Convention for the protection of the marine environment of the north-east Atlantic, Official Journal of the European Communities, L104, vol.41, 3 April 1998

(EC, 2006) Directive 2006/12/CE du Parlement européen et du Conseil du 5 avril 2006 relative aux déchets. Journal officiel de l'Union européenne L 114 du 27 avril 2006, pp. 9-21

(EC, 2008a) Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives. Journal officiel de l'Union européenne L 312 du 22 novembre 2008, pp. 3-30

(EC, 2008b) EC, *Attitudes towards radioactive waste, Special Eurobarometer 297*, 2008 (disponible sur : http://ec.europa.eu/public_opinion/archives/ebs/ebs_297_en.pdf).

(EC, 2011) Directive 2011/70/Euratom du Conseil du 19 juillet 2011 établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs. Journal officiel de l'Union européenne L 199 du 2 août 2011, pp. 48-56.

(EC, 2018) Commission européenne – Secrétariat général, *Avis motivé – Infraction n°2018/2013. Avis motivé adressé au Royaume de Belgique*, 27 novembre 2019.

(Emmerechts, 2010) Emmerechts S., « La protection de l'environnement par le droit nucléaire : un long chemin reste à parcourir », dans *Le droit nucléaire international : Histoire, évolution et perspectives. 10^e anniversaire de l'Ecole internationale de droit nucléaire.*, NEA n°6935, OCDE, 2010. – ISBN 978-92-64-99144-6.

(Environment Agency, 2004) Environment Agency, « Guidance for the Environment Agencies' Assessment of Best Practicable Environmental Option Studies at Nuclear Sites », Environment Agency for England and Wales in collaboration with Scottish Environment Protection Agency (SEPA), February 2004.

(Esch, 1992) Esch L., *Mathématique pour économistes et gestionnaires*, De Boeck Université, Bruxelles, 1992. ISBN 2-8041-1474-0.

(EUROCODE, 2002) EUROCODE 8. « Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings », Standard NF EN 1998-1. En NBN-ENV 1998-1-1: 2002 NAD-E/N/F EUROCODE 8: Ontwerp en dimensionering van aardschikbestendige (sic) structuren – Deel 1-1: Algemene regels – Aardschokken en Algemene voorschriften voor structuren, version avril 2002.

(Everaerts *et al.*, 1996) Everaerts M., Poitevin C., De Vos W. et Sterpin M., « Integrated geophysical/geological modelling of the western Brabant Massif and structural implications », *Bulletin of the Belgian Society of Geology*, T.105 (1-2), pp. 41-59, 1996.

(Feinhals, 2008) Feinhals J., « Dose reduction below de minimis level? », *11th workshop on “ALARA” in Radioactive Waste Management*, Athens, Greece, April 09-11, 2008. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.eu-alara.net/index.php/activities/workshops/175-ean11.html>. [Consulté le 11 août 2021].

(Ferreira *et al.*, 2013) Ferreira N. L., Rochedo E. R. et Mazzilli B. P., « Utilization of critical group and representative person methodologies-differences and difficulties », in *International Nuclear Atlantic Conference (INAC)*, Brazil, November 24-29, 2013.

(Feltz, 2013) Feltz B., *La science et le vivant. Introduction à la philosophie des sciences de la vie*. Ed. De Boeck Supérieur, Bruxelles, 2013.

(Feltz, 2014) Feltz B., *La science et le vivant. Philosophie des sciences et modernité critique*. Ed. De Boeck Supérieur, 2^e édition, Bruxelles, 2014.

(Flakenburg, 2000) Falkenburg B., « The Meaning of Models in Modern Physics », dans *Book of Abstracts of the XIIIth DHS-DLMPS Joint Conference – Scientific Models : Their Historical and Philosophical Relevance*, *International Union of the History and Philosophy of Science*, Joint DHS-DLMPS Commission, 19-22 October 2000, Zurich (Switzerland), pp. 93-99, 2000.

(Fondation Roi Baudouin, 2010) Fondation Roi Baudouin, « Conférence citoyenne 'Comment décider de la gestion à long terme des déchets radioactifs de haute activité et de longue durée de vie ?' », *ONDRAF*, 2010. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.ondraf-plandecheets.be/nieuw/downloads/pdf/1968-FRB-POD-Ondraf.pdf> [Consulté le 23 août 2018].

(Foos, 1994) Foos J., *Manuel de radioactivité à l'usage des utilisateurs*, Tome 2, Formascience, Orsay, 1994.

(Foucault et Raoult, 1995) Foucault A. et Raoult J-F., *Dictionnaire de géologie*, 4^e édition, Masson, 1995.

(Fritzell, 2021) Fritzell A., « Canister retrieval status at SKB », IGD-TP Retrievability Workshop, 17 May 2021. [En ligne]. Disponible sur : <https://service.projectplace.com/#project/448738612/documents/981090201>. [Consulté le 18 mai 2021] (*accès restreint*).

(Fromilhague et Sancier-Chateau, [1991] 2004) Fromilhague C et Sancier-Chateau A., *Introduction à l'analyse stylistique*, Armand Colin, Paris, 2004.

(Gamborg, 2002) Gamborg C., « The acceptability of forest management practices: an analysis of ethical accounting and the ethical matrix ». *Forest Policy and economics*, 4, pp. 175-186, 2002.

(Gardiner, 2008) Gardiner S., « Why We Need More than Justification in the Ethics of Radiological Protection: A view from Outside », dans *Ethics and radiological protection*, Eggermont G. and Feltz B. (eds), Academia Bruylant, Collection Science, éthique et société de l'Institut Supérieur de Philosophie de l'Université Catholique de Louvain, 2008.

(Giddens, 2002) Giddens A., « Société du risque : fantasmes et réalités », *Sciences Humaines*, n°124, février 2002.

(Godard, 2000) Godard O., « De la nature du principe de précaution », dans *Le principe de précaution, significations et conséquences*, Zaccai E. et Missa J-N., Editions de l'Université de Bruxelles, Belgique, pp. 19-38, 2000.

(Godard, 2008) Godard O., « Justification, limitation, and ALARA as precursors of the precautionary principle », dans *Ethics and radiological protection*, Eggermont G. and Feltz B. (eds), Academia Bruylant, Collection Science, éthique et société de l'Institut Supérieur de Philosophie de l'Université Catholique de Louvain, 2008.

(Godard *et al.*, 2002) Godard O., Henry C., Lagadec P. et Michel-Kerjan E., *Traité des nouveaux risques*, Folio actuel inédit, Editions Gallimard, 2002.

(Goorden *et al.*, 2009) Goorden L. (Université d'Anvers), Weyns W. (Comité Scientifique SAFIR 2), Zwetkoff C. (Université de Liège), « Rapport d'audit. Dialogues de l'ONDRAF néerlandophones et francophones organisés par l'ONDRAF le 18/04 (Fr) 20/04 (Fr), 25/04 (NI), 09/05 (NI), 11/05 (NI), 12/05 (NI), 15/05 (Fr), 16/05 (Fr) », Conférence interdisciplinaire organisée par l'ONDRAF le 30 avril 2009, Bruxelles, 2 octobre 2009.

(Gosseries, 2005) Gosseries A., « The Egalitarian Case Against Brundtland's Sustainability », *GAIA – Ecological Perspectives on Science and Society*, vol. 14, n°1, January 2005. DOI: 10.14512/gaia.14.1.15

(Gosseries, 2006) Gosseries A., « Dette générationnelle et conceptions de la réciprocité », dans *Finances publiques et redistribution sociale*, Economica, edited by: Pellet, R., Paris, pp. 367–391, 2006.

(Gosseries, 2008a) Gosseries A., « On Future Generations' Future Rights », *The Journal of Political Philosophy*, vol. 16, n°4, pp. 446-474, 2008.

(Gosseries, 2008b) Gosseries A., « Theories of intergenerational justice: a synopsis », *Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society (S.A.P.I.E.N.S.)*, vol. 1, n°1, 2008. [En ligne]. Disponible sur : <http://journals.openedition.org/sapiens/165>. [Consulté le 27 décembre 2020].

(Gosseries, 2008c) Gosseries A., « Radiological protection and intergenerational justice », dans *Ethics and radiological protection*, Eggermont G. and Feltz B. (eds), Academia Bruylant, Collection Science, éthique et société de l'Institut Supérieur de Philosophie de l'Université Catholique de Louvain, 2008.

(Gosseries, 2011) Gosseries A., « Qu'est-ce que le suffisantisme ? », *Philosophiques*, vol. 38, n°2, pp. 465–491, 2011.
<https://doi.org/10.7202/1007460ar>

(Gosseries, 2016) Gosseries A., « Intergenerational justice, Sufficiency, and Health », dans *What is Enough?: Sufficiency, Justice, and Health*, Fourie C., Rid A.(Eds), Oxford Scholarship Online, November 2016.

(Gouin et Harguindéguy, 2010) Gouin R. et Harguindéguy J-B, « Retour à de la 'rationalité limitée' et cognition forte : enjeux et intérêts pour le renouvellement de l'analyse des politiques publiques », dans *10^e Congrès de l'AFSP, section 39 : Les mobilisations ethnolinguistiques en Europe, axe 1 : Les concepts et les approches : flux et reflux*, Grenoble, France, Septembre 2009.

(Graham, 1999) Graham J., « An investor's look at life-saving opportunities », *Risk in Perspective*, vol. 7, n°1, 1999.

(Grenville *et al.*, 2004) Grenville D., Kleiner B.M. et Newcomb J.F., « M.S.T.I., Optimizing the Whole System », Case study developed in support of the NASA Program and Project Management Initiative, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, VA, pp. 1-27, 2004. [En ligne]. Disponible sur : http://www.nasa.gov/pdf/293212main_58529main_msti_casestudy_042604.pdf. [Consulté le 3 mai 2022].

(Groessens *et al.*, 1982) Groessens E., Conil R. et Hennebert M., « Le Dinantien du sondage de Saint-Ghislain. Stratigraphie et Paléontologie », *Mém. expl. cartes géol. & min. Belg.*, vol. 22, 137 pages, 1982.

(Guillerm, 2011) Guillerm R., « Intégration de la Sûreté de Fonctionnement dans les Processus d'Ingénierie Système ». Thèse de doctorat. Université de Toulouse, 2011.

(Gutwald *et al.*, 2011) Gutwald R., Leßmann O., Masson T. et Rauschmayer F., « The capability approach to intergenerational justice: A survey », UFZ Discussion Paper, n°8/2011, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Leipzig, 2011.

(GRBC, 2020) Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale, « Avis du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale sur le projet de plan et le rapport sur les incidences environnementales pour la gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie élaborés par l'ONDRAF – Procédure SEA loi du 13.02.2006 », Réf. ECOCIRC/MAC/STU-bjb/Avis GRBC-plan de l'ONDRAF, 12 juin 2020.

(GW, 2020) Gouvernement wallon, « Réponse du Gouvernement wallon à la demande d'avis de l'ONDRAF sur l'avant-projet d'arrêté royal établissant le processus d'adoption de la politique nationale relative à la gestion à long terme des déchets radioactifs conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie et définissant la solution de gestion à long terme de ces déchets – Procédure SEA – Loi du 13 février 2006 », Réf. CeT/MaS/ReB/ViB/MuC/20-2725, 12 juin 2020.

(Habermas, [1968] 1973) Habermas J., *La technique et la science comme « idéologie »*, Gallimard, 1973.

(Habermas, 2001) Habermas J., « Vérité et justification », Gallimard, 2001.

(Hadamard, 1907) Hadamard M., « Les problèmes aux limites dans la théorie des équations aux dérivées partielles », *J. Phys. Theor. Appl.*, 1907, vol. 6, n°1, pp. 202-241, 1907.

(Handl, 2013) Handl G., « Environnement : les Déclarations de Stockholm (1972) et de Rio (1992) », *United Nations Audiovisual Library of International Law*, 2013. [En ligne]. Disponible sur : www.un.org/law/avl. [Consulté le 7 avril 2019].

(Hansson, 2007) Hansson S.O., « Ethics and Radiation protection », *Journal of Radiological Protection*, vol. 27, pp. 147-156, 2007. DOI 10.1088/0952 - 4746/27/2/002.

(Hansson, 2011) Hansson S. O., « Radiation Protection – Sorting Out the Arguments », *Philosophy & Technology*, vol. 24, pp. 363-368, 2011. DOI 10.1007/s13347-011-0036-5

(Harju-Autti et Volckaert, 1995) Harju-Autti P. et Volckaert G., « Evaluation of the chemical-toxic consequences of geological disposal of radioactive waste. Report to NIRAS/ONDRAF », Report SCK CEN-R-3051, Mol (Belgium), April 1995.

(Havel *et al.*, 2004) Havel R., Contri P., Toth C., Inagaki T., Gürpınar A. et Misák J., « Long term operation of nuclear power plants: maintaining safety margins while extending plant lifetimes » *dans IAEA, Topical Issues in Nuclear Installation Safety. Continuous Improvement of Nuclear Safety in a Changing World. Proceedings of an International Conference*, Beijing, 18–22 October 2004.

(Haverkamp *et al.*, 2006) Haverkamp B., Biurrun E., Müller-Hoeppe N. et Kučerka M., « Hydraulic cage concept for waste chambers and its technical implementation for the underground Richard repository, Litoměřice, Czech Republic », *dans Topseal 2006 Transactions, International Topical Meeting*, Finland, 17-20 September 2006.

(Hess, 1957) Hess H. H., « The disposal of radioactive waste on land ». Report of the Committee on Waste Disposal, Washington, D.C., Nat. Acad. Sci., Nat. Research Council Publ. n°519 (1957).

(Heuer, 1999) Heuer R. J., *Psychology of Intelligence Analysis*, History Staff Center for the Study of Intelligence Central Intelligence Agency, 1999.

(Hirschman, 1991) Hirschman A.O., *Deux siècles de rhétorique réactionnaire*, Paris, Fayard, 1991.

(Hohmann, 2021) Hohmann C., « Théorie des contraintes », *Les basiques de la théorie des contraintes*. [En ligne]. Disponible sur : <http://christian.hohmann.free.fr/index.php/theorie-des-contraintes/les-basiques-de-la-theorie-des-contraintes/107-la-devise-de-la-toc->. [Consulté le 17 août 2021].

(Howarth, 1992) Howarth R.B., « Intergenerational justice and the chain of obligation ». *Environmental Values*, vol. 1, n°2, pp. 133-140 (8), May 1992.

(Huber *et al.*, 1982) Huber J., Payne J. et Puto C., « Adding Asymmetrically Dominated Alternatives: Violations of Regularity and the Similarity Hypothesis », *Journal of Consumer Research*, 9, pp. 90-98, 1982.

(Huteau et Larraufie, 2006) Huteau B. et Larraufie J., « Que devons-vous aux générations futures ? », *Annales des Mines*, pp. 103-115, janvier 2006.

(IAEA, 1960) IAEA, « Disposal of Radioactive Wastes Vol.2 », dans *Conference Proceedings*, Monaco, 16-21 November 1959, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1960.

(IAEA, 1980) IAEA, « Regulatory Aspects of Underground Disposal of Radioactive Waste », dans *Proceedings of a Technical Committee meeting*, London, 25-29 Sept. 1978, IAEA-TECDOC-230, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1980.

(IAEA, 1991) IAEA, *Safety Culture*, Safety Series n°75-INSAG 4, Safety report, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1991.

(IAEA, 1994) IAEA, *Convention on nuclear safety*, INFCIRC/449, International Atomic Energy Agency, Vienna, July 1994.

(IAEA, 1995) IAEA, *The principles of radioactive waste management*, International Atomic Energy Agency, Vienna, Safety Series No. 111-F, 1995. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.iaea.org/publications/5192/principles-of-radioactive-waste-management-safety-fundamentals>. [Consulté le 15 février 2021].

(IAEA, 1996) IAEA, *Defence in depth in nuclear safety. INSAG-10. A report by the International Nuclear Safety Advisory Group*, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1996.

(IAEA, 1997) IAEA, *Joint convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management*, INFCIRC/546, International Atomic Energy Agency, Vienna, December 1997.

(IAEA, 1997b), AIEA, *Normes fondamentales internationales de protection contre les rayonnements ionisants et de sûreté des sources de rayonnements*, Collection Sécurité n°115, Agence internationale de l'énergie atomique, Vienne, 1997.

(IAEA, 2000) IAEA, « Retrievability of high level waste and spent nuclear fuel », dans *Proceedings of an international seminar organized by the Swedish National Council for Nuclear Waste (KASAM) in co-operation with the International Atomic Energy Agency*, Saltsjöbaden, Sweden, 24-27 October 1999, IAEA-TECDOC-1187, December 2000.

(IAEA, 2001) IAEA, *Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste*, IAEA-TECDOC-1208, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2001.

(IAEA, 2003a) Stoiber C., Baer A., Pelzer N. et Tonhauser W., *Handbook on Nuclear Law*, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2003.

(IAEA, 2003b) IAEA, *The Long Term Storage of Radioactive Waste: Safety and Sustainability — A Position Paper of International Experts*, International Atomic Energy Agency, Vienna, June 2003.

(IAEA, 2003c) IAEA, *Safety indicators for the safety assessment of radioactive waste disposal*, Sixth report of the Working Group on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal, IAEA-TECDOC-1372, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2003.

(IAEA, 2006a) IAEA, *Fundamental Safety Principles*, Safety Fundamentals No. SF-1, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2006.

(IAEA, 2006b) IAEA, *Geological Disposal of Radioactive Waste*, Safety Requirements No. WS-R-4, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2006.

(IAEA, 2006c) AIEA, *Principes fondamentaux de sûreté*, Fondements de sûreté No. SF-1, Agence internationale de l'énergie atomique, Vienne, 2006.

(IAEA, 2006d) IAEA, *Application of the Management System for Facilities and Activities*, Safety Requirements, Series No.GS-G-3.1, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2006.

(IAEA, 2007a) AIEA, *Glossaire de sûreté de l'AIEA. terminologie employée en sûreté nucléaire et radioprotection. Edition (française) 2007*, Agence internationale de l'énergie atomique, Vienne, 2007.

(IAEA, 2007b) IAEA, *IAEA Safety Glossary, Terminology used in Nuclear Safety and Radiation Protection, 2007 Edition*, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2007.

(IAEA, 2008a) IAEA, *The Management system for the disposal of radioactive waste*, Safety Guide N°GS-G-3.4, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2008.

(IAEA, 2008b) IAEA, *The Management system for the processing, handling and storage of radioactive waste*, Safety Guide N°GS-G-3.3, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2008.

(IAEA, 2008c) IAEA, *The Management system for technical services in radiation safety*, Safety Guide N°GS-G-3.2, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2008.

(IAEA, 2009a) IAEA, *Classification of Radioactive Waste, General Safety Guide*, Safety Standards Series No.GSG-1, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2009.

(IAEA, 2009b) IAEA, *Policies and strategies for radioactive waste management*, Nuclear Energy Series No. NW-G-1.1, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2009.

(IAEA, 2009c) IAEA, *Geological disposal of radioactive waste: technological implications for retrievability*, Nuclear Energy Series No. NW-T-1.19, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2009.

(IAEA, 2009d) IAEA, *The Management system for Nuclear Installations*, Safety Guide N°GS-G-3.5, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2009.

(IAEA, 2011a) IAEA, *Geological disposal facilities for radioactive waste*, Specific Safety Guide SSG-14, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2011.

(IAEA, 2011b) IAEA, *Disposal of radioactive waste*, Specific Safety Requirements SSR-5, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2011.

(IAEA, 2011d) IAEA, « GEOSAF, International Intercomparison and Harmonization Project on Demonstrating the Safety of Geological Disposal », Atomic Energy Agency, Vienna, Report on the GEOSAF Working Group on Operational Safety, International, 2011. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.iaea.org/sites/default/files/19/02/companion-report-on-operational-safety.pdf>. [Consulté le 18 juillet 2021].

(IAEA, 2012) IAEA, *The Safety Case and the Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste*, Specific Safety Guide SSG-23, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2012.

(IAEA, 2014) IAEA, *Monitoring and surveillance of radioactive waste disposal facilities*, Specific Safety Guide SSG-31, IAEA Safety Standards, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2014.

(IAEA, 2015) IAEA, « GEOSAF II: Task Group on Operational Safety – Progress Report », International Atomic Energy Agency, Vienna, International Intercomparison and Harmonization Project on Demonstrating the Safety of Geological Disposal part II, 2015. [En ligne]. Disponible sur : https://www.iaea.org/sites/default/files/19/02/geosaf-2-report_task_group.pdf. [Consulté le 18 juillet 2021].

(IAEA, 2016), IAEA, *Safety Glossary, 2016 Revision*, International Atomic Energy Agency, Vienna, June 2016.

(IAEA, 2016b) AIEA, *Radioprotection et sûreté des sources de rayonnements : normes fondamentales internationales de sûreté*, Collection Normes de sûreté de l'AIEA, Prescriptions générales de sûreté Partie 3, n°GSR Part 3, Agence internationale de l'énergie atomique, Vienne, 2016.

(IAEA, 2021) AIEA, « GEOSAF II, The International Project on Managing integration of pre-closure activities and post-closure safety in the Safety Case for Geological Disposal 2012-2015 », International Atomic Energy Agency, Vienna, 2021. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.iaea.org/sites/default/files/19/02/geosaf-2-tecdoc-draft.pdf>. [Consulté le 30 juin 2022].

(ICRP, 1959) ICRP, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, Now known as ICRP Publication 1, Pergamon Press, New York, 1959.

(ICRP, 1966) ICRP, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 9, Pergamon Press, Oxford, 1966.

(ICRP, 1973) ICRP, *Implications of Commission Recommendations that Doses be Kept as Low as Readily Achievable*, ICRP Publication 22, Pergamon Press, Oxford, 1973.

ICRP (1977) ICRP, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 26, Ann. ICRP 1 (3), 1977.

(ICRP, 1983) ICRP, *Cost—benefit analysis in the optimisation of radiological protection*, ICRP Publication 37, Ann. ICRP 10 (2-3), 1983.

ICRP (1997) ICRP, *Radiological Protection Policy for the Disposal of Radioactive Waste*. ICRP Publication 77, Ann. ICRP 27 Supplement, 1997.

(ICRP, 1998) ICRP, *Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste*, ICRP Publication 81, Ann. ICRP 28 (4), 1998.

(ICRP, 2005) ICRP, *Low dose extrapolation of radiation-related cancer risk*, ICRP Publication 99, Ann. ICRP 35 (4), 2005.

(ICRP, 2006) ICRP, *Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of the Public and The Optimisation of Radiological Protection: Broadening the Process*, ICRP Publication 101. Ann. ICRP 36 (3), 2006.

(ICRP, 2007) ICRP, *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37(2-4), 2007.

(ICRP, 2012) ICRP, *ICRP Statement on Tissue Reactions/Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context*, ICRP Publication 118, Ann. ICRP 41(1/2), 2012.

(ICRP, 2013) ICRP, *Radiological protection in geological disposal of long-lived solid radioactive waste*, ICRP publication 122, Ann. ICRP 42(3), 2013.

(ICRP, 2014) ICRP, *Protection of the environment under different exposure situations*, ICRP Publication 124, Ann. ICRP 43 (1), 2014.

(ICRP, 2018) ICRP, *Ethical foundations of the system of radiological protection*, ICRP Publication 138, Ann. ICRP 47 (1), 2018.

(ICRP, 2020) ICRP, *Proceedings of the Fifth International Symposium on the System of Radiological Protection*, Annals of the ICRP, volume 49, No. S1, Adelaide, Australia, 2020.

(IMO, 1972) International Maritime Organization, *Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter*, London, 1972.

(Imoussaten, 2011) Imoussaten A., « Modélisation et pilotage de la phase de délibération dans une décision collective : vers le management d'activités à risques. Gestion et management », Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2011.

(IOMC, 2017) Inter-Organization Programme for the Sound Management of Chemicals (IOMC), « Report on OECD project on Best Available Techniques for Preventing and Controlling Industrial Chemical Pollution », OECD Environment, Health and Safety Publications, Series on Risk Management, N°40, 2017.

(IRPS, 2018a) Lazo T., « Optimisation », International Radiological Protection School (NEA), Stockholm, 20 August 2018, Class lecture.

(IRPS, 2018b) Wakeford R., « The International Radiological Protection framework », Radiological Protection School (NEA), Stockholm, 20 August 2018, Class lecture.

(IRPS, 2018c) Mc Garry A., « Justification », International Radiological Protection School (NEA), Stockholm, 20 August 2018, Class lecture.

(IRPS, 2018d) Mc Garry A., « The application of dose limits », International Radiological Protection School (NEA), Stockholm, 21 August 2018, Class lecture.

(IRPS, 2018e) Lund I., « Individual radiosensitivity », International Radiological Protection School (NEA), Stockholm, 22 August 2018, Class lecture.

(IRPS, 2018f) Valentin J., « Dose & risk constraints and reference levels », International Radiological Protection School (NEA), Stockholm, 21 August 2018, Class lecture.

(IRPS, 2018g) Mattsson S., « Radiological Protection in healthcare for diagnostics and therapy », International Radiological Protection School (NEA), Stockholm, 23 August 2018, Class lecture.

(Norme ISO, 2015) Norme ISO, « Systèmes de management de la qualité — Principes essentiels et vocabulaire », norme internationale, ISO 9000: 2015, 2015.

(Jensen, 2010) Jensen M., *Radiation protection principles and developments of standards for geological repository systems*, Woodhead Publishing Limited, 2010.

(Jensen *et al.*, 2011) Jensen K.K., Forsberg E-M., Gamborg C., Millar K. et Sandoe P., « Facilitating ethical reflection among scientists using the ethical matrix », *Science and engineering ethics*, 17(3), pp. 425-445, 2011.

(Jonas, [1979] 1995) Jonas H., *Le principe responsabilité*, 1979 ; Editions du Cerf, 1990 (1^{ère} traduction française), Coll. Champs, Ed. Flammarion, 1995.

(Kaiser, 1997) Kaiser M., « Fish-farming and the Precautionary principle: Context and Values in Environmental Science for Policy », *Foundations of Science*, 2, pp. 307-341, 1997.

(Kaiser *et al.*, 2007) Kaiser M., Millar K., Thorstensen E. et Tomkins S., « Developing the ethical matrix as a decision support framework: GM fish as a case study », *Journal of agricultural and environmental ethics*, 20, pp. 65–80, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10806-006-9023-8>.

(Kaiser et Forsberg, 2001) Kaiser M. et Forsberg E., « Assessing fisheries – using an ethical matrix in a participatory process », *Journal of agricultural and environmental ethics*, 14, pp. 191-200, 2001.

(Kane et Sternheim, 1986) Kane J. et Sternheim M., *Physique*, InterEditions, Paris, 1986.

(Kant, [1785] 2004) Kant E., *Fondements de la Métaphysique des mœurs*, Librairie Philosophique J. Vrin, Paris, 2004.

(Kermisch et Hottois, 2007) Kermisch C. et Hottois G., *Techniques et philosophie des risques*, Coll. Pour Demain, Ed. Librairie Philosophique J. Vrin, Paris, 2007, ISBN 978-2-7116-1944-3

(Kermisch, 2010) Kermisch C., *Les paradigmes de la perception du risque*, Collection SRD sciences du risque et du danger, série Innovations, Ed. TEC&DOC Lavoisier, Paris, 2010 – ISBN 978-2-7430-1210-6

(Kermisch, 2016a) Kermisch C., « Elaboration d’une méthode d’évaluation éthique des technologies et application aux modes de gestion des déchets radioactifs », Projet Université Libre de Bruxelles – ONDRAF, Rapport final version II, octobre 2016.

(Kermisch, 2016b) Kermisch C., « Specifying the Concept of Future Generations for Addressing Issues Related to High-level Radioactive Waste », *Science and Engineering Ethics* 22(6), pp. 1797-1811, 2016.

(Kermisch et al., 2016) Kermisch C., Depaus C. et Labeau P-E, « A contribution to the analysis of equity associated with high-level radioactive waste management », *Progress in Nuclear Energy*, 92, pp. 40-47, 2016.

(Kermisch et Taebi, 2017) Kermisch C. et Taebi B., « Sustainability, ethics and nuclear energy: Escaping the dichotomy », *Sustainability*, 9(3), 446, 2017. <https://doi.org/10.3390/su9030446>.

(Kermisch et Depaus, 2018a) Kermisch C. et Depaus C., « The strength of ethical matrixes as a tool for normative analysis related to technological choices: the case of geological disposal for radioactive waste », *Science and engineering ethics*, 24(1), p. 29-48, 2018.

(Kermisch et Depaus, 2018b) Kermisch C. et Depaus C., « Applying the optimisation principle to the choice of the host rock for geological disposal: Epistemological and ethical dimensions », dans Symposium 2018 Current understanding and future direction for the geological disposal of radioactive waste, 10-11 October 2018, Rotterdam, NEA Integration Group for the Safety Case (IGSC), forthcoming.

(Kermisch et Depaus, *submitted*) Kermisch C. et Depaus C., « Accounting for future generations in energy ethics: the case for temporalized ethical matrices », *Ethics, Policy and Environment*, submitted (2022).

(Kervern, 1995) Kervern G-Y., *Eléments fondamentaux des Cyndiniques*, Ed. Economica, Paris, 1995.

(Klein, 2012) Klein E., « La radioactivité », dans *Le nucléaire expliqué par des Physiciens*, Bonin B., EDP Sciences, Paris, pp. 3-14, 2012.

(Knol *et al.*, 2010) Knol A.B., Slottje P., van der Sluijs J.P. et Lebrete E., « The use of expert elicitation in environmental health impact assessment: a seven step procedure », *Environmental Health*, 9:19, 2010. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.ehjournal.net/content/9/1/19> [Consulté le 9 juillet 2013].

(Kuhn, [1962] 1983) Kuhn T., *La structure des révolutions scientifiques*, Flammarion, France, 1983.

(Kursten, 2019a) Kursten B., « Uniform corrosion evaluation of C-steel in cementitious environments relevant to the surpercontainer design », SCK CEN report/26348152, January 2019.

(Kursten, 2019b) Kursten B., « SCC susceptibility study of C-steel in cementitious environments relevant to the surpercontainer design », SCK CEN report/29119007, March 2019.

(Laes, 2006) Laes E., « Nuclear Energy and Sustainable Development. Theoretical reflections and critical-interpretative research towards a better support for decision-making », Proefschrift (PhD), Katholieke Universiteit van Leuven, Oktober 2006.

(Laes, 2007) Laes E., « Can Habermas be used to legitimize new governance approaches in the field of radioactive waste management? », dans *Amsterdam Conference on the Human Dimensions of Global Environmental Change*, 24-26 May, 2007.

(Laes *et al.*, 2009) Laes E., Eggermont G. et Bombaerts G., « A risk governance approach for high-level waste in Belgium: A process appraisal » dans *International Conference Managing Radioactive Waste: Problems and Challenges in a Globalized World*, Sweden, 15-17 December 2009.

(Laes et Bombaerts 2021) Laes E. et Bombaerts G., « Political mediation in nuclear waste management: a Foucauldian perspective », *Philosophy and Technology*, 34, pp. 1287-1309, August 2021.

(Lahorgue, 2016) Lahorgue M-B., « L'élaboration de la norme législative et la prise en compte du savoir scientifique », dans *L'usage de la connaissance scientifique des pesticides et ondes électromagnétiques en Europe*, Abdelgawad Lambert E. & Kresse B., hors-série 27, décembre 2016. <https://doi.org/10.4000/vertigo.17850>

(Lalande, 1951) Lalande A., *Vocabulaire technique et critique de la philosophie, société française de philosophie*, 6^e édition, Presses universitaires de France, Paris, 1951.

(Lambert et Leclerc, 1996) Lambert D. et Leclerc M., *Au cœur des sciences. Une métaphysique rigoureuse*. Beauchesne Editeur, Paris, 1996.

(Lannoy, 2008) Lannoy A., *Maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement, Repères historiques et méthodologiques*, Collection SRD sciences du risque et du danger, série Notes de synthèse et de recherche, Ed. TEC&DOC Lavoisier, Paris, 2008. ISBN 978-2-7430-1018-8

(Laprie *et al.*, 1995) Laprie J.-C., Arlat J., Blanquart J.-P., Costes A., Crouzet Y., Deswarte Y., Fabre J.-C., Guillermain H., Kaâniche M., Kanoun K., Mazet C., Powell D., Rabéjac C. et Thévenod P., *Guide de la sûreté de fonctionnement*, Editions Cépaduès, Toulouse, 369 p., 1995.

(Larrère, 2017) Larrère C., « Précaution. Principe de précaution » dans (Canto-Sperber, [1996] 2017) *Dictionnaire d'éthique et de philosophie morale*, Ed. Quadrige, Presses universitaires de France, Paris, 2017.

(Lavelle, 2007) Lavelle S., « Quand connaître, c'est agir » dans *Ethique, technique et démocratie*, Eds Feltz B., Goujon P., Hériard-Dubreuil B., Lavelle S., Lesch W., Academia Bruylant, Louvain-la-Neuve, 2007.

(Le Breton, 2004) Le Breton D., *Conduites à risque*, Ed. PUF, Coll. Quadrige/Essais – Débats, Paris, 2004.

(Lebraty, 2004) Lebraty J-F, « Biais cognitifs : quel statut dans la prise de décision assistée ? », *Systèmes d'Information et de Management (French Journal of Management Information Systems)*, vol. 9, n°3, 2004.

(Lecourt, 2001) Lecourt D., *La philosophie des sciences*. Presses universitaires de France (PUF), Coll. Que sais-je ?, 6^e édition, Paris, 2001.

(Le Moigne, 1994) Le Moigne J-L., « Sur la capacité de la raison à discerner rationalité substantive et rationalité procédurale », dans *Cahiers d'économie politique* n°24/25 *Quelles hypothèses de rationalité pour la théorie économique ?*, pp. 125-159, 1994.

(Le Moigne, 2009) Le Moigne J-L., « Sur 'La Méthode' d'exercice de la 'Pensée Complexe' pour conduire sa 'Raison dans les Affaires Humaines' », *Synergies Monde*, n°6, pp. 23-48, 2009.

(Lemy, 2021) Lemy F., « Management of geosphere uncertainties, introduction », Subtask 4.3. UMAN workshop, Power point presentation, 19th February 2021.

(Le Parisien, 2022) Le Parisien, « Citations d'Albert Einstein sur le 'Problème' ». *Le Parisien*. [En ligne]. Disponible sur : <https://citation-celebre.leparisien.fr/auteur/albert-einstein?theme=probleme>. [Consulté le 26 avril 2022].

(Le Robert & Collins, 1995) Le Robert & Collins Senior, *Dictionnaire français-anglais ; anglais-français*, 4^e édition, Dictionnaires Le Robert – Paris, 1995.

(Lindell, 1988) Lindell B., « How safe is safe enough? » dans *Lauriston S. Taylor Lectures in Radiation Protection and Measurements (Lecture no.12)*, National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Md, USA, 1988

(Littré, 1882) Littré E., *Dictionnaire de la langue française. Tome quatrième*. Hachette. Paris, 1882.

(Lits, 2015) Lits G., « La gestion des déchets hautement radioactifs à l'épreuve de la démocratie, Contribution à une sociologie des activités décisionnelles », Thèse de doctorat en sciences sociales, Université catholique de Louvain, année académique 2014-2015, 2015.

(Lochard *et al.*, 1981) Lochard J., Maccia C. et Pagès P., « L'évaluation de la protection radiologique des travailleurs dans les centrales nucléaires », *Radioprotection*, vol. 16, n°1, pp. 201-208, DUNOD, 1981.

(MacLean, 1984) MacLean D., « Radioactive wastes: a problem of morality between generations », dans *Equity issues in Radioactive Waste Management*, D. Kasperson, R.E. (Ed.), United States: Oelgeschlager, Gunn and Hain, Publishers, Inc., 1984.

(Mannan, 2005) Mannan S., *Lee's Loss Prevention in the Process Industries. Hazard Identification, Assessment and Control*. vol. 1, 3rd Edition, Elsevier, 2005.

(Mancuso *et al.*, 2012) Mancuso M., Pasquali E., Giardullo P., Leonardi S., Tanori M., Di Majo V. Pazzaglia S. et Saran A., « The Radiation Bystander Effect and its Potential Implications for Human Health », *Current molecular medicine* 12(5), 2012. DOI: 10.2174/156652412800620011.

(Marivoet *et al.*, 2008) Marivoet J., Beuth T., Alonso J. et Becker D-A., « PAMINA Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case. Task reports for the first group of topics: Safety functions, Definition and Assessment of Scenarios, Uncertainty Management and Uncertainty Analysis, Safety Indicators and Performance/Function Indicators », Deliverable (D-N°1.1.1), 31 mars 2008.

(Mazurek *et al.*, 2008) Mazurek M., Gautschi A., Marschall P., Vigneron G., Lebon P. et J. Delay, « Transferability of geoscientific information from various sources (study sites, underground rock laboratories, natural analogues) to support safety cases for radioactive waste repositories in argillaceous formations », *Physics and Chemistry of the Earth*, 33, S95-105, 2008.

(M.B., 1980) Loi du 8 août 1980 relative aux propositions budgétaires 1979-1980, Article 179, Moniteur belge du 15 août 1980.

(M.B., 2001) Arrêté Royal du 20 juillet 2001 portant règlement général de la protection de la population, des travailleurs et de l'environnement contre le danger des rayonnements ionisants. – Koninklijk besluit houdende algemeen reglement op de bescherming van de bevolking, van de werknemers en het leefmilieu tegen het gevaar van de ioniserende stralingen, (RGPRI-ARBIS).

(M.B., 2003) Loi du 31 janvier 2003 sur la sortie progressive de l'énergie nucléaire à des fins de production industrielle d'électricité, Moniteur belge du 28 février 2003.

(M.B., 2006) Loi du 13 février 2006 relative à l'évaluation des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement et à la participation du public dans l'élaboration des plans et des programmes relatifs à l'environnement, Moniteur belge du 10 mars 2006.

(M.B., 2011) Arrêté royal portant prescriptions de sûreté des installations nucléaires, Moniteur belge du 21 décembre 2011.

(M.B., 2014), Loi du 3 juin 2014 modifiant l'article 179 de la loi du 8 août 1980 relative aux propositions budgétaires 1979-1980 en vue de la transposition dans le droit interne de la Directive 2011/70/Euratom du Conseil du 19 juillet 2011 établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs, Moniteur Belge n°185, vendredi 17 juin 2014, pp. 48232-48237.

(Meert, 2020) Meert K., « Inventory of chemotoxic and corrosive substances and complexing agents in waste of category B and C », Note ONDRAF/NIRAS n°2019-1945, 18 mai 2020.

(Mepham, 2000) Mepham B., « A framework for the ethical analysis of novel foods: the ethical matrix », *Journal of agricultural and environmental ethics*, 12(2), pp. 165-176, 2000.

(Mepham *et al.*, 2006) Mepham B., Kaiser M., Thorstensen E., Tomkins S. et Millar K., *Ethical matrix Manual*. LEI, onderdeel van Wageningen UR, 2006.

(Michot, 1980) Michot P., « Belgium », dans *Geology of European countries: France, Belgium, Luxembourg*, Lorentz C., 26th International Geological Congress, Dunod (Bordas), Paris, 1980.

(Minon et Depaus, 2013) Minon J-P. et Depaus C., « Les apports de la radioprotection dans la gestion de la sûreté à long terme des déchets radioactifs », *Journées de la Société française de Radioprotection /Section Environnement*, octobre 2013.

(Müller, 2021) Müller J. « Retrieval technology. Asse II mine » dans *IGD-TP workshop on retrievability*, Brussels, 17th May 2021.

(Moles, 1995) Moles Abraham A., *Les sciences de l'imprécis*, Editions du Seuil, mars 1995.

(Montignac *et al.*, 2009) Montignac F., Mousseau M., Bouyssou D., Damart S., Aloulou M.A. et Bousval B., « L'évaluation Multicritère comme Aide à L'Orientation de la Recherche : Application aux Technologies de stockage Embarqué de L'Hydrogène », Laboratoire d'Analyse et Modélisation de Systèmes pour l'Aide à la Décision, Université Paris Dauphine, Cahier du Lamsade 288, Décembre 2009.

(Morfaux et Lefranc, [1980] 2020) Morfaux L-M, Lefranc J., *Vocabulaire de la Philosophie et des Sciences Humaines*, Armand Colin, Malakoff, [1980] (2020).

(Nadeau, 1999) Nadeau R., *Vocabulaire technique et analytique de l'épistémologie*, Presses universitaires de France, 1999.

(Nagra, 2002) Nagra, « Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis) », *Nagra*, Safety Report, Project Opalinus Clay, Technical Report 02-05, December 2002.

(Nagra, 2010) Gaus I., Smith P., Martin A.J. et Vomvoris S., « Scenario development methodologies: Applications at Japanese and European implementers – Outcomes of NUMO's Scenario Development Methodology », Workshop held at Baden, Switzerland (2-3 December 2009), Project Report NPB 10-02, January 2010.

(Nations Unies, 1948) Nations Unies, « Déclaration universelle des Droits de l'Homme », *Nations Unies*, 1948. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.un.org/fr/universal-declaration-human-rights/>. [Consulté le 15 mai 2021].

(NEA, 1984) NEA, « Long-term radiation protection objectives for radioactive waste disposal, report of a group of experts jointly sponsored by the Radioactive Waste Management Committee and the Committee on Radiation Protection and Public Health », Nuclear Energy Agency, OECD, 1984.

(NEA, 1991) NEA, « Disposal of Radioactive Waste: Can Long-term safety be Evaluated?, A Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee OECD Nuclear Energy Agency and the International Radioactive Waste Management Advisory Committee International Atomic Energy Agency endorsed by the Experts for the Community Plan of Action in the Field of Radioactive Waste Management Commission of the European Communities », Nuclear Energy Agency, OECD, 1991.

(NEA, 1995) NEA, « The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-lived Radioactive Wastes: a collective opinion of the Radioactive Waste Management Committee of the Nuclear Energy Agency », Nuclear Energy Agency, OECD, 1995.

(NEA, 1999) NEA, « Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories. Its Development and Communication », Nuclear Energy Agency, OECD, 1999.

(NEA, 2000) NEA, « Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste: An International Database », Nuclear Energy Agency, OECD, 2000.

(NEA, 2001) NEA, « Reversibility and Retrievability in Geological Disposal of Radioactive Waste. Reflections at the International Level », Nuclear Energy Agency, OECD, 2001.

(NEA, 2002a) NEA, « The Way Forward in Radiological Protection. An Expert Group Report », Nuclear Energy Agency, OECD, 2002.

(NEA, 2002b) NEA, « Improving Versus Maintaining Nuclear Safety », Nuclear Energy Agency, OECD, 2002.

(NEA, 2003) NEA, « SAFIR 2: Belgian R&D Programme on the Deep Disposal of High-level and Long-lived Radioactive Waste, An International Peer review », Nuclear Energy Agency, OECD, 2003.

(NEA, 2004a) NEA, « Post-closure safety case for geological repositories. Nature and Purpose », Nuclear Energy Agency, OECD, 2004.

(NEA, 2004b) NEA, « The Handling of Timescales in Assessing Post-closure Safety. Lessons learnt from the April 2002 Workshop in Paris, France », NEA report N°4435, Nuclear Energy Agency, OECD, 2004.

(NEA, 2008) NEA, « The Regulatory Goal of Assuring Nuclear Safety », Nuclear Energy Agency, OECD, NEA N°6273, 2008.

(NEA, 2010) NEA, « Optimisation of Radiological Disposal of Radioactive Waste, National and International Guidance and Questions for Further Discussion », Nuclear Energy Agency, OECD, NEA N°6836, 2010.

(NEA, 2012a) NEA, « Preparing for Construction and Operation of Geological Repositories – Challenges to the Regulator and the Implementer », *Proceedings of the Joint RF/IGSC Workshop, Issy-les-Moulineaux, France, 25-27 January 2012*, Nuclear Energy Agency, OECD, 2012. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2013/rwm-r2013-6.pdf>. [Consulté le 14 août 2021].

(NEA, 2012b) NEA, « Reversibility and Retrievability in Planning for Geological Disposal of Radioactive Waste » dans *Proceedings of the “R&R” International Conference and Dialogue 14-17 December 2010*, Reims, France, 2012.

(NEA, 2012c) NEA, « Reversibility of decisions and retrievability of radioactive waste ». Nuclear Energy Agency, OECD, Report NEA 7085, 2012.

(NEA, 2012d) NEA, « Indicators in the Safety Case », Nuclear Energy Agency, OECD, NEA/RWM/R (2012)7, July 2012. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.oecd-neo.org/rwm/docs/2012/rwm-r2012-7.pdf>. [Consulté le 3 juin 2021].

(NEA, 2012e) NEA, « Methods for Safety Assessment for Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste: Outcomes of the NEA MeSA Initiative », Nuclear Energy Agency, OECD, Report NEA N°6923, 2012. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.oecd-neo.org/rwm/reports/2012/nea6923-MESA-initiative.pdf>. [Consulté le 3 juin 2021].

(NEA, 2012f) NEA, « The Post-Closure Radiological Safety Case for a Spent Fuel Repository in Sweden, An international peer review of the SKB license-application study of March 2011 », Nuclear Energy Agency, OECD, Final report, NEA/RWM/PEER(2012)2, Unclassified, 12 Juni 2012. [En ligne]. Disponible sur : https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_19184/the-post-closure-radiological-safety-case-for-a-spent-fuel-repository-in-sweden-an-international-peer-review-of-the-skb-license-application-study-of-march-2011-final-report?details=true [Consulté le 3 juin 2021].

(NEA, 2020) NEA, « Two decades of Safety Case Development. An IGSC 20th anniversary brochure », Nuclear Energy Agency, OECD, NEA N° 7559, 2020.

(Newell et Simon, 1972) Newell A. et Simon H.A., *Human problem solving*, Prentice Hall : Englewood Cliffs, 1972. ISBN: 0134454030.

(Nieder-Westermann, 2011) Nieder-Westermann G., « Technical Support for the R&D Feasibility Programme for the Geological Disposal of Category B&C Radioactive Waste », DBE Technology GmbH, Peine, R&D Study 3-060 Evaluation of Repository Sealing and Backfilling Functions with Consideration of Retrievability. Final Report. May 2011.

(NRC, 1966) National Research Council, *Understanding risk: informing decisions in a democratic society*, National Academy Press, Washington DC, 1966.

(Nussbaum, 2007) Nussbaum M., « Frontiers of Justice. Disability, Nationality, Species Membership », *Scandinavian Journal of Disability Research*, 9, pp. 133-136, 2007. 10.1080/15017410601003171.

(Okrent, 1999) Okrent D., « On intergenerational equity and its clash with intragenerational equity and on the need for policies to guide the regulation of disposal of wastes and other activities posing very long-term risks », *Risk Analysis*, 19(5), pp. 877–901, 1999.

(ONDRAF, 2001a) ONDRAF/NIRAS, « Technical overview of the SAFIR 2 – Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2 », NIROND 2001-05E, 2001.

(ONDRAF, 2001b) ONDRAF/NIRAS, « SAFIR 2 – Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2 », NIROND 2001-06E, 2001.

(ONDRAF, 2008) Wickham S., « Evolution of the Near-Field of the ONDRAF/NIRAS Repository Concept for category C Wastes, First full draft report », NIROND-Tr 2007-07E, 2008.

(ONDRAF, 2009a) Cornélis B., Smith P., Capouet M. et Van Geet M., « The Plan for the Safety and Feasibility Case 1 - SFC1 level 4 report: first full draft », ONDRAF/NIRAS report NIROND-TR 2009-13E, 2009.

(ONDRAF, 2009b) Smith P., Cornélis B., Capouet M., Depaus C. et Van Geet M., « The Long-Term Safety Assessment Methodology for the Geological Disposal of Radioactive Waste - SFC1 level 4 report: first full draft », ONDRAF/NIRAS report NIROND-TR 2009-14E, 2009.

(ONDRAF, 2010) Capouet M., Depaus C., Van Geet M., Weetjens E., Marivoet J., Gaus I., Smith P. et Vomvoris S., « Support to safety assessments within the scope of the preparation of the SFC1 », NOCA 2008-1858 (Lot 1), procès-verbal et présentation de la 3^e réunion du 26 mai 2010.

(ONDRAF, 2011a) ONDRAF/NIRAS, « Waste plan for the long-term management of conditioned high-level and/or long lived radioactive waste and overview of related issues », Report NIROND 2011-02 E, septembre 2011.

(ONDRAF, 2011b) ONDRAF/NIRAS, « Résumé exécutif du Plan Déchets pour la gestion à long terme des déchets radioactifs conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie et aperçu de questions connexes », Rapport NIROND 2011-04F, Septembre 2011.

(ONDRAF, 2012) Depaus C., « Commentaires sur le projet de guide technique 'Analyse de sûreté post-fermeture des établissements de stockage définitif' (SAR) – version 2012-02-28-FLE-5-4-4-FR », courrier électronique de l'ONDRAF à l'AFCN du 16 juillet 2012.

(ONDRAF, 2013) ONDRAF/NIRAS, « ONDRAF/NIRAS Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the geological disposal of high-level and/or long-lived radioactive waste including irradiated fuel if considered as waste, State-of-the-art report as of December 2012 », NIROND-Tr 2013-12E, December 2013.

(ONDRAF, 2015) ONDRAF/NIRAS, « Référentiel de gestion à long terme des déchets radioactifs —Approche unifiée d'identification de solutions de gestion à long terme, plus particulièrement pour les déchets radioactifs radifères et les déchets radioactifs NORM, et considérations relatives à l'établissement de plans stratégiques en vue de leur gestion », rapport NIROND 2015-01 F, février 2015.

(ONDRAF, 2017a) Depaus C., « Contextual framework for ONDRAF/NIRAS SFC 1 », ONDRAF/NIRAS report, NIROND-TR 2017-16E, 2017.

(ONDRAF, 2017b) Depaus C., « Analyse des attributs de sûreté des potentielles roches hôtes pour un stockage géologique des déchets B&C », Rapport ONDRAF/NIRAS, NIROND-TR 2017-25F, Décembre 2017.

(ONDRAF, 2018) Kermisch C., « Evaluation éthique du principe d'optimisation dans le cadre de la gestion à long terme des déchets de catégorie B et C : application au choix de la roche-hôte », ONDRAF/NIRAS, Depaus C. (éd.), NIROND-TR 2017-33F, Janvier 2018.

(ONDRAF, 2019a) Haverkamp B., Herold Ph., Léonard D., Raymaekers D. et Wacquier W., « Operation and closure of the geological disposal facility for category B and category C wastes », NIROND-TR 2017-13E V3, December 2019.

(ONDRAF, 2019b) ONDRAF/NIRAS, « Rapport d'activités 2019 », *ONDRAF/NIRAS*, 2019. [En ligne]. Disponible sur : https://www.ondraf.be/sites/default/files/2020-10/ONDRAF_Rapport%20d%27activit%C3%A9s%202019.pdf [Consulté le 19 avril 2021].

(ONDRAF, 2019c) Depaus C., « Analysis of safety attributes of potential host rocks for geological disposal of B & C waste », *ONDRAF/NIRAS report*, NIROND-TR 2017-25 E V2, March 2019.

(ONDRAF, 2020a) Léonard D., « Evaluation of the overnight cost of geological disposal of category B&C waste – costing 2020 », *NIROND-TR 2020-01E*, April 2020.

(ONDRAF, 2020b) ONDRAF/NIRAS, « Rapport sur les incidences environnementales (Strategic Environmental Assessment – SEA) pour l'avant-projet d'arrêté royal établissant le processus d'adoption de la politique nationale relative à la gestion à long terme des déchets radioactifs conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie et définissant la solution de gestion à long terme de ces déchets », *NIROND-TR 2020-07 F*, Avril 2020.

(ONDRAF, 2020c) ONDRAF/NIRAS, « Notre mission », *ONDRAF*. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.ondraf.be/notre-mission-et-déclaration-stratégique>. [Consulté le 30 avril 2021].

(ONDRAF, 2020d) ONDRAF/NIRAS, « Déclaration Stratégique », *ONDRAF*, 10 juin 2020. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.ondraf.be/declaration-strategique>. [Consulté le 30 avril 2021].

(ONDRAF, 2020e) Kermisch C. et Depaus C., « On overcoming intergenerational conflicts », *ONDRAF/NIRAS report*, NIROND-TR 2020-28E, May 2021.

(ONDRAF, 2020f) Depaus C., Vomvoris S. et Smith P., « Safety Strategy & Management Strategy for ONDRAF/NIRAS SFC 1 », *ONDRAF/NIRAS report*, NIROND-TR 2017-26E, July 2020.

(ONDRAF, 2021) ONDRAF/NIRAS, « Avant-projet d'arrêté royal instituant la première partie de la Politique nationale en matière de gestion à long terme des déchets radioactifs de haute activité et/ou de longue durée de vie et précisant le processus d'institution par étapes des autres parties de cette Politique nationale, Projet de rapport au Roi », document de travail - version du 22 mars 2021 – CONFIDENTIEL

(ONDRAF, 2022a) Capouet M., Doudou S. et Fuller A., « Preparatory assessment of the post closure safety for disposal of GLASS-C waste in a poorly indurated clay host formation », NIROND-TR 2022- 05, December 2021.

(ONDRAF, 2022b) ONDRAF/NIRAS, *Exposition permanente Tabloo*, <https://tabloo.com/fr>, avril 2022.

(ONDRAF, 2022c) Depaus C., Van Baelen H. et Smith P., « Analysis of safety attributes of potential host rocks for geological disposal of B & C waste », NIROND-TR 2017-25E V4, *forthcoming (December 2022)*.

(ONDRAF et SCK CEN, 2019) Demarche M. et van Walle E., « La séparation et la transmutation comme complément potentiel au stockage géologique pour la gestion sûre et à long terme des déchets radioactifs de haute activité et de longue durée de vie », Scientific Position Paper commun, août 2019.

(ONU, 1997) Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, « Résolutions, volume 1, Actes de la Conférence générale, 29^e session », Paris, 21 octobre – 12 novembre 1997, 1997.

(Ouchene et Moroncini, 2016) Ouchene B. et Moroncini A., « De la durabilité à la responsabilité envers les générations futures », CIRIEC N°2016/02, 2016.

(Oughton *et al.*, 2004) Oughton, D., Forsberg E., Bay I., Kaiser M. et Howard B., « An ethical dimension to sustainable restoration and long-term management of contaminated areas », *Journal of Environmental Radioactivity*, 74, pp. 171-183, 2004.

(Parfit, 1984) Parfit D., « The Non-Identity Problem », dans *Reasons and Persons*, Oxford University Press, 1984.

(Parlement, 1993) Chambre des Représentants de Belgique, Résolution relative à l'utilisation de combustibles contenant du plutonium et de l'uranium dans les centrales nucléaires belges, ainsi qu'à l'opportunité du retraitement des barres de combustible, 541/9 – 91/92 (S.E.), Session ordinaire, 22 décembre 1993.

(Parocchia, 2000) Parocchia D., « Some epistemological remarks about the notions of system and model », dans *Scientific Models: Their Historical and Philosophical Relevance*, XIIIth DHS-DLMPS Joint Conference, Neuenschwander Erwin (Ed.), 19-22 October 2000, Zurich (Switzerland), pp. 111-117, 2000.

(Parotte, 2016) Parotte C., « L'art de gouverner les déchets hautement radioactifs. Analyse comparée de la Belgique, la France et le Canada », Thèse de doctorat, Université de Liège, Faculté de Droit, Science Politique et Criminologie, Liège, 2016.

(Parotte, 2020) Parotte C., « A nuclear real-world experiment: Exploring the experimental mindsets of radioactive waste management organisations in France, Belgium and Canada », *Energy Research & Social Science*, 69, 101761, 2020.

(Parotte, 2021) Parotte C., « Cent mille ans de déchets nucléaires : le défi de la légitimité démocratique à long terme », dans *Les transformations de la légitimité démocratique. Idéaux, revendications et perceptions*, Damay L & Jacquet V. (dir), Academia-L'Harmattan, Louvain-la Neuve, 2021.

(Parotte et Fallon, 2020) Parotte C. et Fallon C., « Les futurs de la gestion à long terme des déchets hautement radioactifs et des combustibles usés en Belgique. Résultats de l'enquête Delphi (Avril–Novembre 2019) », Centre de recherches Spiral, Université de Liège, Février 2020.

(Partridge, 2001) Partridge E., « Future generations, 2001 », dans *A Companion to Environmental Philosophy*, Blackwell Companions to Philosophy, Ed. Dale Jamieson, Oxford, UK, p. 377, 2001.

(Peretti-Watel, 2001) Peretti-Watel P., *La société du risque*, Coll. Repères, Ed. La Découverte, Paris, 2001.

(Persson *et al.*, 1994) Persson P.-A., Holmberg R. et Lee Jaimin, *Rock Blasting and Explosives Engineering*, CRC Press, USA, 1994.

(Pesqueux, 2020) Pesqueux Y., « Sécurité, fiabilité et risque », Thèse de doctorat, Hesam Université, France, 2020.

(Phua *et al.*, 1992) Phua K.H., Wang C.M., Yeong W.Y., Leong T.Y., Loh H.T., Tan K.C. et Chou F.S., *Optimization - Techniques and Applications*, Volume 1, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 1992.

(Pichat, 1995) Pichat P., *La gestion des déchets*, Ed. Flammarion, Coll. Dominos, France, 1995.

(Piegat, 2005) Piegat A., « A new definition of the fuzzy set », *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, vol. 15, n°1, 125-140, 2005.

(Pierce and Rich, 1958) Pierce W.G. et Rich E.I., « Summary of rock salt deposits in the United States as possible disposal sites for radioactive waste », US Geol. Survey Trace Elements Inv. Rept. 725, 1958.

(Pinchot, 1910) Pinchot G., *The Fight for Conservation* (New York: Doubleday, Page, and Company, 1910), 80 dans (Gosseries, 2016).

(Plumier et Degée, 2011) Plumier A. et Degée H., « Conception parasismique dans le contexte de l'Eurocode 8 », Cours de l'Université de Liège, 2011. [En ligne]. Disponible sur : <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/61649/22/Chapitre%201%20%20Les%20s%c3%a9ismes-2011.pdf>. [Consulté le 29 décembre 2018].

(Ponthière, 2008) Ponthière G., « The Relation between the Justification Principle, the Optimisation Principle and the Dose Limit Principle: A Geometric Comment », dans *Ethics and radiological protection*, Eggermont G. and Feltz B. (eds), Academia Bruylant, Collection Science, éthique et société de l'Institut Supérieur de Philosophie de l'Université Catholique de Louvain, 2008.

(Popper, [1935] [1959] 1973) Popper K.R., *La logique de la découverte scientifique*, [1935] (édition allemande) [1959] (édition anglaise), Ed. Payot, 1973.

(Posiva, 2012) Posiva Oy, « Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto – Synthesis 2012 », December 2012.

(Projet A.R., 2021*) Royaume de Belgique, « Avant-projet d'arrêté royal instituant la première partie de la Politique nationale en matière de gestion à long terme des déchets radioactifs de haute activité et/ou de longue durée de vie et précisant le processus d'institution par étapes des autres parties de cette Politique nationale », travaux préparatoires du 18 octobre 2021.

(Ptasekaite, 2014) Ptasekaite R., « Continuous Improvement of Nuclear Safety » dans *Nuclear Law in the EU and Beyond*. Proceedings of the AIDN/INLA Regional Conference 2013 in Leipzig, Nomos, Raetzke C. (ed.), pp. 71-95, 2014.

(Quinet, 1994) Quinet C., « Herbert Simon et la rationalité », *Revue française d'économie*, vol. 9, n°1, pp. 133-181, 1994.

(Radnitzky, 1987) Radnitzky G., « La perspective économique sur le progrès scientifique : Application, en philosophie de la science, de L'analyse coût-bénéfice », *Archives de Philosophie*, 50, n°2, pp. 177-97, 1987. <http://www.jstor.org/stable/43035203>.

(Rapacchi, 1994) Rapacchi B., *Une introduction à la notion de robustesse*. Centre Interuniversitaire de Grenoble, 19 août 1994.

(Rawls, [1971] 2009) Rawls J., *Théorie de la justice*, Coll. Essais, Ed. Points, France, 2009.

(Repenning, 1959) Repenning C.A., « Geologic summary of the San Juan Basin, New Mexico, with reference to disposal of liquid radioactive waste », US Geol. Survey Trace Elements Inv. Rept. 603, Report TEI-603, Sept. 29, 1959.

(Rivais, 1998) Rivais R., « Le commerce du maïs transgénique suspendu au nom du principe de précaution », *Le Monde*, 27-28 septembre 1998.

(Royaume de Belgique, 2021) Royaume de Belgique, « Rapport national relatif à la mise en œuvre de la directive 2011/70/Euratom du Conseil établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs », Troisième édition, août 2021.

(Roedder, 1959) Roedder E., « Problems in the disposal of acid aluminium nitrate high-level radioactive waste solutions by injection into deep-lying permeable formations », *US Geol. Survey Bull.* 1088, 1959.

(Roqueplo, 1997) Roqueplo P., « Entre savoir et décision, l'expertise scientifique », Conférence-débat organisée par le groupe Sciences en questions, Paris, INRA, 9 avril 1996, 1997.

(Ross, [1930] 2002) Ross W. D., *The right and the good*, Oxford, Clarendon Press, 1st edition 1930, 2002.

(Routley et Routley, 1978) Routley R. et Routley V., « Nuclear energy and obligations to the future », *Inquiry*, 21(1-4), pp. 133-179, 1978.

(Rubinstein, 1998) Rubinstein A., *Modeling Bounded Rationality*, The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England, 1998.

(Russel, [1953] 2017) Russel B. *Histoire de la philosophie occidentale*, [1953 : éd. originale anglaise] (2017 : 2^e édition française), Coll. Le goût des idées, Ed. Les Belles Lettres, Paris, 2 vol., 2017.

(RWM, 2016) Radioactive Waste Management Limited, *National Geological Screening Guidance*, Nuclear Decommissioning Authority, 2016.

(Sandel et Singer, 2021) Sandel M. et Singer P., « Comment (bien) faire le bien ? », *Philosophie magazine*, n°149, pp. 60-64, mai 2021.

(Saussois, 2007) Saussois J-M., *Théorie des organisations*, Coll. Repères, Ed. La Découverte, Paris, 2007.

(Savage, 1954) Savage L.J., *The Foundations of Statistics*, New York: Wiley, 1954.

(Schapira, 1997) Schapira J-P., « Le dossier des déchets nucléaires », dans *Les Déchets Nucléaires, un dossier scientifique*, Société Française de Physique, Les éditions de Physique, France, pp. 155-167, 1997.

(Schmidt-Lainé et Pavé, 2008) Schmidt-Lainé C. et Pavé A., « La modélisation au cœur de la démarche scientifique et à la confluence des disciplines », *Les Cahiers du Musée des Confluences*. Revue thématique Sciences et Sociétés du Musée des Confluences, tome 2, L'Expérimentation. pp. 21-34, 2008.

(SCK CEN, 2011) SCK CEN, « The SCK-CEN Barometer 2011, Perceptions and attitudes towards nuclear technologies in the Belgian population », Scientific report SCK CEN-BLG-1082, 2011.

(SCK CEN, 2012a) Weetjens E., Marivoet J. et Govaerts J., « Preparatory Safety Assessment. Conceptual model description of the reference case », Scientific report SCK CEN-ER-215, 2012.

(SCK CEN, 2012b) Govaerts J., Weetjens E. et Marivoet J., « Preparative Safety Assessments. In the framework of SFC 1: Reference case model calculations Version 3 », Restricted Contract Report SCK CEN-R-5324, 2012.

(SCK CEN, 2015) Govaerts J. et Weetjens E., « Sensitivity of the long-term radiological impact to early failure of the waste canister for a hypothetical geological repository in Boom Clay », Restricted Contract Report SCK CEN-R-5818, 2015.

(SCK CEN, 2018) SCK CEN, « The SCK-CEN Barometer 2018, Nuclear technologies and society: a survey among the Belgian population », Scientific report SCK CEN-BLG-1148, 2018.

(SCK CEN, 2021) SCK CEN, « Infrastructure », SCK CEN. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.sckcen.be/fr/qui-sommes-nous/informations-sur-lorganisation/infrastructure>. [Consulté le 12 décembre 2021].

(Sen, 2014) Sen A., « Global Warming Is Just One of Many Environmental Threats That Demand Our Attention », *The New Republic*, August 22, 2014 dans (Gosseries, 2016).

(SFOE, 2008) Swiss Federal Office of Energy, « Sectoral Plan for Deep Geological Repositories. Appendix III: Stepwise consolidation of safety considerations from stage 1 to stage 3 », Department of the Environment, Transport, Energy and Communications/SFOE, Bern, Switzerland, 2008.

(Shrader-Frechette, 1994) Shrader-Frechette K., « Equity and nuclear waste disposal », *J Agric Environ Ethics*, 7, pp. 133–156, 1994.

(Shrader-Frechette et Persson, 2002) Shrader-Frechette K. et Persson L., « Ethical, logical and scientific problems with the new ICRP proposals », *J. Radiol. Prot.*, 22, pp. 149–161, 2002.

(Sidgwick, 1907) Sidgwick H., *The Methods of Ethics*, Macmillan, London, 1907.

(Sillen et Marivoet, 2007) Sillen X. et Marivoet J., « Thermal impact of a HLW repository in clay - Deep disposal of vitrified high-level waste and spent fuel », SCK•CEN, External report ER-38, 2007.

(Simon [1945] 1997), Simon H.A., *Administrative Behavior*, The Free Press, 4th Edition, 1997.

(Simon, 1956) Simon H.A., « Rational choice and the structure of the environment », *Psychological Review* n°63, pp. 129-138, 1956.

(Simon, [1969] 2004) Simon H.A., *Les sciences de l'artificiel* (traduit de l'anglais par J.L. Le Moigne), Folio essais, Gallimard, 2004.

(Simon, [1973] 1992) Simon H.A., « De la rationalité substantive à la rationalité procédurale », Les introuvables en langue française de H.A. Simon. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.intelligence-complexite.org/fileadmin/docs/lesintrouvables/simon5.pdf>. [Consulté le 21 juillet 2020].

(Simon, 1977) Simon H.A., *Models of Discovery: and other topics in the methods of science*, Boston studies in the philosophy of science; 54, Reidel: Dordrecht, 1977.

(Simon, 1979) Simon H.A., *Models of Thought*, Yale university press: New Haven (Conn.), 1979-1989. ISBN 0300023472 (v.1); 0300042302 (v.2)., 2v., 1979.

(Simon, 1982) Simon H. A., *Models of bounded rationality*, vol 2, MIT Press: Cambridge (Mass.), c1982.

(Simon, 1997) Simon H. A., *Models of bounded rationality*, vol 3, MIT Press: Cambridge (Mass.), c1997. ISBN : 0262193728.

(Singer [1993] 1997) Singer P., *Questions d'éthique pratique*, Bayard Editions, Paris, 1997.

(Sintubin *et al.*, 2017) Sintubin M., Brassinnes S. et Depaus C., « Geological evaluation of 'Palaeozoic pelites' as potential host-rock for high-level and/or long-lived radioactive waste disposal in Belgium », Note ONDRAF/NIRAS n°2017-0428, February 2017.

(Soler, 2019) Soler L., *Introduction à l'épistémologie*, Ellipses, 3^e édition, Paris, 2019.

(Sonck, 2008) Sonck M., « Justification of the medical practice in the ICRP 2005 recommendations », dans *Ethics and radiological protection*, Eggermont G. and Feltz B. (eds), Academia Bruylant, Collection Science, éthique et société de l'Institut Supérieur de Philosophie de l'Université Catholique de Louvain, 2008.

(Spiegel, 1976) Spiegel M. R., *Théorie et applications de la statistique*, Série Schaum, Ediscience/Mc Graw-Hill, Paris, 1976.

(Stirling, 2000) Stirling A., « Sciences et risques : aspects théoriques et pratiques d'une approche de précaution », dans *Le principe de précaution, significations et conséquences*, Zaccai E. et Missa J-N., Editions de l'Université de Bruxelles, Belgique, 2000.

(Stengers [1997] 2002) Stengers I., *Sciences et pouvoirs : la démocratie face à la technoscience*. Editions La Découverte, Paris, 2002.

(Strohl, 1990) Strohl P., « Ethique, droit et politique dans la gestion des déchets radioactifs », *Bulletin de Droit Nucléaire*, n°46, AEN/NEA, OCDE/OECD, décembre 1990.

(Taebi, 2011) Taebi B., « The morally desirable option for nuclear power production », *Philosophy & Technology* 24(2), pp. 169-192, 2011.

(Taebi, 2012) Taebi B., « Intergenerational Risks of Nuclear Energy », dans *Handbook of Risk Theory*, Roeser S. *et al.* (eds.), Springer, 2012.

(Telleria *et al.*, 2015) Telleria D., Cabianca T., Proehl G., Kliaus V., Brown J., Bossio C., Van der Wolf J., Bonchuk I. et Nilsen M., « Use of the ICRP System for the Protection of Marine Ecosystems », *Annals of the ICRP*, Volume: 44 issue: 1_ suppl, pp. 304-312, June 2015.

(Torres Vidal, 2006) Torres Vidal C., «Review of contributed papers. Session IIIc: options for intermediate depth disposal», dans *Safety of Radioactive Waste Disposal*. Proceedings of an International Conference, Tokyo, 3–7 October 2005, IAEA/NEA, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2006

(Tversky et Kahneman, 1981) Tversky A. et Kahneman D., « The framing of decisions and the psychology of choice », *Science*, 211(4481), 1981, pp. 453-458

(Tversky et Shafir, 1992) Tversky A., Shafir E., « Choice under Conflict: The Dynamics of Deferred Decision », *Psychological Science*, vol. 3, No. 6, pp. 358-361, Nov. 1992.

(True *et al.*, 2007) True J. L., Jones B. D. et Baumgartner F. R., « Punctuated-Equilibrium Theory, Explaining Stability and Change in Public Policymaking », dans *Theories of the Policy Process*, Sabatier Paul A., Westview Press, Colorado, 2007.

(Urban Brussels, s.d.) Urban Brussels, « Consultation des administrations et instances », *Aménagement du Territoire et l'Urbanisme en Région de Bruxelles-Capital*, [En ligne]. Disponible sur : [https://urbanisme.irisnet.be/lepermisdurbanisme/la-demande-de-permis/consultation-des-administrations-et-instances#:~:text=L'avis%20est%20consultatif%20\(non,avis%20est%20conforme%20\(contraignant\).](https://urbanisme.irisnet.be/lepermisdurbanisme/la-demande-de-permis/consultation-des-administrations-et-instances#:~:text=L'avis%20est%20consultatif%20(non,avis%20est%20conforme%20(contraignant).) [Consulté le 19 avril 2022].

(UN, 1958) United Nations, *Convention on the High Seas*, Geneva, 29 April 1958.

(UN, 1972) United Nations, *Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment*, Stockholm, June 1972.

(UNESCO, 1994) UNESCO – Cousteau Society. *Human Rights for Future Generations*. Brussels/Tenerife: Bruylant & Unervisidad de La Laguna Press, 1994.

(US, 2015) United States Nuclear Waste Technical Review Board, « Designing a Process for Selecting a Site for a Deep-Mined, Geologic Repository for High-Level Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel. Overview and Summary », Report to the United States Congress and the Secretary of Energy, November 2015.

(Van Baelen *et al.*, 2012) Van Baelen H., Wouters L., Vandenberghe N., Brassinnes S et Van Geet M., « The Ypresian clays as potential host rock for radioactive waste disposal in Belgium A transferability study », 4th International Geologica Belgica Meeting 2012, Brussels, Belgium, September 13th 2012.

(Vander Eycken et Capron, 1992) Vander Eycken H. et Capron H., « Economie politique », fascicule 1, syllabus de 2^e candidature Polytechnique, 5^e édition 1992-1993/6, Presses Universitaires de Bruxelles, PO 0204A, 1992.

(van de Poel et Royakkers, 2011) van de Poel I. et Royakkers L., *Ethics, Technology, and Engineering: An Introduction*. Chichester: Wiley-Blackwell, 2011.

(Van Geet, 2008) Van Geet M., « A definition of thermal phase: proposal and suggested use », Note ONDRAF/NIRAS n°2008-0911, May 2008.

(Van Marcke and Laenen, 2005) Van Marcke Ph. et Laenen B., « The Ypresian Clays as possible host rock for radioactive waste disposal: an evaluation », ONDRAF/NIRAS report NIRON-TR 2005-01, 2005.

(Van Nuffelen, 2003) Van Nuffelen D., « Risk communication in a radiological crisis », dans *Scientific Bulletin Federal Agency for Nuclear Control*, Brussels, pp. 1 -3, 2003.

(Van Nuffelen, 2004) Van Nuffelen D., « La construction sociale du risque », dans *Scientific Bulletin Federal Agency for Nuclear Control*, Brussels, pp. 1 -5, 2004.

(Verdel, 2000) Verdel T., « Méthodologie d'application globale des risques. Applications potentielles au Génie Civil », communication écrite dans *Colloque « Risque et Génie Civil »*, Paris, pp. 23-38, 8-9 novembre 2000.

(Verwilghen, 2006) Lettre du ministre de l'Energie Marc Verwilghen à l'ONDRAF, *Berging op Belgisch grondgebied van het afval van categorie A*, ref. MV/EDC/BA/cb/2006-007081, 5 juillet 2006.

(Vetter, 1970) Vetter H., *Induction, Physics, and Ethics*, Londres, Ed. Zecha, 1970.

(Vico, 1708 [1981]) Vico G.B., *Vie de G.B. Vico écrite par lui-même* (suivi de : *La méthode des études de notre temps*, 1708), traduit de l'italien par A. Pons, Ed. B. Grasset, 1981.

(Villemeur, 1988) Villemeur A. *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels*, Collection de la Direction des études et recherches d'Electricité de France, 67, Eyrolles, 1998.

(Vincent, 2013) Vincent T., « Caractérisation des solutions efficaces et algorithmes d'énumération exacts pour l'optimisation multiobjectif en variables mixtes binaires », Thèse de doctorat, Sciences et Technologie de l'Information et de Mathématiques, Université de Nantes, 2013.

(Vincke, 1991) Vincke P., « L'aide multicritère à la décision. Historique et développements récents », dans *Bulletin de la Classe des sciences*, tome 2, pp. 147-151, 1991. <https://doi.org/10.3406/barb.1991.38652>

(Volckaert *et al.*, 2004) Volckaert G., Sillen X., Van Geet M., Bernier F., Mayor J.C., Göbel I., Blümling P., Frieg B. et Su K., « Similarities and differences in the behaviour of plastic and indurated clays », dans *EURADWASTE '04 (2004)*. Luxembourg, 29.03.2004–31.03.2004. [En ligne]. Disponible sur : http://cordis.europa.eu/fp6-euratom/ev_euradwaste04_proceedings.htm. [Consulté le 19 juillet 2020].

(Vomvoris *et al.*, 2016) Vomvoris S., Claudel A. et Giroud N., « An overview of the technical role of the regulator in the siting process. Review of six international geological repository programs », AN 16-294, Wettingen, June 2016.

(Wacquier *et al.* 2016) Wacquier W., Raymaekers D. et Depaus C., « Evolution of the lay-out of the Belgian geological repository to improve the operational safety », Joint NEA/IAEA workshop, Operational safety of geological repositories, session 5.1.d, Paris, June 29th- July 1st, 2016.

(Wacquier *et al.*, 2018) Wacquier W., Capouet M., Van Geet M. et Sillen X., « Methodological Safety Case for the Belgian Geological disposal facility for category B&C waste », NEA Integration Group for the Safety Case (IGSC) Symposium 2018, Current understanding and future direction for the geological disposal of radioactive waste, 10-11 October 2018, session 8, item 8.1b-3, Rotterdam, Netherlands, 2018.

(Walliser, 1977) Walliser B., *Systèmes et modèles*, Paris, Seuil, 1977.

(WCED, 1987) Brundtland Harlem Gro, « Our common future », Report of the World Commission on Environment and Development, 1987. [En ligne]. Disponible sur : <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>. [Consulté le 15 juillet 2021].

(Weetjens, 2013) Weetjens E., « Penalising scenarios for a geological repository in Boom Clay », SCK CEN / ONDRAF/NIRAS Discussion document, IHE/IPA/PAS 12/EC0920001-01/EWe/N-ii, 15 février 2003.

(Wyckman-Svahn, 2008) Wyckman-Svahn P., « The Ethical Foundation of Radiological Protection: from Utilitarianism to an 'Individual-Oriented Philosophy' », dans *Ethics and radiological protection*, Eggermont G. and Feltz B. (eds), Academia Bruylant, Collection Science, éthique et société de l'Institut Supérieur de Philosophie de l'Université Catholique de Louvain, 2008.

(Winsley et Pearson, 2021) Winsley R. et Pearson J., « Retrievability of waste from a Geological Disposal Facility », IGD-TP Retrievability Workshop, Radioactive Waste Management, UK, 17 May 2021. [En ligne]. Disponible sur : <https://service.projectplace.com/project/448738612/documents/981090201> (*accès restreint*) [Consulté le 18 mai 2021].

(Zaccai, 2007) Zaccai E., « Sens restreint et sens large du principe de précaution dans le contexte européen », dans *Ethique, technique et démocratie*, Eds Feltz B., Goujon P., Hériard-Dubreuil B., Lavelle S., Lesch W., Academia Bruylant, Louvain-la-Neuve, 2007.

(Zaccai et Missa, 2000) Zaccai E. et Missa J.-N., *Le principe de précaution, significations et conséquences*. Editions de l'Université de Bruxelles, Belgique, 2000.

(Zimmermann, 1996) Zimmermann H. J., *Fuzzy Set Theory*, Boston, Kluwer, 1996.

(Zwetkoff, 2004) Zwetkoff C., « Legality, Legitimacy and formal and informal decision-making processes: when does a decision become legitimate? » dans Nuclear Energy Agency, Dealing with Interests, Values and Knowledge in Managing Risk, Workshop Proceedings Brussels, Belgium, 18-21 November 2003, NEA N°5301, OECD, 2004

(Zwetkoff, 2012) Zwetkoff C., « Projet ONDRAF – Axe 1 : le processus décisionnel, du plan au projet », Liège, Centre de recherches Spiral, ULiège, 2012.

Récapitulatif des liens internet généraux consultés au cours de la rédaction et numéro de la note de bas de page dans laquelle ils sont cités

#	Lien hypertexte
63	https://fr.wikipedia.org/wiki/Robustesse_(statistiques) [Consulté le 5 décembre 2021]
80	https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_ministres_belges_de_l%27Environnement [Consulté le 2 août 2020]
81	https://fr.wikipedia.org/wiki/Crise_politique_belge_de_2010-2011 [Consulté le 2 août 2020]
110	http://www.suretedefonctionnement.fr/2014/07/securite-ou-surete.html [Consulté le 19 décembre 2018]
110	https://surete.securitas.fr/questions-frequentes/difference-surete-securite [Consulté le 4 août 2021]
127	https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%Bret%C3%A9_de_fonctionnement#cite_note-NormeTermMaint-4 [Consulté le 4 août 2021]
177	https://www.europarl.europa.eu/news/fr/press-room/20200914IPR87007/6-2-milliards-pour-combattre-la-crise-et-acceler-le-deploiement-de-vaccins (Actualité du Parlement européen, [Consulté le 26 décembre 2020])
184	https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9n%C3%A9ration_(sciences_sociales) [Consulté le 18 janvier 2022]
250	https://carnets2psycho.net/dico/sens-de-rabattement.html , [Consulté le 4 décembre 2019]
259	https://fr.wikipedia.org/wiki/Heuristique_(math%C3%A9matiques) [Consulté le 22 août 2021]

#	Lien hypertexte
259	https://fr.wikipedia.org/wiki/Heuristique [Consulté le 22 août 2021]
278	https://www.ppa.fr/ecole-commerce-alternance/Leffet-de-cadrage-un-concept-essentiel-pour-elaborer-une-strategie-de-communication.pdf [Consulté le 1 ^{er} juin 2020]
283	https://www.lerobert.com/google-dictionnaire-fr?param=ratiocination) [Consulté le 24 août 2021]
296	https://www.ensreg.eu [Consulté le 24 août 2021]
404	https://fr.wikipedia.org/wiki/Dilemme_du_prisonnier [Consulté le 11 avril 2021]
452	https://www.iaea.org/topics/disposal/international-project-on-demonstrating-the-safety-of-geological-disposal [Dernière consultation le 22 août 2022]