Pour des projets de qualité énergétique

Proposition d'actualisation des approches de l'énergie en architecture sur base des principes du développement soutenable

Geoffrey van Moeseke

Thèse déposée en vue de l'obtention du titre de docteur en sciences de l'ingénieur

Juillet 2013

Architecture et Climat
Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI)
Université catholique de Louvain
Louvain-la-Neuve
Belgique

Jury de thèse :

prof. Jean Stillemans (Président)	UCL/LOCI, Belgique
prof. André De Herde (Promoteur)	UCL/LOCI, Belgique
prof. Philippe Gruloos	UCL/LOCI, Belgique
prof. Dominique Gauzin-Müller	ENSA Grenoble, France
dr. Paula Cadima	AA Graduate School, UK

Pour des projets de qualité énergétique

par Geoffrey van Moeseke

© Geoffrey van Moeseke, 2013
Architecture et Climat
Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI)
Université catholique de Louvain
Place du Levant, 1
1348 Louvain-la-Neuve
Belgium

"La technique est moins importante que les hommes ou que la société,
l'important, c'est le projet humain qui est derrière."

(Wolton, 1999)

Résumé

Si l'on souhaite faire de l'architecture un vecteur de développement soutenable, la réponse à la question énergétique ne peut se limiter à l'application de standards constructifs. Il est nécessaire de contextualiser ces standards et de les compléter d'une approche cohérente avec l'ampleur de l'objectif de soutenabilité. Dans ce cadre, cette thèse place la question énergétique face à sa propre complexité et à ses relations avec les autres dimensions de l'architecture.

En particulier, elle propose quatre ensembles de développements originaux : 1/ une critique des démarches actuelles (Passivhaus et bâtiments net zéro-énergie), dénonçant leur limitation à l'idée performance, tout en justifiant leur ambition ; 2/ une identification et un dépassement de règles doctrinales encore présentes dans le domaine ; 3/ l'ouverture de pistes de recherche et de conception, notamment par la mise en perspective de la notion de confort dans une approche écouménale ; 4/ la proposition d'un processus de conception centré sur l'idée de gestion du risque et le principe de responsabilité partagée.

Par ces développements, cette thèse propose une approche de la qualité énergétique qui lui attribue les propriétés d'une démarche de projet, à savoir exemplarité (définition d'un idéal), opérativité (association de la conception et de la réalisation) et pronominalisation (identification d'une logique d'acteurs). Ce lien avec la notion de projet démontre la capacité de la question énergétique à interroger l'objet fondamental de l'architecture : la création de lieux correspondant à une certaine façon d'être au monde.

Remerciements

Chronologiquement, merci à :

Philippe B., pour m'avoir prêté ses PHDcomics ; Virginie, qui n'a pas cillé en m'entandant proposer de renoncer à un CDI pour retourner à l'université ; André, qui m'a accueilli une seconde fois chez Architecture et Climat ; Isabelle, pour m'avoir encouragé quand il a fallu choisir entre recherche, enseignement et pratique.

Dominique Gauzin-Müller, pour m'avoir m'avoir généreusement ouvert son carnet d'adresses et pendant quatre ans régulièrement rappelé les fondements humanistes de la construction éco-responsable, et Philippe Gruloos, pour sa disponibilité et ses relectures toujours très pointues ; Virginie, de nouveau, pour avoir éloigné les monstres aux moments stratégiques ; Damien pour avoir ajouté une couche de complexité à mon travail ; Toute l'équipe d'Architecture et Climat pour l'ambiance de travail et les commentaires lors de mes présentations intermédiaires, et particulièrement Arnaud, Olivier, Catherine, et Sophie pour les discussions, partages de bouquins et de références. Une mention spéciale à Arnaud pour avoir relu la première version complète de mon texte.

Virginie (encore !), Anne et Jean pour leurs relectures des nombreuses versions finales successives... j'ai une belle famille en or ; Corine de Potter d'Indoye, pour sa disponibilité et ses explications toujours claires ; Paula Cadima et Jean Stillemans, pour avoir accepté de compléter le jury ; Marie-Hélène, pour tous les aspects pratiques qu'elle prend en charge avec le sourire ; Virginie à nouveau, pour les pâtisseries.

Et enfin, merci à tous ceux qui assisterons à ma défense publique et à ceux qui liront cette thèse. Mais peut-être les premiers viendront-ils pour les pâtisseries ?

Table des matières

Résumé **i**

Remerciements **iii**

Table des matières **v**

Liste des illustrations **xi**

Liste des tableaux **xvii**

1 Introduction **1**
1.1 Sujet de cette thèse 1
1.2 Un espoir et des craintes - justification du sujet 2
1.3 Structure et postulats 6

I Contexte général de l'architecture soutenable **11**

2 Jalons de l'architecture verte **13**
2.1 Dimension énergétique aux XIX^{e} et XX^{e} siècles 13
2.1.1 XIX^{e} et première moitié du XX^{e} siècle 13
2.1.2 Seconde moitié du XX^{e} siècle 17
2.2 Situation actuelle 22
2.3 Conclusion - L'architecture écologique par inclusion au milieu 28

3 Soutenabilité de l'architecture **33**
3.1 Définition 33
3.2 Cinq principes pour approcher de la soutenabilité 35
3.2.1 Principe d'intégration 36
3.2.2 Principe d'équité inter et intragénérationnelle 37
3.2.3 Principe de précaution et d'incertitude 38
3.2.4 Principe de responsabilité commune mais différenciée 39
3.2.5 Principe de participation 39

4 Nécessaire ambition **41**
4.1 Enjeu climatique 41
4.1.1 Ambition mondiale 41
4.1.2 Traduction locale 45
4.1.3 Ampleur du défi 46
4.2 Limitation des ressources 50
4.3 Précarité énergétique 54
4.4 Réflexion sur base de l'équation de Kaya 60
4.5 Réflexion sur base des travaux de Georgescu 62
4.6 Conclusion - Nécessaire radicalité 64

II Analyse des approches de l'énergie en architecture **67**

5 Complexité de la question de l'énergie en architecture **69**
5.1 Définition de la complexité 71
5.2 Le bilan énergétique 73
5.2.1 Méthodes d'évaluation 73
5.2.2 Paramètres 74
5.2.3 Evolutions récentes 80
5.3 Le bilan environnemental 81
5.3.1 Approche agrégative 81
5.3.2 Approche holistique 82
5.4 Complexité liée au processus 83
5.5 Complexité liée au développement soutenable 84
5.6 Conclusion - La complexité de l'homme et de ses finalités . . 86

6 Le standard *Passivhaus* **89**
6.1 Origine et développement du concept 89
6.2 Mise en œuvre 98
6.3 Critique du concept 102
6.3.1 Principe d'intégration des composantes 104
6.3.2 Principe d'équité inter et intragénérationnelle 108
6.3.3 Principe de précaution et d'incertitude scientifique . . 110
6.3.4 Principe de responsabilité partagée 113
6.3.5 Principe de participation 114
6.4 Conclusion - Une approche surtout performantielle 115

7 Bâtiments zéro-énergie **121**
7.1 Histoire et définition des net-ZEB 121
7.2 Critiques des net-ZEB 124
7.2.1 Critiques observées dans la littérature 124
7.2.2 Manque de pragmatisme 128

7.3 Conclusion - Une démarche étrangère à l'architecture 130

III Reconstruire une approche de l'énergie 131

8 Viser la soutenabillté 133
8.1 Retour sur la question 133
8.2 Méthodologie 135
8.2.1 Inventaire 136
8.2.2 Structure 136

9 Travailler avec des concepts propres à la complexité 143
9.1 Principe de pertinence 144
9.1.1 Identifier les intentions 145
9.1.2 Remettre en cause 147
9.2 Principe de globalisme 148
9.3 Principe téléologique 152
9.4 Principe d'agrégativité 153
9.5 Conclusion - éléments d'une approche soutenable 154

10 Synthétiser les sous-thématiques de l'énergie 157
10.1 Inventaire des sous-thématiques 157
10.2 Critique de ces subdivisions 159
10.2.1 De la production et consommation d'énergie à sa transformation 159
10.2.2 Des systèmes actifs et passifs aux dispositifs spatiaux et technologiques 163
10.2.3 Du bon usage de l'énergie grise 164
10.2.4 Nouvel organigramme 165
10.3 Exergie 168
10.3.1 Définition exacte 168
10.3.2 Applications traditionnelles 169
10.3.3 Applications liées à la soutenabilité 172
10.4 Bilan énergétique global des parois 178
10.4.1 Méthode et hypothèses 178
10.4.2 Résultats 181
10.5 Conclusion - éléments d'une approche soutenable 187

11 L'énergie parmi les autres dimensions de l'architecture 191
11.1 Dimensions environnementales 191
11.1.1 Energie et matière 191
11.1.2 Energie et lumière 194
11.1.3 Energie et eau, biodiversité, air et terre 197

11.2 Dimensions sociales 198
11.2.1 Energie, confort et santé 198
11.2.2 Energie, acceptabilité et comportement 200
11.3 Dimension culturelle 201
11.3.1 Energie et forme architecturale 201
11.3.2 Energie et patrimoine 202
11.4 Dimensions spatiales 203
11.4.1 Energie, structure et qualité spatiale 203
11.4.2 Energie et qualité urbaine 204
11.4.3 Energie, programme et adaptabilité 206
11.5 Dimensions économiques 208
11.5.1 Temps de retour et analyse du coût du cycle de vie . . 208
11.6 Climats intérieurs et risque sanitaire 213
11.6.1 Limites de salubrité 213
11.6.2 Maintien de la salubrité en hiver sans installation chauffage ? 218
11.7 Impact énergétique de la flexibilité 226
11.7.1 Flexibilité maximale 226
11.7.2 Flexibilité raisonnée 230
11.7.3 Confrontation des niveaux de flexibilité 234
11.8 Conclusion - éléments d'une approche soutenable 238

12 L'homme dans le monde par l'architecture 243
12.1 Relation homme-monde 243
12.2 Travailler avec la relation homme-monde 245
12.2.1 Identité climatique 247
12.2.2 Comportement 250
12.3 Conclusion - éléments d'une approche soutenable 251

13 Adapter les méthodes de conception 255
13.1 Intégrer l'analyse du risque 256
13.1.1 Communication et concertation 258
13.1.2 Etablissement du contexte 258
13.1.3 Identification des risques 259
13.1.4 Analyse des risques 260
13.1.5 Suite à l'analyse : évaluation, traitement et surveillance 276
13.1.6 Commissioning 277
13.2 Intégrer les méthodes participatives 281
13.2.1 Distribution de responsabilité 284
13.2.2 Méthodes de participation 287
13.3 Redéfinir les indicateurs 292
13.4 Conclusion - éléments d'une approche soutenable 299

14 Conclusion **303**
14.1 Retour sur la question, la méthode et les résultats 303
14.2 Pour des projets de qualité énergétique 306
14.2.1 Sur la notion de projet 306
14.2.2 Méthodes et intentions 309
14.3 Mot de fin. . . et de suite 311

Bibliographie **313**

Liste des illustrations

1.1 Exemple de représentation d'un système de conception architecturale 3

2.1 Vue et plan de Bedford Park, Londres, Richard Norman Shaw, 1879 15
2.2 Croquis du Sanatorium de Paimio, Alvar Aalto, 1929 17
2.3 Sections et principes bioclimatiques du projet Arcosanti, Arizona, Paolo Soleri, 1970 19
2.4 Erdhäuser, Arni et Dietikon, Peter Vetsh 24

3.1 Les trois axes de l'architecture soutenable 37

4.1 Conséquences des changements climatiques au niveau mondial 42
4.2 Augmentation des émissions de CO2 et de la température à l'équilibre selon divers niveaux de stabilisation 43
4.3 Evolution probable de la demande totale de chauffage des bâtiments résidentiels en Région de Bruxelles-Capitale 47
4.4 Evolution nécessaire de la demande totale de chauffage des bâtiments résidentiels en Région de Bruxelles-Capitale 49
4.5 Profil de production schématique d'un gisement de pétrole . . 51
4.6 Evolution de la part des dépenses énergétiques dans les revenus moyens et de l'Affordable Warmth Index en Belgique . . . 57
4.7 Evolution de la part *énergie* dans la consommation des ménages par décile et région 57
4.8 Evolution du nombre de clients bénéficiant du tarif social en Wallonie 58

5.1 Modélisations statiques et dynamiques du bilan énergétique d'un bâtiment 75
5.2 Organigramme de l'efficacité énergétique des bâtiments 77
5.3 Organigramme complété de l'efficacité énergétique des bâtiments 85

6.1 Standard *Passivhaus* : conséquences du chauffage par air . . . 91
6.2 Comparaison des débits d'air recommandés par le standard *Passivhaus* et la norme NBN D50-001 94
6.3 Puissance disponible et besoin de chauffage associé pour des maisons *Passivhaus* sur base de la norme de ventilation NBN D50-001 94
6.4 Classification des recommandations du standard *Passivhaus* et de l'approche bioclimatique sur une triple échelle spatiale, technique et performantielle 99
6.5 Performances et ratios géométriques d'un échantillon de logements en fonction du besoin du chauffage 101
6.6 Niveau E en fonction du besoin du chauffage 102
6.7 Principe du double optimum économique 106
6.8 Coûts totaux actualisés en fonction de la consommation d'énergie primaire pour différents niveaux de performance énergétique 107
6.9 Surface brute par habitant sur un échantillon de maisons répondant au standard *Passivhaus* 111
6.10 Centre communal, Ludesh , Hermann Kaufmann, 2005 : implantation et vue 117
6.11 Centre communal, Ludesh , Hermann Kaufmann, 2005 : plans 118

7.1 Vue d'une des premières maisons solaires 122
7.2 Frontière du système *énergie fournie nette* dans le proposition du REHVA 127

8.1 Redéploiement de la réflexion autour des cinq principes de soutenabilité 138

9.1 Dawid Klaaste Centre, Laingsburg, CS Studio Architects, 2005 146
9.2 Propositions de paires objet-environnement pour l'application du principe globaliste 149
9.3 Interior gulf stream - Logement et studio pour Dominique Gonzalez-Foerster, Paris, Philippe Rahm, 2008 151

10.1 Part de l'énergie grise dans le bilan énergétique 160
10.2 Organigramme des sous-thématiques de l'énergie, sur base des décompositions usuelles 160
10.3 Illustration de la notion de rendement étendue pour une application de chauffage 162
10.4 Proposition d'un nouvel organigramme des sous-thématiques de l'énergie 167
10.5 Rendements primaires et exergétiques des principaux postes de consommations dans un hôtel et la maison Pléiade 173

10.6 Température du fluide à la sortie d'un capteur solaire à Uccle . 177
10.7 Logement individuel 3 façades, Avin, A2M 182
10.8 Impact du niveau U de la paroi sur le bilan énergétique primaire global sur 30 ans 183
10.9 Impact du niveau U de la paroi sur le bilan énergétique primaire global sur 30 ans - cas de l'ossature bois 184
10.10 Impact du niveau U de la paroi sur le bilan environnemental sur 30 ans 185
10.11 Impact du niveau U de la paroi sur le bilan environnemental sur 30 ou 50 ans - cas de l'ossature bois 186

11.1 Interaction entre l'énergie et les autres dimensions du projet d'architecture 192
11.2 Relation entre consommation d'énergie thermique, consommation d'énergie pour l'éclairage artificiel et confort lumineux 195
11.3 Comparaison des performance énergétiques théoriques et réelles d'un échantillon de presque 200 000 logements aux Pays-Bas . 201
11.4 Limites de confort et de salubrité des conditions intérieures . . 216
11.5 Appartement considéré pour l'étude de la salubrité hygrothermique 218
11.6 Profils d'occupation journaliers considérés pour l'étude de la salubrité hygrothermique 219
11.7 Profil de température pour le mois extrême et le mois le plus froid d'une année moyenne à Uccle 220
11.8 Degrés-jours 15/15 pour l'année de référence à Uccle confrontés à l'évolution des dernières années 221
11.9 Relation entre l'ensoleillement et la température pour l'année moyenne, la canicule et la vague de froid à Uccle 221
11.10 Conditions intérieures dans le living et les chambres - moyennes journalières pour un mois froid typique 223
11.11 Conditions intérieures dans le living et les chambres - moyennes journalières pour un mois froid extrême 224
11.12 Conditions intérieures dans le living pour deux cas étudiés - valeurs horaires 225
11.13 Part des gains internes et solaires dans la demande de chaleur pour le cas *Passivhaus* durant la semaine la plus froide d'une année typique 225
11.14 Confrontation d'une division irrégulière d'un plan type et de 3 principes de façade 228
11.15 Simulation de l'éclairage artificiel dans un concept de flexibilité maximale 230
11.16 Exemples de concepts de flexibilité raisonnée 231

11.17 Facteur lumière du jour pour le niveau 2 de flexibilité raisonnée 233
11.18 Simulation de l'éclairage artificiel dans un concept de flexibilité raisonnée - niveau 1 234
11.19 Simulation de l'éclairage artificiel dans un concept de flexibilité raisonnée - niveau 2 235
11.20 Consommation relative d'énergie primaire pour un bureau individuel classique en fonction de l'orientation et du dessin de la façade 236
11.21 Combinaison du potentiel d'une architecture, des exigences de l'occupant et d'une performance énergétique visée 238

13.1 Etapes du processus de management du risque 257
13.2 Enchaînement des risques liés à l'objectif de haute performance énergétique 261
13.3 Relevé des demandes de chaleur des logements étudiés dans le projet Cepheus 264
13.4 Prévision de la consommation d'énergie de chauffage pour un scénario tout électrique ou biomasse, avec mesure d'incertitude 268
13.5 Cas d'étude pour l'analyse des gains internes et solaires 271
13.6 Cas d'étude pour l'analyse des gains internes et solaires - comparaison à CALE 272
13.7 Cas d'étude pour l'analyse des gains internes et solaires - gains internes 272
13.8 Variations des gains solaires et internes en fonction du besoin de chaleur 273
13.9 Comparaison des valeurs mensuelles de valorisation des gains internes et solaires 274
13.10 Analyse de l'erreur relative entre valeurs mensuelles de valorisation des gains solaires selon leur mode d'évaluation 275
13.11 Quatre types de *commissionings* 278
13.12 Proposition de démarche de *commissioning* 279
13.13 Logements L'Espoir, Molenbeek, Atelier d'architecture Carnoy-Crayon, 2010. Plans 282
13.14 Logements L'Espoir, Molenbeek, Atelier d'architecture Carnoy-Crayon, 2010. Vues 283
13.15 Distribution des responsabilités relativement à l'enjeu énergétique aux différents stades de vie d'un bâtiment 284
13.16 Dispositifs de communication entre acteurs de la performance énergétique d'un bâtiment 288
13.17 Logements Savonnerie Heymans, Bruxelles, MDW ARCHITECTURE, 2011. Cour intérieure et esquisse générale 290

13.18 Logements Savonnerie Heymans, Bruxelles, MDW ARCHITECTURE, 2011. Vue intérieure de la loggia bioclimatique . . 291
13.19 Détail des décisions avec impact énergétique selon les étapes de conception : programmation et esquisse 294
13.20 Détail des décisions avec impact énergétique selon les étapes de conception : de l'avant-projet à la déconstruction 295

Liste des tableaux

2.1 Correspondance entre la démarche HQE et les multiples dimensions de l'écologie 27
2.2 Critères d'évaluation de la méthode DGBN 29

4.1 Hypothèses considérées pour l'accroissement des surfaces dans l'étude du CERAA (Coûteaux *et al.*, 2008) 47
4.2 Hypothèses de calcul de l'étude de Verbeeck *et al.* (Verbeeck *et al.*, 2008) 49

6.1 Standard *Passivhaus* : critères et recommandations 92
6.2 Description des projets considérés pour construire les figures 6.2 et 6.3 97
6.3 Réalisations et manquements du standard *Passivhaus* au regard des principes de soutenabilité 103

8.1 Principes acquis dans les parties I et II 137

10.1 Qualité exergétique de différentes applications thermiques . . 177
10.2 Modes constructifs considérés dans l'évaluation du bilan énergétique global de parois 179
10.3 Matériaux considérés dans l'évaluation du bilan énergétique global de parois 180

11.1 Pollutions émises par les différentes sources d'énergie 198
11.2 Description technique de l'appartement étudié 219
11.3 Valeurs météorologiques typiques et extrêmes pour Uccle . . . 220
11.4 Densité d'occupation pour différentes configurations spatiales 232

13.1 Risques liés à l'objectif de haute performance énergétique . . 260
13.2 Nature des responsabilités relatives à l'enjeu énergétique aux différents stades de vie d'un bâtiment 285
13.3 Indicateurs de la valorisation active de l'énergie solaire 298

Chapitre 1

Introduction

1.1 Sujet de cette thèse

La performance énergétique est un aspect de l'architecture particulièrement mis en avant aujourd'hui. Le succès du standard *Passivhaus* et les annonces de bâtiments à énergie positive sont l'émergence visible d'une tendance plus profonde de responsabilisation du secteur de la construction face aux enjeux énergétiques et environnementaux.

Ces aspects environnementaux sont à replacer dans les questions plus larges de développement soutenable. Le caractère politique de cette notion et sa complexité intrinsèque est aujourd'hui reconnue. L'écologie est une question de développement humain autant sinon plus que d'équilibres physiques. L'exposition "Habiter écologique" organisée en 2009 par la Cité de l'Architecture et du Patrimoine a montré que les approches les plus convaincantes de l'architecture qui se veut écologique sont autant le résultat de méthodes de conception renouvelées et d'une relation particulière aux lieux et à leurs habitants que de modes constructifs (Gauzin-Müller *et al.*, 2009).

Ces approches prennent souvent pour acquis la question énergétique. Elles la traduisent en architecture au moyen de principes bioclimatiques ou de standards de performance théoriques. Cette traduction se fait généralement sans remise en cause ni étude de sa liaison avec les autres dimensions du caractère soutenable du projet. Quand des critiques sont formulées, elles portent plus sur des aspects technico-économique que sur des logiques fondamentales. Or l'optimisation dissociée d'une dimension n'est pas une garantie d'une amélioration de la qualité globale d'un projet. Nous constatons donc un manque d'études sur la liaison entre les approches actuelles de l'énergie et la traduction en architecture des enjeux plus larges de développement soutenable.

Dans ce cadre, cette thèse pose la question suivante : *Y a t-il lieu, à la lumière des avancées sur la question de la soutenabilité de l'architecture en général, de rediscuter l'approche actuelle de l'énergie ?*. Nous justifions dans les deux premières parties de cette thèse une réponse affirmative à cette interrogation. Apparait alors une seconde question : *Comment construire une approche de l'énergie cohérente avec l'idée d'architecture soutenable ?* Pour répondre à cette question, nous nous attachons à construire une telle approche au départ d'un nombre limité de principes fondamentaux, socle de valeurs auxquelles nous confrontons les questions énergétiques. Sur cette base, nous proposons à la fois des réflexions générales sur la dimension énergétique de l'architecture et des pistes de travail concrètes originales.

1.2 Un espoir et des craintes - justification du sujet

Nous considérons que l'architecture naît d'une prise de position de l'architecte sur base de la compréhension qu'il a du contexte physique et culturel et des enjeux spécifiques du projet. Idéalement, cette compréhension devrait être exhaustive, profonde et systémique. En pratique, chaque architecte maîtrise plus ou moins bien les différents éléments de contexte et d'enjeu dont il a conscience et définit son projet en fonction du poids qu'il donne à chacun de ces éléments.

La figure 1.1 illustre une représentation de système de conception architecturale (Gruloos, 1996). Cette représentation met en évidence l'architecture comme étant la rencontre, au départ de concepts générateurs, d'un ordonnancement spatial et de systèmes fonctionnels (séparer, occuper, transférer). Les éléments de contexte que nous évoquons se retrouvent parmi les origines de ces concepts générateurs. Ils relèvent tant des éléments de site (un site à considérer dans ses multiples composantes physiques, politiques, sociales et culturelles), des moyens de réalisations (techniques, économiques et méthodologiques) et des systèmes fonctionnels.

Nous posons également qu'il existe des éléments de contexte de deux natures, les uns étant catalyseurs, les autres inhibiteurs. Un élément catalyseur est celui qui élargit le champ des concepts générateurs. Citons par exemple le contexte d'industrialisation à la fin du XIX^{e} siècle, qui a participé à la génération de concepts radicalement neufs, menant à la modernité architecturale. A contrario, l'élément inhibiteur réduit ce champ, poussant à un conformisme ou à la reproduction non créative. Des contraintes réglementaires peuvent relever de cette catégorie. Une *dictature de l'image* qui pousserait à reproduire

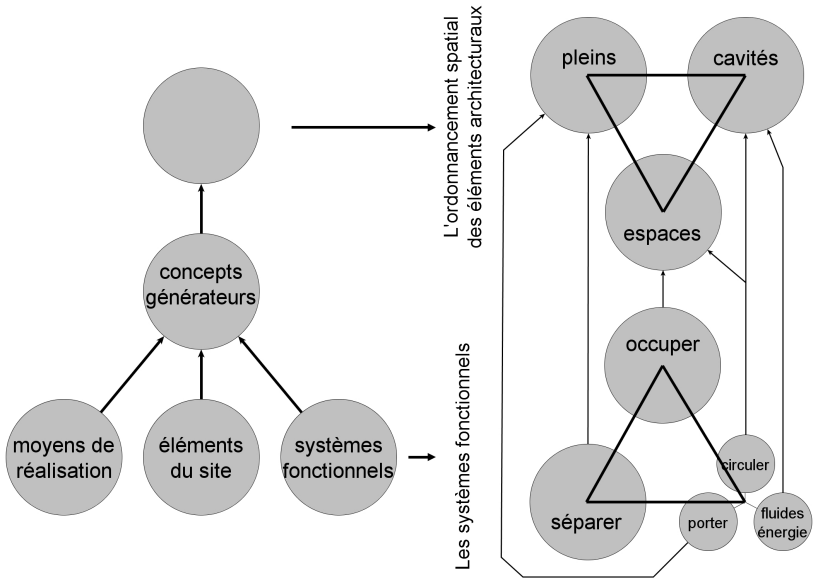


FIGURE 1.1 – Exemple de représentation d'un système de conception architecturale (Gruloos, 1996)

systématiquement un dispositif donné également. Nous considérons qu'un élément ne reçoit son caractère catalyseur ou inhibiteur qu'au travers du regard que porte sur lui le concepteur, un même élément pouvant être pris comme une restriction ou un prétexte à invention.

La dimension énergétique est un des éléments de contexte de l'architecture. Elle se retrouve à la fois au niveau du microclimat, des réglementations et des moyens de réalisations (techniques de production, émission et gestion de l'énergie, dispositifs passifs) et des systèmes fonctionnels (essentiellement les systèmes de transfert de fluides vecteurs énergétiques et de séparation (isolation, filtration)). La capacité de cette dimension à influer sur un projet architectural est évidente. Cette capacité peut être vue tant comme catalysante (voir par exemple le développement de l'architecture *high tech* de Richard Roger, Norman Foster ou Renzo Piano soutenu en partie par un discours environnementaliste) que comme inhibitrice (par exemple une définition réglementaire de ratios tolérés d'ouverture par façade).

Le poids de cette dimension dans l'invention de concepts générateurs est variable d'un architecte à l'autre, selon son appétence pour le sujet, ses compétences en physique et sa connaissance des techniques et dispositifs concernés. Il est cependant certain que la question énergétique prend aujourd'hui un poids particulier dans la définition du projet, du fait de l'enchérissement progressif

des ressources énergétiques, de l'élévation des exigences de confort et du développement d'une conscience écologique globale.

Dans ce contexte de renforcement du poids de la dimension énergétique dans l'architecture, l'évolution rapide des démarches prônant la performance énergétique des bâtiments soulève à la fois un espoir et des craintes.

Un espoir parce qu'elle correspond à une prise de conscience de l'importance de l'effort demandé. Il n'est d'ailleurs pas garanti que ces démarches suffiront, comme cela sera discuté au chapitre 4. De par l'inscription naturelle des questions d'énergie dans les réflexions sur la soutenabilité, la préoccupation actuelle sur l'énergie nous semble une opportunité incomparable pour amener toute la pratique architecturale à intégrer les principes de soutenabilité. On peut donc se réjouir que la question ne soit plus sur le *faut-il ?* des démarches très ambitieuses, mais sur le *quelles sont-elles ?*

Parallèlement, des craintes sont associées aux démarches d'architecture à haute performance énergétique : la crainte que le poids de cette dimension occulte les autres principes générateurs de l'architecture, et à l'opposé, la crainte que ce poids grandissant soit pris en charge par d'autres que l'architecte, le frustrant de la maîtrise de cet aspect de la conception.

Le poids potentiellement trop grand de la dimension énergétique dans la conception peut lui-même être décliné en deux aspects : *Va-t-on vers une uniformisation de l'architecture ?* et : *quelle capacité d'invention de réponses nouvelles laisse-t-on à l'architecte ?* La crainte de l'uniformisation est celle de la création par les exigences de performance énergétique d'un modèle constructif contraignant et non discutable, réduisant les autres qualités de l'architecture. Cette crainte peut en partie être déconstruire par le contre-exemple : il existe une variété de projets à très haute performance énergétique qui présentent une grande qualité architecturale. Qualité énergétique et qualité architecturale ne sont donc pas incompatibles. La crainte d'une limitation de la capacité d'invention de solutions nouvelles est plus difficile à contrer, car une telle capacité n'est identifiable que *a posteriori*. Constatons cependant qu'elle montre déjà que les architectes se soucient effectivement de l'impact énergétique et environnemental de leur projet et souhaitent faire de cette dimension un élément important dans leur travail. Cette crainte d'une limitation de la capacité d'invention est également le symptôme d'un possible mouvement de rejet par les architectes de démarches qui leur seraient imposées depuis l'extérieur de leur discipline. Pour éviter ce rejet, nous pensons que l'accent actuel sur la dimension énergétique de la conception doit être présenté non comme une contrainte performantielle mais comme une opportunité d'invention architecturale. Les

questions énergétiques qui, sans être vraiment nouvelles, sont abordées avec un regard et des outils neufs peuvent comme tout autre principe générateur initier une évolution de l'architecture. Il est cependant possible que ceci impliquera le deuil de certaines formes ou techniques qui ont prévalu ces dernières décennies.

De façon paradoxale, le discours est tout autre du côté des physiciens du bâtiment, pour qui le développement de techniques nouvelles est parfois vu comme une ouverture vers un agrandissement de la liberté formelle. Alors que les démarches bioclimatiques ou solaires des années 1970 et 1980 avaient des conséquences spatiales fortes (nécessaire orientation sud, thermo-circulation, espaces tampons, serres, etc.), les standards actuels tels que le *Passivhaus* se concentrent d'abord sur l'intégration d'une surépaisseur de matériau isolant et d'un système de ventilation mécanique. Il en découle un glissement partiel de l'intégration des aspects énergétiques depuis les phases de conception spatiale vers celles de définition des modes constructifs. S'il survient, ce glissement réduirait le poids des questions énergétiques dans le travail premier de l'architecte. Ceci peut participer à la frustration décrite plus haut face à une réduction de la capacité d'invention. Ce glissement peut être approché du développement de labellisations énergétiques ou environnementales qui prétendent objectiver la qualité physique de l'architecture. Ces approches se focalisent souvent sur les dimensions physiques et techniques du bâtiment, n'intégrant que marginalement la complexité de la conception architecturale. En ce sens, elles ne portent pas un discours complet sur l'architecture (Madec, 2001), et ne valorisent pas une démarche de projet.

N'a-t-on le choix aujourd'hui qu'entre une conception trop contrainte et une conception vidée d'un de ses principes générateurs ? Nous espérons que les réflexions proposées dans cette thèse permettront d'identifier tant au sein des questions énergétiques qu'à leur croisement avec d'autres domaines, des lieux d'invention qui nous préserverons d'un tel choix.

Il nous semble que tant la crainte d'une trop grande contrainte lors de la conception que celle d'une perte de contrôle par l'architecte sous-entendent la peur de voir émerger des artéfacts environnementalement optimisés en lieu et place de projets d'architecture. Tant que l'apparition de tels modèles est ponctuelle et explicitement présentée comme une réponse partielle à la complexité de l'architecture, elle ne nous apparaît pas comme négative. Ces bâtiments expérimentaux permettent d'illustrer une forme possible de l'architecture. Les formes, concepts et dispositifs liés à cette spécialisation de l'architecture intégreront progressivement l'imaginaire des architectes. Ceux-ci, riches de cette nouvelle connaissance, réévalueront le poids de cette problématique lors de

leur définition de concepts architecturaux. Ils se construiront un imaginaire associé combinant cette nouvelle donnée aux autres éléments générateurs, et s'écarteront du modèle tout en l'enrichissant. Dans un tel scénario idéalisé, les modèles peuvent être vus comme des éléments catalyseurs de la conception architecturale.

Un danger réel est par contre que ces modèles soient reproduits sans prise de recul critique. Dans le contexte actuel d'évolution rapide de la dimension énergétique de l'architecture, cette prise de recul pourrait ne pas avoir le temps de se faire. Les nouveaux standards énergétiques sont en passe de connaître une généralisation forcée : démarche expérimentale encore aujourd'hui, le label *zéro-énergie* sera imposé à toute construction neuve en Europe avant la fin de la décennie (Parlement européen, 2009). La généralisation de ces niveaux de performance est donc forcée, en ce sens qu'elle n'est que partiellement une démarche volontaire des architectes. Ces conditions n'apparaissent pas comme optimales pour permettre aux architectes de digérer cette évolution.

Ceci nous fait dire qu'il est aujourd'hui nécessaire de compléter les approches physiques et techniques de la performance énergétique des bâtiments par un discours plus proche de l'architecture. Il y a lieu de montrer comment la question énergétique peut être intégrée au travail de conception. Dans cette optique, cette thèse ne se limite pas à un travail d'analyse. Elle développe une proposition d'approche de l'énergie en architecture qui en fait un objet de *projet*. Ce faisant, nous cherchons à construire une approche de l'énergie qui en fasse un ressort de création pour l'architecte et non une contrainte extérieure. Nous partageons en effet l'idée que "nous ne pouvons permettre que la durabilité soit réduite à une affaire de mode ou mesurée en fonction de normes technologiques. La durabilité constitue une responsabilité sociopolitique, qui doit relever les nouveaux défis qu'affronte l'humanité [...]." (Contal et Revedin, 2011). Relever les défis énergétiques en architecture passe, selon nous, par une prise en main de ces questions par l'architecte et non par la normalisation et le développement d'un catalogue de technologies.

1.3 Structure et postulats

La première partie de cette thèse vise à poser certains éléments nécessaires à sa compréhension. Les éléments de contexte développés sont l'évolution historique de l'idée d'architecture écologique (chapitre 2) et l'émergence d'une architecture soutenable (chapitre 3). Nous y exposons également l'ampleur de l'ambition devant être affichée en termes de performance énergétique des bâtiments (chapitre 4).

La deuxième partie constitue une analyse plus précise de l'état de l'art en physique du bâtiment. Nous y effectuons la reconnaissance de la complexité de ce domaine (chapitre 5) et développons une analyse originale des démarches *Passivhaus* et *bâtiment net zéro-énergie* (net-ZEB). Nous y montrons en quoi elles ne sont pas capables de traduire la définition d'architecture soutenable que nous nous donnons. Le dernier chapitre de la deuxième partie (chapitre 8.1) est l'occasion de revenir une première fois sur les deux questions énoncées dans cette introduction et de répondre positivement à la première : y a t-il lieu, à la lumière des avancées sur la question de la soutenabilité de l'architecture en général, de rediscuter l'approche actuelle de l'énergie ?

La troisième partie propose une réponse à la seconde question de cette thèse : Comment construire un approche de l'énergie cohérente avec l'idée d'architecture soutenable ? Cette réponse est construite sur base des principes fondateurs de l'architecture soutenable détaillés dans le chapitre 3.

L'objet de cette thèse n'est donc pas la définition de l'architecture soutenable. La définition que nous en retenons est donnée au chapitre 3. Il ne s'agit pas non plus de déterminer la forme concrète de cette architecture, ni de réaliser des bilans environnementaux ou soutenables de techniques liées à la gestion énergétique. Entre la définition, la forme et la technique, nous cherchons ici à identifier des moyens d'émergence d'une approche soutenable de la question énergétique en architecture, en espérant que par rebond ce travail contribuera à l'émergence d'une architecture soutenable.

Prenant en compte l'objectif de soutenabilité et la complexité de l'architecture, nous faisons deux postulats. Le premier est que la modification actuelle de notre rapport au monde doit entraîner une modification de la conception que nous avons de l'architecture. L'enjeu aujourd'hui est de voir comment cette modification permet de réinterpréter les fondamentaux de l'architecture. Cette thèse participe à cet effort. Elle part de la question de l'énergie et des nouvelles pratiques énergétiques pour envisager le futur d'une approche où l'énergie et l'écologique sont plus explicitement liées à l'architecture. Elle manifeste donc l'envie de participer au passage de la notion d'architecture soutenable à celle d'architecture, sans qualificatif. Derrière cette envie, il y a la conviction que la pertinence écologique est un élément de la définition et de la qualité de l'architecture d'aujourd'hui. En d'autres mots, il n'existerait pas une architecture durable à opposer à une architecture non durable, toutes deux potentiellement équivalentes en qualité mais au positionnement politique différent. Nous pensons qu'il n'y a qu'une pratique architecturale de qualité qui, en phase avec son moment, se doit d'être une recherche de soutenabilité. Celle-ci se démarque alors de pratiques constructives autres qui, par un refus d'aborder cette ques-

tion, se mettent à l'écart de la transformation culturelle en cours et perdent une grande partie de leur pertinence culturelle.

En lien avec ceci se place un second postulat, à savoir que l'architecture est le *cadre modelant* du mode de vie. Nous partons du principe que le mode de vie n'est pas un tabou dès lors que l'on vise la transition écologique globale des sociétés. Il s'agit d'un des paramètres pouvant être activés face aux enjeux écologiques, une société durable se construisant sur base de modes de vie durables dans un cadre adapté. Cette idée de l'architecture comme cadre modelant est argumentée par le principe de participation énoncé en accompagnement de la définition de l'architecture soutenable (chapitre 3). Elle est également en lien avec des positions affichées par différents architectes et penseurs au cours de l'histoire qui mettaient en avant la capacité de l'architecture ou de l'art à influencer la pensée. Citons par exemple l'Abbé Suger qui décrit les vitraux de Saint-Denis comme une réalisation "qui nous pousse à nous élever du matériel à l'immatériel" (Suger, 1145). Plus proche de nous, on attribue à Henry Van de Velde l'objectif d'augmenter la conscience esthétique de la société (Léonie Beiersdorf, 2007) et de mettre l'art au service de la société (Frampton, 2007). Plus concrètement, les projets de Carin Smuts en Afrique du Sud sont présentés comme des prétextes à une démarche de développement local intégré plus que comme des édifices (Contal et Revedin, 2009). Enfin, Giancarlo Mazzanti affirme que "le but ultime de l'architecture est la promotion du bien-être social et la construction d'une société plus juste et plus durable. [...] En eux-mêmes, les espaces cherchent à faire œuvre sociale et pédagogique" (Giancarlo Mazzanti cité dans (Contal et Revedin, 2011)).

Il ne s'agit pas ici de donner à l'architecture un rôle démesuré - l'homme reste libre d'agir quel que soit son cadre de vie - ou de viser une utopie sociale au travers de l'architecture. Si les mouvements d'architecture écologique ont généré leur lot d'utopies (voir par exemple les projets de Paolo Soleri dans les années 50 et 60), le recul force à constater que ces modèles n'essaiment guère. Il n'en reste pas moins qu'il semble illusoire de prôner un changement de mode de vie dans un cadre inadapté.

Le projet d'architecture est donc un lieu propice à la réflexion sur le mode de vie et l'occasion de sa transformation. Nous reprenons ici l'exemple donné par Damien Franzen (bureau d'architecture FHW) dans son dossier de candidature au Plea Award 2011 :

> "Il est de plus en plus fréquent qu'on nous demande de prévoir une salle de bains pour chaque enfant et de prévoir une isolation acoustique importante des chambres d'enfants. Cette attitude tra-

> duit une grande préoccupation du confort des enfants qui est tout à fait louable mais qui peut aussi revêtir un effet pervers. L'enfant a en effet le sentiment qu'il peut, au sein de la famille, disposer de toutes les libertés. Il ne doit plus - ou presque plus - composer avec des impératifs liés à la vie ensemble. Nous avons l'impression qu'il s'agit là d'une transcription dans l'architecture de l'évolution de la société actuelle que nous devons questionner. L'architecture doit-elle en effet uniquement s'adapter à l'évolution ou a-t-elle le devoir de questionner le mode de fonctionnement de la société en proposant de mettre en valeur d'autres modes de fonctionnement, y compris dans le noyau familial ?".

Insister sur l'impact de l'architecture sur le mode de vie rappelle que l'architecture doit être centrée sur l'homme et non sur l'environnement. Nous avons aujourd'hui reconnu la place de l'homme dans l'écosystème. A charge pour l'architecture de matérialiser cette place.

Première partie

Contexte général de l’architecture soutenable

Chapitre 2

Jalons de l'architecture verte

De tous temps, l'architecture a pris en compte les dimensions climatiques, et donc énergétiques. Prenons comme témoins de ce fait Vitruve d'un côté (Vitruve, 2004) et l'architecture vernaculaire de l'autre, résultat d'un compromis entre mode de vie, organisation sociale, ressources et contraintes climatiques (Rapoport, 1972). Il est en outre possible de retrouver des éléments de ce que nous appelons aujourd'hui l'architecture écologique dans des réalisations antérieures à l'actuelle prise de conscience des enjeux environnementaux (Steele, 2005). Nous commençons ce chapitre par la présentation des différentes idées que cette notion a pu couvrir au fil des XIX^{e} et XX^{e} siècles. Ceci permet d'introduire la notion d'écologie profonde et l'acception usuelle du développement durable. Nous présentons ensuite une interprétation plus actuelle de l'écologie insistant sur l'intégration de l'homme dans un milieu complexe. L'exposé de cette interprétation est l'occasion d'une illustration originale du caractère limité de nos outils d'évaluation centrés sur les aspects performantiels, particulièrement les méthodes de certification des bâtiments.

2.1 Dimension énergétique aux XIX^{e} et XX^{e} siècles

2.1.1 XIX^{e} et première moitié du XX^{e} siècle

James Steele, dont nous reprenons une part importante des éléments présentés ici, montre qu'une position écologique peut être trouvée dans l'architecture des différents courants des XIX^{e} et XX^{e} siècles, et chez les grands maîtres de l'architecture de cette période (Steele, 2005). L'architecture écologique se base selon lui de tous temps sur trois invariants, que sont un respect croissant pour les connaissances traditionnelles, parfois associées à un mouvement identitaire ou nationaliste, une ambivalence face à la question des technologies et un souci du fait urbain. Il présente ces éléments comme plus importants

que des considérations strictement environnementales lors des manifestations précoces d'une architecture verte. Nous illustrons ce fait par les exemples de l'Angleterre de la fin du XIX^{e} siècle, de la Finlande du début du XX^{e} siècle et de l'Egypte d'après-guerre.

Dès la fin du XIX^{e} siècle, des auteurs dénoncent la course capitaliste à l'enrichissement, rendue possible par l'industrialisation entamée un siècle plus tôt en Angleterre (invention de la machine à vapeur par James Watt en 1765). Notamment, le poète britannique John Ruskin (1819-1900), précurseur du socialisme en Grande-Bretagne et l'écrivain britannique Thomas Carlyle (1795-1881) dénoncent le risque de destruction de la nature, qu'ils voient comme l'œuvre de Dieu. Simultanément, la critique sociale du capitalisme se développe. Un premier mouvement ouvrier de masse (les luddistes) est réprimé violemment en 1813. Le parti politique Labour est créé en 1893. C'est dans ce contexte qu'apparaît le mouvement *Arts & Crafts*, comme une "formule de riposte intellectuelle à la dégradation culturelle causée par l'industrialisation" (James Steele citant Augustus W. N. Pugin (Steele, 2005)). La recherche d'une valeur morale, que l'on pourrait trouver dans le travail artisanal et non dans le produit de l'industrie, est à la base de ce mouvement. S'il ne s'agit pas pour les architectes *Arts & Crafts* de chercher d'abord l'amélioration des conditions de vie des ouvriers, on voit l'alliance objective que ce mouvement peut avoir avec les mouvances socialistes : la réaction au développement de l'industrie et à l'aliénation de l'ouvrier. Cette réaction de rejet de l'industrie sera assez vite nuancée par Mackintosh, qui cherchera une alliance entre connaissance vernaculaire, artisanat, nouveaux matériaux et modes de production, précurseur en cela de l'école Bauhaus. Si une lecture écologique actuelle du mouvement *Arts & Crafts* met en évidence le souci des conditions de travail, la valorisation des savoir-faire locaux et le développement d'artisanats supposés peu consommateurs d'énergie, ces préoccupations ne sont pas explicites à l'époque. La réaction aux conséquences de l'industrialisation a aussi mené au développement des cités-jardins (Bedford Park est créé en 1875). Celles-ci ne rejettent pas l'industrie, mais les conditions de vie urbaines qu'elle engendre, et proposent un retour à la campagne comme le *Arts & Craft* propose un retour aux valeurs prêtées à l'artisanat médiéval. Nulle trace dans ce mouvement de souci de protection de la nature - l'industrie n'est pas mise en cause en tant que telle - ou d'amélioration des environnements urbains existants. Les cités-jardins proposent une reconstruction ex-nihilo qui, bien que généreuse pour ceux qui en profitent, est loin de l'écologie telle que comprise aujourd'hui (Figure 2.1).

L'exemple du *Arts & Crafts* montre la tendance au retour à la tradition, face à la modernité. Ce retour à la tradition est aussi généré par des mouvements nationalistes. James Steele associe le développement de l'architecture

FIGURE 2.1 – Vue et plan de Bedford Park, Londres, Richard Norman Shaw, 1879 (Source : www.studyblue.com) : une nature recréée sous forme de jardins d'agrément.

finlandaise au début du XX^{e} siècle à la lutte pour l'autodétermination de ce pays face aux Suédois et aux Russes. La recherche d'un style architectural qui leur soit propre aurait poussé les architectes à redécouvrir leur architecture vernaculaire. Pas de rejet de l'industrie ou de la modernité ici qui, au contraire, sont des outils de développement de la nation. Il en résulte, par exemple au sanatorium de Paimio (1929) ou à la bibliothèque de Viipuri (1935) d'Alvar Aalto, une architecture résolument moderne, ouverte sur le paysage et intégrée à une nature encore sauvage et omniprésente (Figure 2.2). Une analyse proche est proposée pour le développement des *prairie houses* et *usonian houses* de Frank Lloyd Wright, en tant que recherche, par l'analyse du paysage et du climat, d'un style proprement américain.

Dans un tout autre contexte, James Steele présente comme nationaliste la recherche par plusieurs architectes du tiers-monde de modes constructifs locaux, économiques et réalisables par une main d'œuvre locale peu formée. Un cocktail que ne rejettent pas les écologistes actuels. L'identification de ces modes constructifs pousse nécessairement à considérer les matériaux naturellement présents dans l'environnement (la terre, le bois) et traditionnellement utilisés dans l'architecture vernaculaire. Un choix de matériaux remis aujourd'hui en avant par les analyses de cycles de vie. James Steele voit dans ces recherches une tentative d'affirmation des populations du sud face à un style international occidental plutôt qu'une conscience environnementale. Au travers de l'architecture, c'est l'occident lui-même et sa politique coloniale de négation de la tradition locale qui sont visés. Ainsi en va-t-il du travail d'Hassan Fathi en Egypte. Lorsque Fathi choisit la terre, c'est par opposition au béton importé. Notons que ce rejet des formes importées n'est pas non plus nécessairement un rejet de la modernité ni un retour inconditionnel à des formes passées. L'architecture de Fathi est moderne, de même que celle de Balkrishna Doshi en Inde.

Les réactions à l'industrie et à la modernité, combinées à des mouvements nationalistes, ont donc engendré des modes constructifs présentant des familiarités avec l'architecture écologique actuelle. Mais il s'agit bien là de réactions et non d'une pensée construite au départ de l'environnement, qui ne viendra qu'après la modernité. "La préoccupation pour l'environnement n'était pas une priorité pour les architectes entraînés dans une aventure épique de découverte. Construire selon les traditions et des convention historiques [...] fit l'objet d'une polémique chez tous ceux qui croyaient y voir un obstacle sur la route d'un futur plus heureux et scientifiquement déterminé." (Steele, 2005).

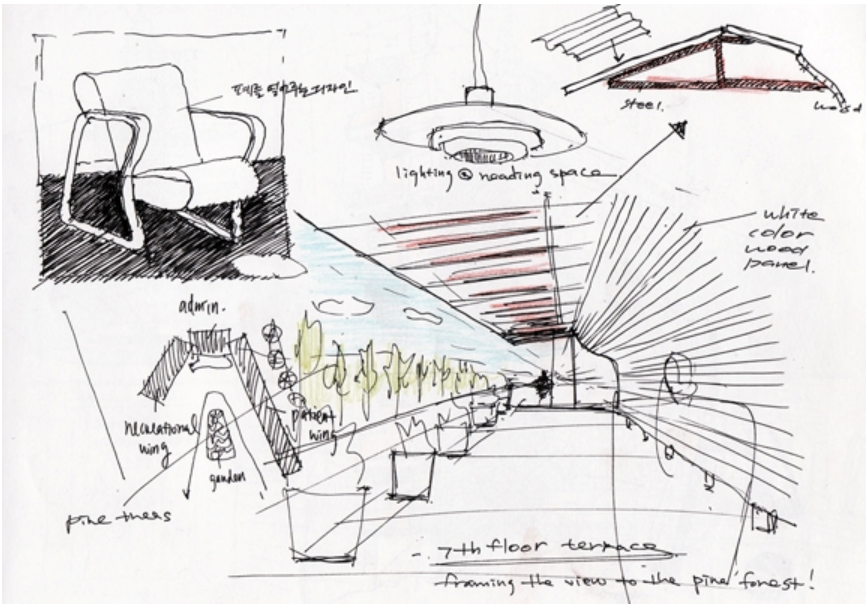


FIGURE 2.2 – Croquis du Sanatorium de Paimio, Alvar Aalto, 1929, ©Jae Park, illustrant son ouverture sur le paysage.

2.1.2 Seconde moitié du XX^e siècle

Une réflexion purement environnementale comme source d'architecture apparaît dans la seconde moitié du XX^e siècle et prend au fil du temps plusieurs formes. Il s'agit d'abord d'une peur face à un environnement dont on commence à percevoir qu'il pourrait, du fait de l'homme, subir des modifications irrémédiables et dangereuses. Il s'agit essentiellement de peurs liées à l'apocalypse nucléaire et à la surpopulation. Ces peurs vont générer des projets utopiques, mêlant forme architecturale et modifications des règles sociales, souvent dans des climats extrêmes (voir à ce sujet les projets de Paolo Soleri à partir des années 50, dont le projet de communauté écologique Arcosanti - Figure 2.3 - ou les dômes de Richard Buckminster Fuller dans les années 60). Ces positions extrêmes forcent le développement d'une architecture adaptée à son climat. Gains solaires passifs et ventilations naturelles sont alors particulièrement mis à l'honneur, via ce qu'on appellera une architecture solaire ou climatique, forcément au moins partiellement contextuelle et radicalement démarquée du style international. Le constat que l'environnement est constitué de risques et potentiels, de forces à utiliser et d'autres dont il faut se protéger est la base de l'architecture climatique. Le "Common Language for sustainable construction" définit un design solaire passif comme ceci (European Concrete Platform et Architects Council of Europe, 2012) :

> "Refers to the specific design approaches that use the sun's energy for the heating and cooling of occupied spaces in buildings. The building itself or some element of it takes advantage of site characteristics, building orientation, the properties of the materials used and air flows to maximise the benefits that the sun can bring in creating a comfortable, energy efficient environment. The use of Passive Solar Design ensures that a structure makes best use of 'free' solar energy through the careful positioning and orientation of a building and the internal spaces, windows and structures. Such approaches rely on systems that are simple, have few moving parts, require minimal maintenance and require no mechanical systems."

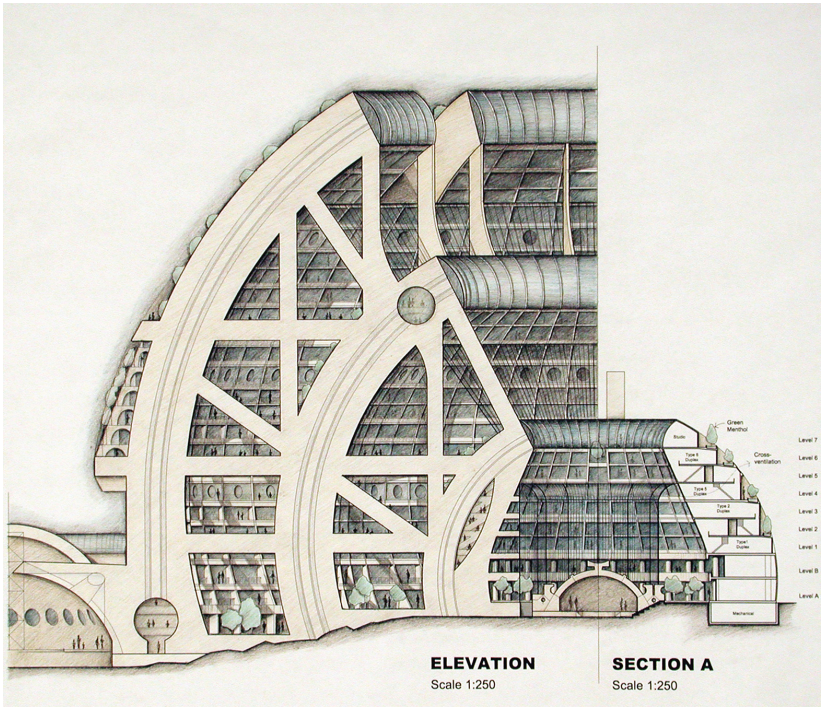
Apportant une certaine nuance à cette approche par une intégration plus explicite de l'occupant, l'architecture bioclimatique se définit comme suit (André De Herde in (Paige *et al.*, 1986)) :

> "Une architecture intégrant dans ses dimensions fondamentales le dialogue étroit entre l'architecture et son environnement. Ce dialogue met en présence des éléments complexes et dynamiques, comme les cycles naturels et les rythmes de vie, qui varient et s'interfèrent dans l'espace et le temps."

Loin d'être l'apanage des utopies écologiques, les principes de l'architecture climatiques ont été utilisés par les maîtres du mouvement moderne pour assurer le confort des habitants à une époque où les techniques de climatisation mécanique étaient encore peu développées. Citons par exemple la maison Sarabhai à Ahmedabad de Le Corbusier (1952) et le projet de consulat américain à Luanda de Louis Kahn (1962) , ou Taliesin West de Frank Lloyd Wright (1937).

Il n'en reste pas moins que selon nous cette architecture climatique n'est pas, à proprement parler, une architecture environnementale au sens où on l'entend aujourd'hui. Son objectif est d'utiliser les forces naturelles du climat pour offrir à l'homme une vie confortable dans un environnement hostile et/ou pauvre en ressources. Par contre, il ne s'agit pas explicitement de protéger l'environnement lui-même de l'action de l'homme.

Bien que les chocs pétroliers des années 1970 viennent renforcer ces mouvements, les utopies de cette période n'auront que peu de suites concrètes. Ces architectures auront cependant éveillé l'intérêt des physiciens, ingénieurs et



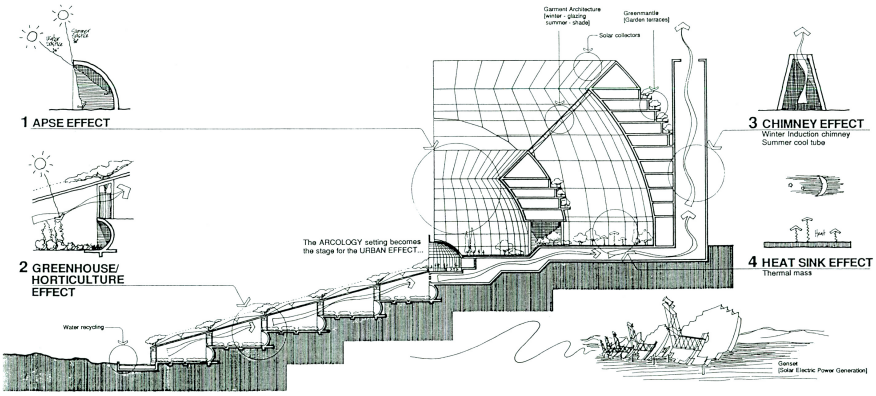


FIGURE 2.3 – Sections et principes bioclimatiques du projet Arcosanti, Arizona, Paolo Soleri, 1970 (Dessins ©Arcosanti Archives). Outre les aspects bioclimatiques, le projet Arcosanti est une expérience sociale écologique en milieu extrême.

architectes pour la physique du bâtiment, et par là lancé l'étude scientifique de l'architecture écologique. Les premiers ouvrages sur l'architecture solaire sont publiés à la fin des années 1970 (notamment (Mazria, 1979) ou (Butti et Perlin, 1980)). Des architectes comme Sir Richard Rogers, Norman Foster, Nicholas Grimshaw ou Michael Hopkins exploiteront les principes de l'architecture climatique dès les années 1970, créant un courant *technologique* parfois opposé à des démarches plus *passives* telle que celle d'Edward Mazria. Signalons en passant que la peur suscitée par les évolutions de l'environnement, qui était le premier moteur de développement de l'architecture solaire n'a pas entièrement disparu malgré la fin de la guerre froide. Ainsi, James Wines prédit que l'iconographie architecturale des prochaines décennies viendra du désarroi face aux catastrophes à venir et du besoin d'un *retour à la terre* rassurant (Wines, 2002).

La notion de protection de l'environnement apparait à cette période. Greenpeace est fondé en 1971, le rapport Meadows est publié en 1972 et la même année a lieu la première Conférence Internationale sur l'Environnement Humain à Stockholm. Cette évolution part de constats locaux de pollutions et destructions irrémédiables du patrimoine naturel, ainsi que de projections à l'échelle planétaire des conséquences du développement humain. Les notions de dérèglement climatique (le GIEC est créé en 1988) et de déséquilibres des relations Nord-Sud (la distinction entre nations du Nord et du Sud apparaît en 1980 (Brandt, 1980)), viennent confirmer l'échelle planétaire des enjeux de cette fin de siècle. Cette prise de conscience aboutira à la notion de développement durable, ou soutenable, qui regroupe ces différents thèmes en une acception unique et assoit l'échelle à la fois globale et locale des réponses à y apporter.

Le développement soutenable tel que défini par le rapport Bruntland en 1987 (Brundtland, 1987) et repris par la déclaration de Rio en 1992 (United Nations Environment Programme, 1992) vise à concilier développement et gestion des ressources d'une part et équilibres physiques et sociaux à l'échelle du globe d'autre part. En termes d'architecture, la notion de développement durable complète l'approche bioclimatique (profiter et se protéger du climat et par extension de l'environnement) en insistant sur les conséquences des choix (protéger et enrichir l'environnement par le projet). Cette notion peut cependant être encore étendue et aller plus loin que la simple gestion de ressources. Si on explore la subtilité des principes associés, elle peut mener à une remise en cause des actions, des méthodes de pensées et des modes d'organisation de la société. De même, la prise en compte des relations à double sens entre nos actions et nos ressources peut être étendue aux relations entre nous-mêmes, en tant que hommes, et notre milieu. C'est en ce sens que nous parlons d'architecture soutenable dans cette thèse (voir le chapitre 3). Cette vision n'est

cependant pas strictement celle proposée par la Déclaration de Rio, qui considère avant tout la préservation et le partage des ressources mondiales.

Le développement durable demeure pour certains dans une vision utilitariste de la nature : le monde serait une ressource à protéger pour assurer l'alimentation et le développement à long terme d'une humanité dépassant un seuil critique sous lequel son développement n'avait pas de conséquences globales. En parallèle, on constate l'apparition de mouvements de valorisation de la nature en tant que telle, notamment l'*écologie profonde* théorisée par Arne Naess en 1973 (Naess, 1973). Cette pensée propose de reconnaitre à tous les êtres vivant une valeur intrinsèque. "Tandis que l'écologie classique pose la satisfaction des besoins humains comme finalité (anthropocentrisme) et attribue au reste du vivant le statut de ressource, l'écologie profonde réinscrit les finalités humaines dans une perspective plus large, celle du vivant (biocentrisme) afin de prendre en compte les besoins de l'ensemble de la biosphère, notamment des espèces avec lesquelles la lignée humaine co-évolue depuis des millions d'années." (Wikipedia, 2013) L'écologie profonde part de l'idée que tant la vie humaine que la vie non humaine ont une valeur intrinsèque. Elle fait en outre le constat suivant : le droit des humains à détruire la vie non humaine se limite à la satisfaction de ses besoins vitaux. Or l'action actuelle de l'homme est excessive.

Considérant que l'épanouissement de la vie humaine est compatible avec une baisse substantielle de la population, l'écologie profonde en vient parfois à suggérer un repli de l'humanité, par une réduction de sa taille, pour permettre à la nature de prospérer. En cela la vision proposée par l'écologie profonde relève d'une idée de juxtaposition de l'humain et du non humain, qui est contraire à la vision actuelle de l'écologie présentée ci-après. Les conséquences architecturales des idées de l'écologie profonde sont peu présentes dans l'analyse de James Steele, un peu plus dans le travail de James Wines au travers d'exemples de manifestations de la relation conflictuelle entre nature et architecture (voir par exemple les projets de SITE pour les magasins BEST). Théoriquement, les traductions architecturales des idées de l'écologie profonde pourraient être :

- une position en retrait de l'architecture face aux éléments vivants préexistants ;
- la place laissée au vivant dans l'architecture, le bâtiment devenant support de vie ;
- et une tendance à l'hyper-densification comme réaction à l'étalement urbain destructeur d'écosystèmes.

Il semble cependant que l'idée de repli de l'homme face à une nature reconquérant ses droits est peu porteuse d'un imaginaire architectural, l'acte de construire étant nécessairement une forme d'affirmation de l'homme dans un contexte.

2.2 Situation actuelle

La pensée écologique contemporaine n'est cependant plus celle de l'écologie profonde, sans pour autant revenir à une vision anthropocentrique. L'écophénoménologie, apparue à la fin des années 1980 comme suite à l'écologie profonde tente de se situer par-delà le partage du monde en culture et nature. Elle propose d'étudier les éléments fondamentaux de l'expérience humaine avec le monde. La crise environnementale serait à la fois une question géophysique et métaphysique, appelant à une reconceptualisation des relations humaines avec la terre, pour se détacher de l'image d'un monde utilitaire. L'écologie actuelle donne donc une sortie par le haut entre l'idée de gestion et partage durable des ressources et la valorisation de la nature pour elle-même, cette sortie par le haut étant possible par l'idée qu'il existe une relation particulière entre l'homme et le monde. Cette synthèse nous semble proche de l'idée d'écologie au sens scientifique du terme, à savoir l'analyse des relations entre éléments d'un milieu vivant, et de la vision du monde comme un système complexe. Dans ces deux notions, l'homme est vu comme un élément tout entier plongé dans un ensemble plus vaste construit par des relations entre éléments vivants et inertes. Chacun des éléments de ce système a une valeur propre, mais également une valeur venant de la place de l'élément dans le système et de son rôle dans son harmonie. Certains auteurs, tel qu'Augustin Berque, montrent par leur analyse de la relation entre culture et environnement que notre immersion dans un milieu est bien constitutive de l'ensemble de notre humanité (Berque, 2009). Cette insistance sur la relation entre éléments n'était pas centrale dans l'écologie profonde et l'idée que l'homme est tout entier plongé dans un tissu de relations le descend du piédestal où il pensait se trouver.

Une telle vision de l'homme comme un élément agissant dans un tissu de relations ouvre des portes à l'architecture qui dépassent les questions de gestion des ressources. James Wines affirme que "L'architecture peut devenir la science des rapports et de la communication, plutôt que de la protection" (Wines, 2002). Cet auteur, se concentrant sur des réalisations pour la plupart postérieures au premier choc pétrolier, analyse l'architecture *verte* au travers de sa relation avec le paysage, de ses emprunts explicites aux formes naturelles (il présente les réalisations de Peter Vetsch ou Arthur Quarnby comme

un design investi de responsabilité morale, dictée par un géocentrisme et une conception écologique du rôle de l'humanité dans la nature (figure 2.4 page 24), de la compréhension de la relation homme-nature, notamment au travers de l'art, et enfin de l'urbanisme présenté comme une possibilité de fusion avec le cadre naturel, bâtiment et nature formant une symbiose géologique plutôt qu'un contrepoint formel au paysage. Dans nombre des projets qu'il analyse, la réalisation humaine est affirmée mais harmonieuse avec son milieu. Cette harmonie ne tient pas uniquement en une implantation tenant compte de la topographie, du climat et du paysage, autant de ressorts classiques de l'architecture, mais également en ce qu'elle intègre une dimension environnementale dans ses moyens et surtout dans son message. Ces projets relèvent en partie de manifestes politiques ou métaphysiques invitant à questionner le rôle de l'homme dans son milieu. James Wines pointe cependant qu'il n'y a pas aujourd'hui de consensus sur la place exacte de l'homme dans la nature, et donc pas une architecture écologique uniforme. Les réalisations des années 1990 se réclamant de l'écologie souffrent en outre, selon lui, d'un élitisme économique et tombent souvent dans les excès de la mode, faute d'une réelle pensée environnementale. En réaction, James Wines appelle à une approche allant au-delà des techniques vertes, qui ne sont qu'un emplâtre, pour repenser en profondeur les questions artistiques et philosophiques de l'architecture, en prenant en compte les dimensions métaphysiques, phénoménologiques et symboliques de la relation homme-monde (Wines, 2002). Dans l'analyse de James Steele, on voit également des projets illustrant cette notion d'intégration de l'homme dans son milieu, mais surtout *en creux* : parlant de la révolution numérique, il met en évidence une distance de plus en plus grande entre l'homme et la nature, et plus largement son environnement physique. L'hyperurbanité, la connexion des centres urbains en un maillage de relations économiques et culturelles facilitées par la révolution numérique coupent selon lui une part importante de la population de son milieu.

Mais il y a également aujourd'hui une approche uniquement performantielle de la question environnementale. Bien loin de l'appel de James Wines et du dépassement de l'anthropocentrisme, se sont développés des outils d'objectivation des impacts environnementaux de l'architecture qui bien souvent sont considérés comme suffisants pour prétendre au titre d'architecture écologique ou durable. Nous voyons à cette approche performantielle des racines anciennes, dans le scientisme et la confiance que l'homme porte en des réponses technologiques aux défis qu'il rencontre. Cette confiance a pris diverses formes avec les temps. Les premières maisons zéro-énergie sont la MIT Solar House I (Butti et Perlin, 1980) en 1939 et la Bliss House en 1955 (Bliss, 1955), pour lesquelles l'ajout de quelques capteurs solaires sur des maisons typiques de cette époque semble suffire à résoudre une fois pour toute les besoins en éner-

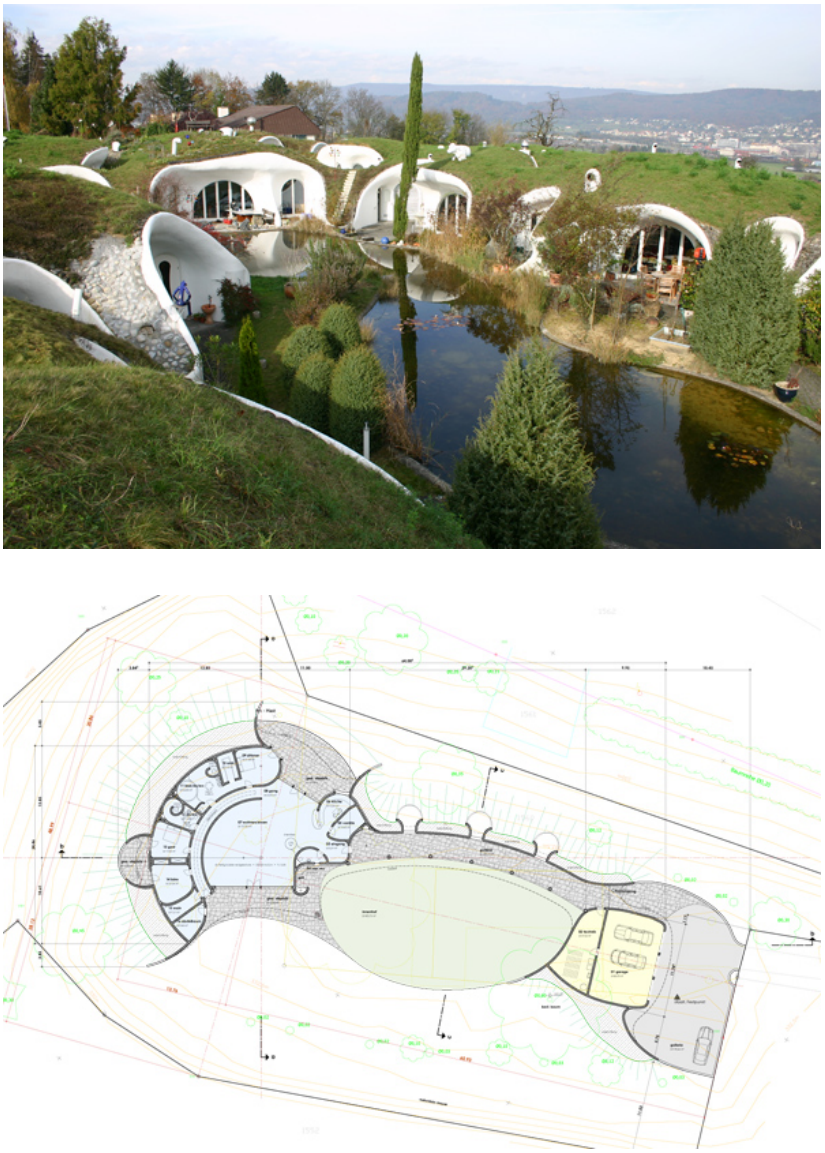


FIGURE 2.4 – Earth House Estate Lättenstrasse, Peter Vetsh, 1993 et Earth House Estate, Arni, Peter Vetsh, 1987, Peter Vetsh (photo et plan ©Peter Vetsh) : projets-manifestes symbolisant une intégration physique de l'homme dans un milieu incluant le monde naturel.

gie (voir figure 7.1 page 122). Mentionnons ensuite l'architecture *high-tech* qui, dans les années 1970 et 1980 a basé une part importante de sa justification sur les questions de gestion climatique et d'impact environnemental. Aujourd'hui, nous voyons dans les démarches *Passivhaus* et bâtiments zéro-énergie des manifestations de ces approches, constat que nous développons dans les chapitres 6 et 7. Cette tendance se marque aussi dans le développement important des normes de calcul et des réglementations performantielles liées à la physique du bâtiment, telles que la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (Parlement européen, 2002a).

Il convient de ne pas caricaturer la réalité de ces approches technicistes. Elles sont souvent utilisées comme compléments utiles à des positions plus profondes des architectes qui s'en revendiquent. Notre critique a trait à leur caractère incomplet et non à la justesse des développements qu'elles permettent. Mais on peut néanmoins pointer dans certaines icônes de cette architecture des positions ou des dispositifs symptomatiques d'une attitude qui n'intègre pas l'homme à son milieu. Par exemple, une idée récurrente de l'architecture high-tech est l'utilisation de la technologie pour gérer les échanges énergétiques entre un climat dynamique et un *cocon climatisé*. Symboliquement, cette façon de faire associe au monde extérieur une valeur négative, comme si le climat naturel n'était pas propice à la vie de l'homme. Cette attitude n'est pas sans rappeler les utopies post-apocalyptiques de Buckminster Fuller. On est loin de l'idée d'une ambiance intérieure évoluant, dans certaines limites, au gré des rythmes journaliers ou saisonniers, et de modes de vie intégrant ces variations dans leur propre rythme.

Une autre manifestation des approches performantielles se trouve dans les référentiels environnementaux (Breeam, Leed, HQE et autres). Leur situation est cependant plus nuancée. De par leur ambition propre (intégrer toutes les dimensions environnementales), ces référentiels approchent mieux la complexité des questions discutées ici que les labels uniquement énergétiques cités plus haut. Leur volonté d'exhaustivité les a amenés à prendre en compte tant l'effet de l'environnement sur le bâtiment que du bâtiment sur l'environnement. On retrouve en cela l'approche de l'architecture bioclimatique et l'idée première du développement durable (interrelation entre nos actions et notre milieu), avec une insistance sur la multiplicité des enjeux. Ils n'en sont pas pour autant entièrement satisfaisants, d'un point de vue culturel notamment (Madec, 2001). Enfin, ces référentiels intègrent également l'idée que l'homme est un élément du système, mais limitent cette intégration à sa dimension physique. Nous tentons dans le tableau 2.1 page 27 de lier les différentes cibles de la démarche française de Haute Qualité Environnementale (HQE) aux multiples dimensions de l'architecture écologique pointées ici. La dimension intitulée

appartenir physiquement au milieu reflète l'idée d'intégration matérielle de l'homme dans le milieu. L'appartenance *symbolique* reflète l'idée d'une immersion totale, culturelle. Nous n'identifions cette appartenance symbolique dans aucune cible, tandis que l'appartenance physique est pointée dans les cibles suivantes :

- cible 1 : par la création d'ambiances extérieures climatiques, acoustiques, visuelles de qualité et la création d'espaces extérieurs sains ;
- cible 2 : par la notion de capacité d'entretien du bâti, et des produits de construction ;
- cible 6 : par l'idée de faciliter la gestion des déchets ;
- cible 7 : par la question de la facilité d'entretien, de maintenance et de gestion des espaces et techniques ;
- cibles 8 à 14 : par la création d'ambiances climatiques, acoustiques, visuelles, olfactives et sanitaires adéquates.

Pour toutes ces cibles, l'intégration de l'homme au milieu ne dépasse pas son implication physique. A aucun moment une dimension plus large, culturelle ou symbolique n'est évoquée. Ces référentiels sont donc intéressants dans la mesure où ils approchent la complexité des questions environnementales et l'idée d'influences mutuelles homme-milieu, mais ne peuvent être qualifiés d'écologiques au sens plus fondamental décrit ici, ou de durable si l'on accepte d'intégrer dans le principe d'intégration du développement soutenable la dimension culturelle.

A titre de comparaison, nous pouvons également examiner la certification proposée par la Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) initiée en 2007, alors que l'association HQE a été crée en 1996. Elle diffère de la démarche HQE par un système de pondération entre cibles qui renforce la transversalité entre aspects environnementaux, économiques et socioculturels. Chacun de ces aspects compte pour 22.5 % de l'évaluation. La qualité technique du projet compte pour autant et le processus de projet pour 10 %. En outre une cote minimale dans chaque domaine est nécessaire pour obtenir un classement élevé. Une évaluation séparée peut être réalisée pour un site, indépendamment d'un projet. La recherche d'un équilibre entre domaines correspond à une vision large de la durabilité qui englobe la protection de l'environnement. Si les cibles de la démarche HQE se retrouvent dans l'évaluation DGBN, parfois sous des intitulés légèrement différents, cette dernière insiste également sur les aspects organisationnels du projet et fonctionnels du bâtiment. Nous reproduisons au tableau 2.2 les différents critères de l'évaluation DGBN. On pourrait considérer que la cible 32 est une façon d'intégrer l'appartenance symbolique de l'homme au milieu. Nous conservons cependant le

TABLE 2.1 – Correspondance entre la démarche HQE et les multiples dimensions de l'écologie

Cible	Se protéger du milieu	Utiliser le milieu	Protéger le milieu	Enrichir le milieu	Appartenir physiquement au milieu	Appartenir symboliquement au milieu
1. Relation harmonieuse des bâtiments avec leur environnement immédiat	X	X	X	X	X	-
2. Choix intégré des procédés et produits de construction	X	-	X	-	X	-
3. Chantier à faibles nuisances	-	-	X	-	-	-
4. Gestion de l'énergie	X	X	X	X	-	-
5. Gestion de l'eau	-	X	X	-	-	-
6. Gestion des déchets d'activité	-	-	X	-	X	-
7. Gestion de l'entretien et de la maintenance	-	-	-	-	X	-
8. Confort hygrothermique	X	X	-	-	X	-
9. Confort acoustique	X	-	-	-	X	-
10. Confort visuel	X	X	-	-	X	-
11. Confort olfactif	X		-	-	X	-
12. Qualité sanitaire des espaces	X	-	X	-	X	-
13. Qualité sanitaire de l'air	X	-	X	-	X	-
14. Qualité sanitaire de l'eau	X	-	X	-	X	-

conditionnel car la cible 32 peut être comprise comme l'intégration d'œuvres d'art dans le bâtiment sans reconnaître ou apprécier le statut d'artefact culturel de ce dernier.

Cette discussion sur l'intégration des questions culturelles dans les approches environnementales n'est pas gratuite. Car derrière la question culturelle se trouve une part importante des ressorts de la conception architecturale. Le projet n'est en effet pas généré uniquement de contraintes physiques, programmatiques et organisationnelles. La discussion menée ici touche donc à la place des questions écologiques dans l'architecture. Les limiter à une approche performantielle en fait des questions techniques, éventuellement génératrices d'espaces. Les élargir au symbolique et au métaphysique en font des questions plus fondamentales, touchant au cœur de la conception. Nos commentaires sur les démarches HQE et DGBN ne cherchent pas à les déprécier. Elles ne sont pas incompatibles avec une prise en compte d'aspects plus culturels. Nous cherchons uniquement à illustrer le peu de prise en compte actuel de cette dimension dans l'évaluation du caractère écologique des bâtiments.

2.3 Conclusion - L'architecture écologique par inclusion au milieu

Dans ce chapitre, nous avons pu mettre en évidence l'évolution des interprétations possibles d'une architecture écologique. Suivant James Wines, nous reconnaissons dans l'architecture des XIX^{e} et XX^{e} siècles des préoccupations qui sont aujourd'hui vues comme relevant d'une architecture écologique. L'exemple de l'Angleterre de la fin du XIX^{e} siècle met en évidence une préoccupation pour la qualité de vie et une reconnaissance de la valeur des savoir-faire locaux, celui de la Finlande du début du XX^{e} siècle illustre la combinaison de modernité et d'ancrage local et celui de l'Egypte d'après-guerre la valorisation de ressources locales. La seconde moitié du XX^{e} siècle voit paraître un souci explicitement environnemental, allant de la recherche de protection face à un environnement que nos actions ont rendu hostile à une attitude de protection de l'environnement face aux actions humaines. La description de ces attitudes nous permet d'introduire les idées d'architecture solaire et bioclimatique et de démontrer la capacité qu'a la compréhension des phénomènes physiques à générer des formes architecturales.

A une plus large échelle, la reconnaissance de la relation entre l'homme et son environnement mène à l'énoncé des théories de l'écologie profonde et du développement durable. Nous relayons la critique d'une visée utilitariste

TABLE 2.2 – Critères d'évaluation de la méthode DGBN (Schuster *et al.*, 2012)

Groupe principal	Groupe	Critère	Points
Qualité écologique (22.5%)	Impact sur l'environnement local et global	1. Réchauffement climatique	30
		2. Diminution de la couche d'ozone	5
		3. Création d'ozone photochimique	5
		4. Acidification	10
		5. Eutrophisation	10
		6. Risque pour l'environnement régional	30
		8. Autres impacts sur l'environnement global	10
		9. Microclimat	5
	Utilisation des ressources et production de déchets	10. Demande d'énergie non renouvelable	30
		11. Demande totale d'énergie primaire et proportion d'énergie renouvelable	20
		14. Consommation d'eau potable et production d'eau usée	20
		15. Utilisation de surface de sol	20
Qualité économique (22.5%)	Coût sur le cycle de vie	16. Coût sur le cycle de vie du bâtiment	30
		17. Stabilité de valeur	20
Qualité socio-culturelle et fonctionnelle (22.5%)	Performance, santé, confort et satisfaction	18. Confort thermique d'hiver	20
		19. Confort thermique d'été	30
		20. Qualité hygiénique intérieure	30
		21. Confort acoustique	10
		22. Confort visuel	30
		23. Influence des occupants	20
		24. Conception de la toiture	10
		25. Sécurité	10
	Fonctionnalité	26. Barrières à l'accessibilité	20
		27. Efficience des surfaces	10
		28. Possibilité de conversions	20
		29. Accessibilité	20
		30. Confort des cyclistes	10
		31. Garantie de la qualité du design et du développement urbain par un concours	30
		32. Art dans l'architecture	10
Qualité technique (10%)		33. Protection au feu	20
		34. Protection au bruit	20
		35. Performance hygrothermique de l'enveloppe	20
		40. Facilité de nettoyage et de maintenance	20

Continue page suivante

TABLE 2.2 – *Suite de la page précédente*

Groupe principal	Sous-groupe	Critère	Points
		42. Facilité de déconstruction et recyclage	20
Qualité du processus (10%)	Qualité de la planification	43. Qualité de la préparation du projet	30
		44. Conception intégrée	30
		45. Optimisation et complexité de l'approche de conception	30
		46. Mise en avant du caractère soutenable	20
		47. Anticipation de l'usage	20
		48. Chantier	20
		49. Qualité des compagnies exécutantes	20
	Qualité des phases de construction	50. Garantie de qualité des activités de construction	30
		51. *Commissioning* systématique	30
Qualité du site (évaluation séparée)		56. Risques sur le site	20
		57. Environnement du site	20
		58. Image du site et de son voisinage	20
		59. Liaison aux réseaux de transports	30
		60. Proximité de services	20
		61. Infrastructures	20

de l'environnement dans l'acception usuelle du développement durable et associons tant à l'écologie profonde qu'au développement durable l'idée d'une distinction fondamentale entre l'homme et la nature. Par l'exemple des référentiels de construction durable HQE et DGBM, nous apportons une illustration originale de l'absence de réflexion autour d'une inclusion plus culturelle de l'homme dans son milieu. Or, c'est précisément cette immersion totale qui est portée par les approches actuelles de l'écologie.

Nous inscrivant dans cette nouvelle acception de l'écologie, nous pouvons conclure ce chapitre en affirmant qu'il y a lieu de dépasser l'ignorance entre des démarches performantielles, héritières d'une tradition anthropocentrique et conceptualisées par l'interprétation de 1992 du développement durable, et une vision écocentrée qui serait le reflet d'une attitude d'écologie profonde. James Wines propose que la "tâche d'une architecture écologiquement responsable sera d'établir des liens entre la technologie environnementale, les idées philosophiques fondées sur l'écologie et leur traduction dans un nouveau langage visuel" (Wines, 2002). Cette invitation à aller au-delà des techniques pour repenser en profondeur les questions artistiques et philosophiques de l'architecture nous semble cohérente avec cette vision actuelle de l'écologie, pour autant que ce dépassement ne se fasse pas en négligeant les avancées réelles

que permettent les visions performantielles. Leur apport nous semble en effet indispensable pour s'assurer de la justesse des propositions qui ont trait aux enjeux environnementaux de l'architecture. Appliquée à la question de l'énergie, cette conclusion nous invite à étudier les aspects qualitatifs de la performance énergétique sans se limiter aux aspects quantitatifs.

Chapitre 3

Soutenabilité de l'architecture

Dans le chapitre 2, nous avons constaté les multiples interprétations possibles de ce que peut être l'architecture verte, écologique ou soutenable. Il est donc nécessaire de préciser la définition à laquelle nous nous référons dans cette thèse. C'est l'objet de ce chapitre. Nous y décrivons la définition d'architecture soutenable proposée par Krystel De Myttenaere dans sa thèse "Vers une architecture soutenable" (Myttenaere (de), 2006), puis détaillons les principes méthodologiques qui l'accompagnent. Ces principes sont largement utilisés dans la suite de notre travail.

3.1 Définition

Le "Common Language for sustainable construction" donne la définition suivante de l'architecture soutenable (European Concrete Platform et Architects Council of Europe, 2012) :

> "Sustainable Architecture applies Sustainable Development Principles to the design and the whole building/construction process life cycle.
>
> – Environmentally, Sustainable Architecture has as strategic objective to minimise its contribution to the environmental impact effects caused by all the building processes (considered from the initial to the final stages) ensuring that they are reduced to the minimum level that (is sustainable and/or at least to the level that) does not exceeds the ecological carrying capacity of the ecosystem where geographically or temporarily is placed (Considering the ecological carrying capacity as the maximum environmental impact that an ecosystem can support indefini-

tely without deterioration and during the more disadvantageous period of the climatic season and/or conditions) ;
- Economically, it takes a 'whole life' approach to design, construction and life use ;
- Socially, it provide safe places and work with acceptable social conditions integrated into sustainable communities. "

Cette définition se focalise sur la triple dimension environnementale, économique et sociale du développement soutenable. Nous préférons associer à cette notion une portée plus large et retenons la définition selon laquelle une architecture soutenable "[...] fait sens aussi bien envers les enjeux locaux de son contexte que des enjeux globaux de l'humanité." (Myttenaere (de), 2006). Pour "faire sens" face à ces enjeux, il est nécessaire que l'architecture, au-delà d'une pertinence spatiale, technique, programmatique et financière :

- "Intègre les enjeux du contexte spatial dans lequel elle s'inscrit afin de bénéficier de ses atouts et de se protéger de ses limites". On peut voir ici une transcription de l'approche bioclimatique consistant à se protéger des aléas climatiques tout en tirant bénéfice de ses atouts. Mais la seule échelle microclimatique est insuffisante pour parler de soutenabilité. Le contexte spatial est fait d'une multiplicité d'échelles, allant du bâtiment à la ville, la région et le globe. C'est à chaque échelle que la question des atouts et risques doit être posée. Ce qui n'est pas explicite dans cette définition, c'est que cette question doit être posée dans les deux sens. Il faut s'inquiéter de ce en quoi l'environnement enrichit et menace le projet, et de ce en quoi le projet d'architecture enrichit ou menace en retour son contexte. Cette intégration du contexte fait donc du projet d'architecture soutenable le lieu de synthèse de multiples échelles de réflexion et d'un échange mutuellement bénéfique entre l'habitat et le contexte, au travers du bâtiment.
- "Intègre les besoins spatiaux des générations présentes [...] en faisant bénéficier les générations futures des implications que ces espaces pourront avoir sur leur mode de vie." L'architecture soutenable intègre les besoins spatiaux d'aujourd'hui. Il ne s'agit donc pas d'un retour à l'architecture vernaculaire, ou d'une approche techniciste faisant fi des attentes de confort actuelles, tant physiologique que spatial. Mais cette actualité de l'architecture doit combiner une ouverture sur le changement avec une pérennité de sa qualité. Ceci afin que le cadre de vie bâti aujourd'hui conserve le plus intégralement et le plus longtemps possible sa pertinence.
- "Concilie l'être et la matière tout en articulant les différentes échelles spatiales et humaines de l'habiter". Cette proposition affirme qu'habiter

n'est pas une activité mais une réalité ontologique de l'homme. Habiter relève de mécanismes tant spatiaux - se trouver quelque part - que culturels - être quelque part. L'architecture soutenable est consciente de cette double dimension physique et culturelle de l'homme et propose des dispositifs en satisfaisant simultanément chaque terme.
– "S'inscrit dans le triple horizon temporel d'un passé dont elle hérite, d'un présent qu'elle construit et d'un futur qu'elle transmet." L'architecture soutenable s'inscrit dans une échelle de temps. Elle participe au rôle de chaque génération consistant à construire un patrimoine toujours enrichi, tout en prenant conscience de sa propre finalité temporelle.

L'originalité de cette définition est qu'elle présente l'architecture soutenable comme le résultat d'une attitude de l'architecte. Celui-ci est invité à chercher à mettre l'homme en relation avec son milieu naturel et culturel. Le caractère soutenable est dès lors bien plus que le souci de minimiser les impacts environnementaux. Il s'agit d'une posture théorique forte présentant l'architecture comme le médium mettant en relation l'homme et le monde, tous deux appréhendés dans leur globalité et complexité. Cette définition va plus loin que la compréhension uniquement environnementale à laquelle est parfois réduite l'architecture soutenable. Lorsque nous affirmons que l'architecture soutenable se protège des contraintes du milieu et valorise ses potentiels, protège le milieu des implications du bâtiment tout en cherchant à enrichir son milieu, le milieu doit être compris comme étant un ensemble plus complexe que le seul monde physique, pour inclure les dimensions humaines, notamment culturelles.

3.2 Cinq principes pour approcher de la soutenabilité

La définition reprise ici est accompagnée de propositions méthodologiques, dégagées au départ des cinq principes du développement durable définis par le Bureau Fédéral du Plan, organisme belge d'intérêt public qui réalise des études et des prévisions sur des questions de politique économique, sociale, environnementale et leur intégration dans une perspective de développement durable (Commission interdépartementale du développement durable (CIDD), 2000). Ces principes sont eux-mêmes une émanation des 27 principes de la déclaration de Rio (United Nations Environment Programme, 1992). Il s'agit du principe d'intégration des composantes environnementale, sociale, économique, politique et culturelle du développement durable ; du principe d'équité inter et intragénérationnelle ; du principe de précaution et d'incertitude ; du principe de responsabilité commune mais différenciée et du principe de participation.

3.2.1 Principe d'intégration

Le principe d'intégration des composantes environnementale, sociale, économique, politique et culturelle du développement durable stipule que ces composantes de nos sociétés sont en interaction permanente, même si chacune a son échelle temporelle propre. Ce principe pose donc la complexité d'un milieu sous-tendu de logiques paradoxales. Dans ce cadre, le développement soutenable est la recherche non pas de la maximisation d'une composante avec stagnation des autres, mais la recherche d'un optimum global.

Notons que la dimension culturelle n'est pas reprise dans le principe défini par le Bureau Fédéral du Plan. La culture a été présentée comme une des composantes du développement durable par le président français Jaques Chirac lors du Sommet mondial du développement durable à Johannesburg en 2002 (Chirac, 2002). La Commission Française du Développement Durable estime que le concept de développement durable "n'est rien moins qu'un projet de civilisation. Et depuis les débuts de l'humanité, la civilisation est un processus - encore largement inachevé - fondé sur la culture" (Commission Française du Développement Durable, 2002). Nous proposons donc d'ajouter cette dimension culturelle au principe d'intégration. Ceci n'est bien évidemment pas neutre lorsqu'il s'agit de parler d'architecture.

L'idée d'optimum global plutôt que de maximisation disjointe trouve une application directe en architecture. Le projet soutenable est celui qui intègre les multiples dimensions, qui propose une transformation de l'espace simultanément pertinente à tout point de vue. Qualité spatiale, réponse au programme, faisabilité financière, maîtrise de l'impact environnemental, qualité technique, cohérence avec un mode de vie et pertinence du discours culturel doivent converger en un même *projet*. Plus pratiquement, ce principe étaye certaines idées telles que :

- la recherche de mixités fonctionnelles et d'échelles ;
- la valorisation des dimensions environnementales alors même qu'elles semblent hors contexte (telle que l'organisation d'une agriculture urbaine) ;
- l'effet de renforcement entre des pratiques relevant de la dimension sociale et les dimensions économiques et environnementales (architecture participative menant à des projets écologiques basés sur un tissu économique local).

Sur base de ce principe, Krystel de Myttenaere suggère que l'architecte travaille sur base d'un *axe de conciliation*, encourageant l'architecte à transcrire

dans son projet le rapport d'inclusion de l'homme à son milieu, et sa double identité naturelle et culturelle (Figure 3.1).

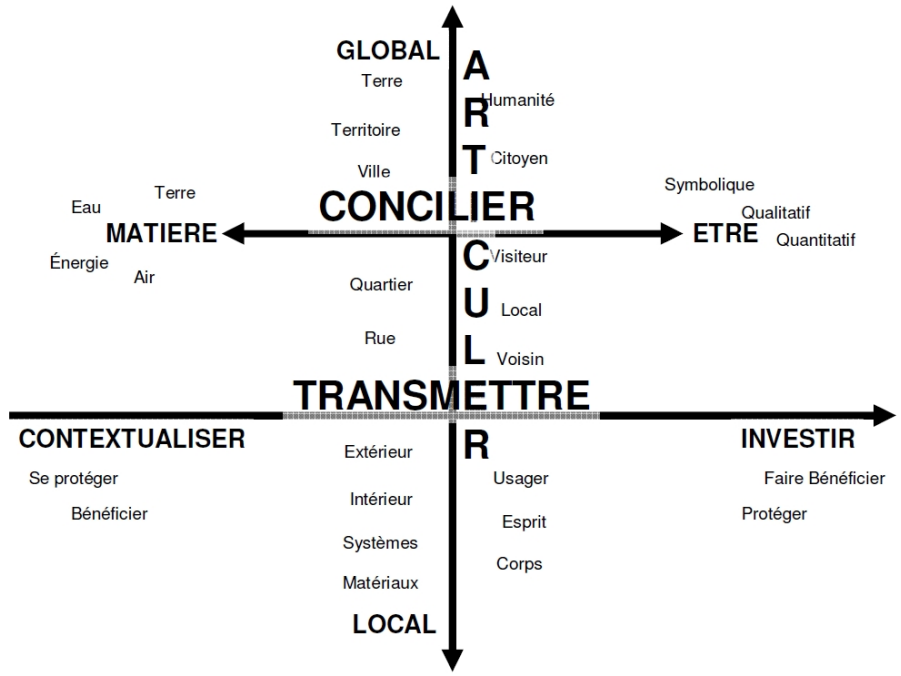


FIGURE 3.1 – Les trois axes de l'architecture soutenable selon Krystel de Myttenaere (Myttenaere (de), 2006)

3.2.2 Principe d'équité inter et intragénérationnelle

Le principe d'équité inter et intragénérationnelle réaffirme les droits des individus présents et à venir à un milieu équilibré. Il dénonce donc le droit à un individu ou un groupe d'individus de détruire ces équilibres pour faire passer ses intérêts propres avant ceux de la collectivité. L'intragénérationnel insiste sur l'échelle spatiale de l'équité, entre Nord et Sud, entre privilégiés et quart-monde. L'intergénérationnel insiste sur le long terme et l'équité dans le temps. Il est souvent illustré par des maximes telles que "nous empruntons la terre à nos enfants" ou "répondre aux besoins présents sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs". Ce principe promeut donc l'articulation des échelles de l'individu, de la société et de l'espèce.

Parlant d'architecture, il s'agit donc de penser le projet aussi bien dans sa dimension spatiale large, par la prise en compte de son site, son voisinage, son

urbanité, sa biosphère, par la gradation des espaces publics, semi-publics et privés, que dans sa dimension temporelle longue par sa qualité patrimoniale et son adaptabilité aux changements.

Alors que le principe d'intégration permet de définir le cadre de réflexion, celui-ci permet d'aborder le niveau d'ambition à rechercher au sein du cadre en question. Tant du point de vue des conséquences environnementales à l'échelle globale (échelle spatiale large) que de la disponibilité à terme des ressources énergétiques (échelle temporelle large), ce principe questionne notre pratique actuelle. Ce principe suggère également des modes d'actions centrés sur les questions d'entretien, de flexibilité, de transformabilité des espaces pour répondre aux besoins futurs et des considérations spatiales d'organisation harmonieuse de la mixité et de l'équilibre entre intimité et vie publique. Ces modes d'actions suggèrent à Krystel de Myttenaere un *axe d'articulation*, croisant l'axe de conciliation déjà identifié (Figure 3.1).

3.2.3 Principe de précaution et d'incertitude

Le principe de précaution et d'incertitude propose de limiter les risques hypothétiques ou potentiels. Il propose de passer d'une notion de responsabilité rétrospective à une responsabilité prospective, la différence entre les deux tenant à la notion d'incertitude quant à l'avenir. Ce principe ne cherche pas à limiter les actions, mais à en prendre la mesure avant que les conséquences concrètes ne soient constatées.

Appliqué à l'architecture, ce principe met en question la dualité apparente entre une architecture labile, instable, éphémère, et une architecture pérenne, et propose la conciliation de ces deux dimensions. Une architecture pérenne, visant des échelles de temps long, se fonde sur des constantes culturelles et locales, en faisant peu de cas de l'appropriation individuelle. A l'opposé, l'architecture labile n'accorde d'importance qu'à des dimensions particulières, sans pensée sur le futur. Elle ne cherche pas à laisser de trace, alors que c'est l'objectif avoué de l'architecture pérenne. L'enjeu aujourd'hui mis en évidence par le principe de précaution et d'incertitude est de vivre dans le présent en accord avec notre passé et en pensant à notre futur. Il nous replace dans une chaine temporelle dont nous sommes un maillon. Le projet d'architecture prend alors un sens de projection sur des échelles de temps variables, et est à même de proposer des dispositifs spécifiques aux durées de vies cohérentes avec chacune de ces échelles. Le projet n'est donc plus monolithique, mais décomposable en couches de temporalités différentes. L'échelle temporelle du changement apparaît, qu'il faut articuler à l'échelle spatiale adéquate pour limiter son in-

certitude relative. Sur cette idée de changement et son corollaire qu'est l'idée de constance, Krystel de Myttenaere suggère que l'architecte travaille ses projets sur base d'un *axe de transmission* (Figure 3.1).

3.2.4 Principe de responsabilité commune mais différenciée

L'architecture prenant en charge un besoin fondamental de l'humanité - la recherche d'abris -, l'architecte se doit d'agir de façon responsable et donc de se référer à une éthique. Il ne peut revendiquer la liberté de l'artiste. Sur base des trois principes précédents et des axes de travail qu'ils dégagent, l'architecte dispose des outils pour juger sa pratique. Le principe de responsabilité l'oblige à les utiliser.

Néanmoins, l'architecte n'est pas le seul intervenant de la conception et production de bâtiments. Citons les ingénieurs, les administrations, les entreprises, les promoteurs, les chercheurs et bien entendu les occupants. Or, le principe de responsabilité affirme la responsabilité commune, partagée entre chaque intervenant, mais différenciée selon les capacités d'action de chacun. Chaque intervenant doit assumer sa part de responsabilité, laquelle est proportionnelle à son autorité dans la prise de décision, mais également à son expertise.

3.2.5 Principe de participation

Le principe de participation place le citoyen parmi les acteurs de la décision. Ceci vise à assurer la cohérence entre le savoir cloisonné ou abstrait et la réalité multiple et concrète du terrain. En architecture, au-delà de la participation des habitants ou riverains à l'élaboration du projet, il faut également considérer la participation du projet à la transformation de l'homme. La participation est à double sens. Le projet s'enrichit de ce que peuvent lui apporter tous les intervenants et cet enrichissement est fait au profit de ceux qui apprennent et sont valorisés par le processus de conception, puis qui bénéficient dans leur vie quotidienne de la qualité du projet.

Le principe de participation insiste donc sur la dimension humaine de l'architecture, dans sa genèse et dans sa visée. Entre *genius loci* et production humaine, l'architecture soutenable présente le projet comme le lieu du dialogue, et non de monologue, entre l'homme et son milieu.

Chapitre 4

Nécessaire ambition

Après avoir posé le cadre de l'architecture écologique (chapitre 2) et idéntifié une définition de l'architecture soutenable cohérente avec ce cadre (chapitre 3), nous pouvons nous arrêter sur le contexte spécifique de la question énergétique en architecture. Nous menons ici différentes réflexions quand aux enjeux de ce contexte sans encore entrer dans les aspects architecturaux, qui feront l'objet de la deuxième partie de cette thèse. Certaines réflexions relèvent de questions à court ou moyen terme, d'autres portent sur des échelles de temps plus lointaines. Ce faisant, elles répondent à l'invitation du principe d'équité inter- et intragénérationnelle du développement durable. Les réflexions à court et moyen termes traitent de l'impact climatique des consommations d'énergie, de la limitation des ressources énergétiques et de la précarité énergétique d'une part importante de la population. Ces différentes sections sont principalement des reformulations d'éléments développés par d'autres auteurs. Les questions à plus long terme sont traitées au travers d'interprétations originales des travaux de deux économistes : Yoichi Kaya, économiste japonais contemporain auteur de la célèbre *équation de Kaya* (Kaya et Yokobori, 1997) et Nicholas Georgescu-Roegen, économiste roumain considéré comme un des théoriciens de la décroissance économique (Georgescu-Roegen, 1976).

4.1 Enjeu climatique

4.1.1 Ambition mondiale

Le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat (GIEC) a été créé en 1988, à la demande du G7, par deux organismes de l'ONU : l'organisation météorologique mondiale (OMM) et le programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). Il a pour mission, sur base de publications scientifiques et techniques reconnues, d'évaluer les risques liés au chan-

gement climatique d'origine humaine, de cerner plus précisément les conséquences possibles de ce changement et d'envisager d'éventuelles stratégies d'adaptation et d'atténuation. De par son origine, sa mission et sa méthodologie, le GIEC fait office de référence dans le domaine de la prévision des changements climatiques.

On trouve dans le chapitre 20 de l'apport du groupe de travail II au 4ème rapport du GIEC une description des risques avérés en fonction de l'évolution de la température par rapport à l'année 1990 (Pachauri et Reisinger, 2007). Ces risques sont reproduits dans la figure 4.1. Sur cette base, différentes instances internationales ont évalué à 1.5°C l'échauffement moyen maximal admissible par rapport à 1990, soit 2°C par rapport à l'époque préindustrielle. Un échauffement supérieur est considéré comme entraînant trop de conséquences néfastes irréversibles. C'est la position notamment du G8 (G8, 2009) et de la Commission Européenne (Conseil Européen, 2007).

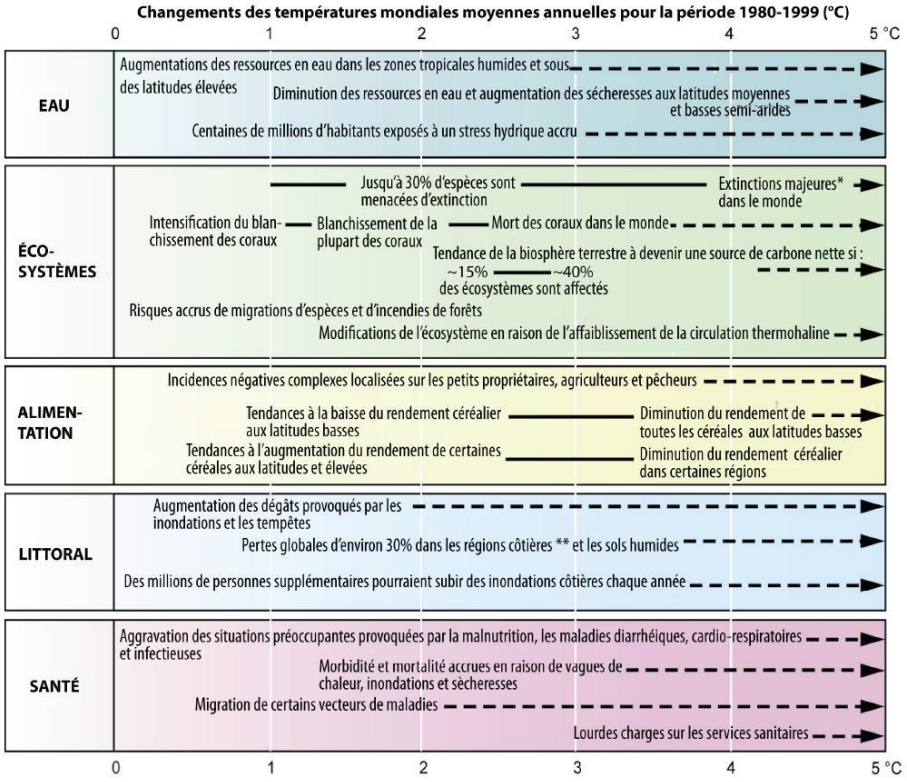


FIGURE 4.1 – Projection des conséquences des changements climatiques au niveau mondial (Yohe *et al.*, 2007)

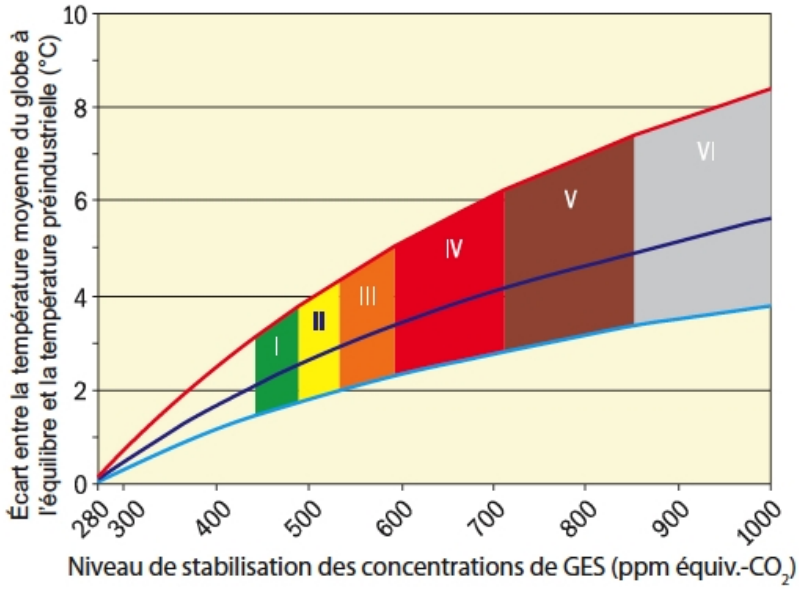


FIGURE 4.2 – Augmentation des émissions de CO2 et de la température à l'équilibre selon divers niveaux de stabilisation (Pachauri et Reisinger, 2007)

Le maintien du réchauffement sous 2°C implique d'orienter le développement planétaire sur la voie d'un scénario SRES de type B1. Les scénarios SRES (pour Special Report on Emissions Scenarios) sont des modèles de développement socio-économiques planétaires également fiables utilisés par les climatologues pour baliser les impacts possibles de l'activité humaine sur le climat. Un scénario de type B1 décrit un monde convergent, ayant une tendance démographique qui atteint des maximums vers le milieu du siècle et décline par la suite, avec une structure économique évoluant rapidement vers une économie de services et d'information. Dans ce scénario, l'exploitation matérielle perd en intensité et des technologies propres apparaissent, qui utilisent les ressources avec efficacité et discernement. Parmi les scénarios utilisés par les climatologues, il s'agit du plus optimiste en terme de limitation de l'impact anthropique sur le climat, bien que ce scénario n'inclue aucune initiative spécifique telle que le respect du protocole de Kyoto. Dans les scénarios de type B1, la fourchette d'échauffement estimée est de 1.1 à 2.9°C par rapport à 1990, pour une concentration en CO_2 dans l'atmosphère de 445 à 490 ppm, auxquels doivent s'ajouter les 0.6°C d'échauffement avérés entre l'époque préindustrielle et 1990 (voir figure 4.2). Pour atteindre un niveau de 445 ppm équivalent CO_2, il faut que les émissions de l'ensemble du globe aient diminué d'une fourchette allant de 50 à 80 % par rapport à l'an 2000. En toute logique, ce sont les principaux pollueurs historiques qui devront suppor-

ter l'essentiel de l'effort. C'est dans cet esprit que le G8 et l'Union Européenne avancent des objectifs de réduction de 80 % de leurs émissions en 2050 par rapport à 1990 :

> "We recognize the broad scientific view that the increase in global average temperature above pre-industrial levels ought not to exceed 2°C. Because this global challenge can only be met by a global response, we reiterate our willingness to share with all countries the goal of achieving at least a 50 % reduction of global emissions by 2050, recognizing that this implies that global emissions need to peak as soon as possible and decline thereafter. As part of this, we also support a goal of developed countries reducing emissions of greenhouse gases in aggregate by 80 % or more by 2050 compared to 1990 or more recent years." (G8, 2009)

> "Le Conseil européen réaffirme que les engagements de réduction des émissions en valeur absolue constituent l'élément central d'un marché mondial du carbone. Les pays développés devraient continuer à montrer la voie en s'engageant à réduire collectivement leurs émissions de gaz à effet de serre de 30 % environ d'ici 2020 par rapport à 1990. Ce faisant, ils devraient également viser à réduire collectivement leurs émissions de 60 à 80 % d'ici 2050 par rapport à 1990." (Conseil Européen, 2007)

> "The European Parliament, [...] recalls in particular the essential objectives in combating climate change and stresses the importance, in accordance with the recommendations contained in the IPCC's Fourth Assessment Report (AR4) and as included in the Bali roadmap, of setting, for the EU and the other industrialized countries as a group, a medium-term target of a 25-40 % reduction in greenhouse gas emissions by 2020, as well as a long-term reduction target of at least 80 % by 2050, compared to 1990, maintaining the focus on restricting the increase in average global temperature to 2°C over pre-industrial levels and thus achieving a 50 % probability of meeting this objective." (Parlement européen, 2007)

Les données du GIEC présentées ici ont été publiées en 2007 et les déclarations d'intention ci-dessous les suivent directement. La mise à jour de ces données est attendue pour la fin de l'année 2013, moment de la publication d'un nouveau rapport global. Dans l'intervalle, la prise de conscience fait son chemin, comme le montre le rapport "Global Risk 2013" servant de préambule au 43e forum économique de Davos (Howell *et al.*, 2013). Sur base d'enquêtes de perception auprès d'un millier de représentants de l'industrie, des gouvernements, des milieux académiques et de la société civile, ce rapport pointe l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre comme le 3e risque global le plus probable et l'échec des adaptations aux changements climatiques comme le 5e risque global avec le plus d'impact.

4.1.2 Traduction locale

L'effort de réduction pour 2050 de 80 % des émissions de gaz à effet de serre doit porter sur l'activité économique des pays développés dans son ensemble. A ce jour, il n'y a pas de plan de répartition entre pays et secteurs économiques pour cet objectif final. Par contre, il en existe bien un pour l'objectif intermédiaire de l'Union Européenne de réduction de 20 % (valeur minimale) en moyenne des émissions d'ici 2020. Sur base de cette répartition, l'effort à fournir par la Belgique est une réduction de 15 % (Parlement Européen, 2008).

Notre propos ici est d'essayer de cerner un objectif réaliste pour l'industrie du bâtiment en Belgique à l'échéance 2050. Faute d'études extérieures, nous nous contenterons ici de transposer la part de 15 % sur les 20 % de l'objectif intermédiaire à l'objectif final, et de supposer que chaque secteur d'activité doit fournir un effort équivalent. Vu l'importance du secteur immobilier dans les émissions totales, il semble logique que ce secteur prenne une part conséquente de l'effort en charge, et donc au minimum une réduction proportionnellement équivalente à l'objectif global. Sur cette base, la réduction des émissions liées au secteur du bâtiment en Belgique devrait être de 15/20*80 % = 60 % d'ici 2050 par rapport à 1990.

Vu la relative lenteur des transformations de l'industrie du bâtiment comparée à d'autres secteurs économiques, et la tendance naturelle à l'accroissement des émissions liées à ce secteur consécutive à l'augmentation continue du nombre de bâtiments, on comprend aisément la nécessité de développer des modes constructifs extrêmement sobres en énergie pour atteindre un tel niveau de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Différentes balises politiques illustrent l'importance de ces nouveaux modes constructifs dans la réponse qui va être apportée à l'enjeu climatique. Bien qu'il ne s'agisse à ce stade que d'intentions, elles vont toutes dans le sens d'une généralisation à court terme

des niveaux de performance *passifs*, *zéro-énergie*, *zéro-carbone* ou *à énergie positive* pour les logements neufs :

- en 2020 en Région Wallonne, toutes les nouvelles habitations et bâtiments tertiaires de moins de 1000 m^2 doivent correspondre au standard *Passivhaus* (Econotec, 2009) ;
- dès 2015, toute construction neuve doit correspondre au standard *Passivhaus* en Région de Bruxelles-Capitale (Vanderhaeghen *et al.*, 2012) ;
- en 2016, toute nouvelle habitation en Grande-Bretagne doit être zéro-carbone en bilan net sur l'année (DCLG, 2006) ;
- la France veut généraliser les logements à énergie passive ou positive d'ici 2020 (Commissariat général au Développement Durable, 2008) ;
- depuis janvier 2007, tous les logements sociaux du Vorarlberg doivent respecter le standard *Passivhaus*. Notons que cette région vise l'autonomie énergétique en 2050 grâce à une triple stratégie de sobriété, d'efficacité énergétique et de développement des énergies renouvelables.

4.1.3 Ampleur du défi

Deux études datant de 2008 permettent de se faire une idée de l'ampleur du défi à relever par le secteur de la construction pour atteindre ces niveaux de réduction des émissions : l'une a été réalisée par le CERAA (Coûteaux *et al.*, 2008), l'autre par G.Verbeeck *et al.* (Verbeeck *et al.*, 2008).

Nous reproduisons ici une figure (figure 4.3) de l'étude du CERAA qui montre la diminution des émissions de CO_2 liées au chauffage des bâtiments en Région de Bruxelles-Capitale moyennant les hypothèses suivantes :

- Un scénario environnementalement favorable d'accélération, sur la période 2008-2032, de l'évolution enregistrée de 1996 à 2007 des surfaces de logements (Tableau 4.1, scénario favorable car il propose un taux élevé de rénovation) ;
- L'application d'une réglementation énergétique exigeante après 2008 : toute construction neuve conforme au standard *Passivhaus* (consommation de chauffage de 15 kWh/(m^2an)), toute rénovation lourde basse énergie (consommation de chauffage égale à 60 kWh/(m^2an)), toute rénovation légère avec amélioration des performances du bâtiment (consommation de chauffage de 99 kWh/(m^2an)), pour un stock bâti inchangé dont la consommation d'énergie moyenne de 153 kWh/(m^2an) demeure constante. Avec le recul, il s'avère que cette hypothèse de réglementation stricte ne s'est pas rencontrée en pratique. Bien que l'entrée en

TABLE 4.1 – Hypothèses considérées pour l'accroissement des surfaces dans l'étude du CERAA (Coûteaux *et al.*, 2008)

	Taux annuel moyen d'augmentation des surfaces en 1996 - 2007	Coefficient d'accroissement du taux annuel moyen d'augmentation des surfaces pour 2008-2032
Constructions neuves	0.6 %	1.25 %
Rénovations lourdes	0.6 %	1.5 %
Rénovations légères	0.31 %	1.5 %
Démolitions	0.01 %	1 %

vigueur de l'ordonnance du gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 07 juin 2007 ait renforcé les niveaux de performances exigés pour les constructions neuves, l'imposition d'un niveau équivalent au *Passivhaus* n'est pas attendue avant 2015 pour les bâtiments privés. Nous conservons néanmoins cette hypothèse trop optimiste qui renforce notre propos ;

– Un adoucissement progressif du climat, résultant en une réduction annuelle de 0.35 % des degrés jours.

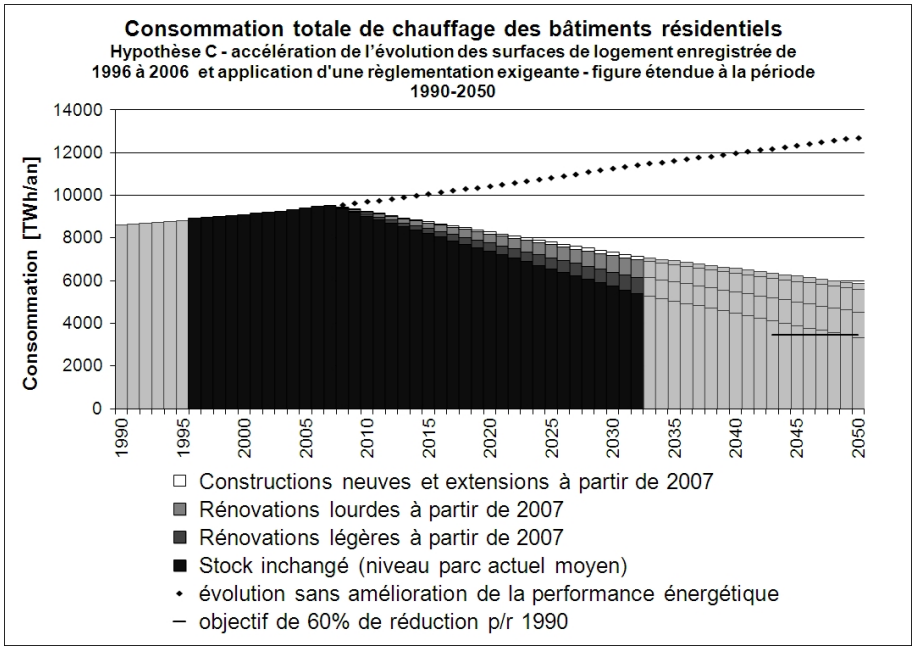


FIGURE 4.3 – Evolution probable de la demande totale de chauffage des bâtiments résidentiels en Région de Bruxelles-Capitale. Figure reprise de l'étude du Ceraa (Coûteaux *et al.*, 2008) et élargie aux périodes 1990-2007 et 2008-2032.

Les résultats présentés dans cette étude ne s'étendent que sur la période 1996 à 2032. Nous l'avons prolongée sur les périodes 1990-1996 et 2032-2050, en supposant la continuité des tendances décrites par les auteurs, sauf pour l'évolution des surfaces de logement au-delà de 2032 pour laquelle nous supposons un taux comparable à celui de 1996-2007. Une élévation continue du taux de rénovation annuel de biens jusqu'en 2050 mène en effet à des valeurs estimées trop élevées. Avec ces hypothèses, on constate que la réduction du taux d'émission en 2050 par rapport à 1990 n'est que de 32 %.

Outre une application stricte des principes décrits ci-dessus, nous constatons que les éléments suivants doivent être rencontrés pour atteindre l'objectif de réduction de 60 % en 2050 par rapport à 1990 (figure 4.4) (objectif minimaliste, rappelons le) :

- coefficient d'accroissement du taux annuel moyen d'augmentation des surfaces pour 2008-2032 de 2 et non 1.5 ;
- maintien des coefficients d'accroissement du taux annuel moyen d'augmentation des surfaces pour 2008-2032 jusqu'en 2050 (ce qui mène à une rénovation complète du parc de logements existants pour l'échéance 2050) ;
- hypothèse qu'à partir de 2032, toute construction neuve est "presque 0 énergie" (consommation de chauffage de 5 kWh/m^{2}an) et que toute rénovation lourde correspond au standard *Passivhaus* (consommation de chauffage de 15 kWh/m^{2}an).

Dans le même ordre d'idée, l'étude de G.Verbeeck *et al.* montre que les mesures nécessaires pour atteindre une réduction de 20 % des émissions de CO2 en 2020 par rapport à 1990 en partant des émissions avérées du secteur résidentiel en 2005 sont les suivantes (Verbeeck *et al.*, 2008) :

- soit toutes les constructions neuves et rénovations au niveau *PRES1* défini au tableau 4.2 (décrit par l'auteur comme l'optimum économique) et la rénovation de 75 % des logements d'ici à 2020 ;
- soit toutes les constructions neuves et rénovations au niveau *PRES2* (décrit par l'auteur comme le niveau *Passivhaus*), et la rénovation de 50 % des logements d'ici à 2020.

Ces deux études ne considèrent pas de basculement vers des combustibles plus propres (biomasse, géothermie), ou des éventuelles compensations par des énergies renouvelables. Néanmoins, elles sont par d'autres aspects exagérément optimistes, notamment en supposant la possibilité de généraliser le standard *Passivhaus* à toute construction ou rénovation. Malgré cet optimisme,

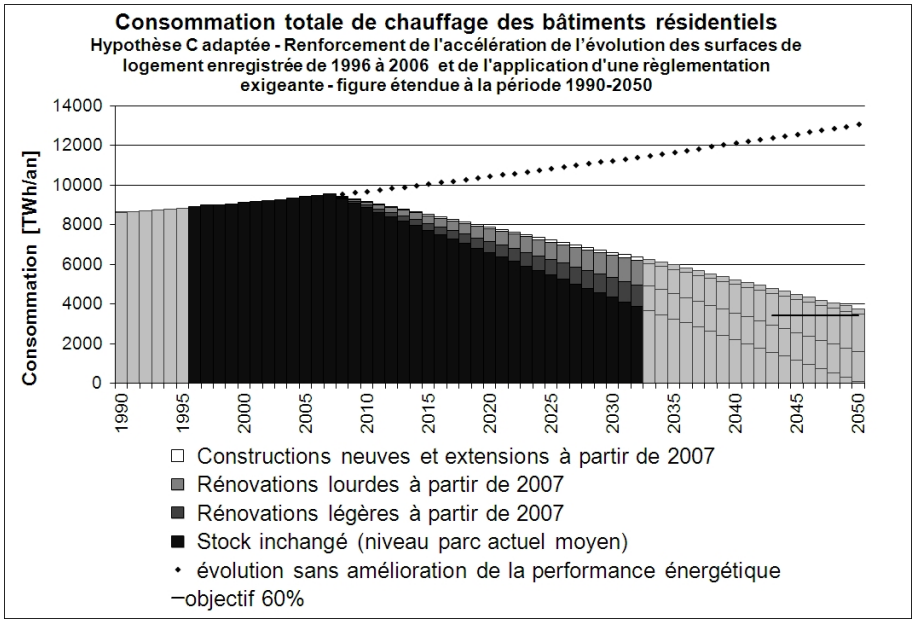


FIGURE 4.4 – Evolution nécessaire de la demande totale de chauffage des bâtiments résidentiels en Région de Bruxelles-Capitale. Figure inspirée de l'étude du Ceraa (Coûteaux *et al.*, 2008) et élargie aux périodes 1990-2007 et 2008-2032 avec modification des hypothèses de calcul pour atteindre l'objectif de réduction des émissions en 2050

TABLE 4.2 – Hypothèses de calcul de l'étude de Verbeeck *et al.* (Verbeeck *et al.*, 2008) .

	Constructions neuves		Rénovations	
Scénario	PRES1	PRES2	PRES1	PRES 2
U_{toits} [W/m²K]	0.15	0.15	0.2	0.15
U_{murs} [W/m²K]	0.35	0.15	50 % à 0.15 et 50 % pas isolé	0.35
U_{dalles} [W/m²K]	0.30	0.15	50 % à 0.30 et 50 % pas isolé	0.30
$U_{vitrages}$ [W/m²K]	1.0	0.8	1.0	0.8
$U_{menuiseries}$ [W/m²K]	3.0	0.8	3.0	0.8
Chauffage gaz	Condensation généralisée			
Chauffage fuel	50 % à condensation, 50 % à haute efficacité	100 % à condensation	50 % à condensation, 50 % à haute efficacité	100 % à condensation
Pompes à chaleur	25 % du parc	50 % du parc	25 % du parc	50 % du parc

elles font toutes deux le constat que la généralisation à court terme de ces niveaux de performance n'est même pas suffisante, et donc un accroissement extrêmement rapide du taux de rénovation des bâtiments est nécessaire en parallèle.

Cet accroissement du taux de rénovation n'étant en rien garanti, la radicalité de la démarche énergétique des projets effectivement entrepris n'en est que plus nécessaire.

4.2 Limitation des ressources

A la question de l'impact climatique vient s'ajouter la question de disponibilité des ressources énergétiques, vulgarisée par la notion de pic de pétrole. La décroissance inéluctable du débit de production après une phase de croissance puis de stabilisation (figure 4.5) est une évidence physique à l'échelle d'un gisement particulier : après une phase d'exploitation aisée, l'extraction devient plus complexe (essentiellement du fait de la réduction de pression dans le réservoir) et le coût de production croît avec la difficulté, jusqu'à réduire la rentabilité du gisement et entraîner son abandon. Les données collectées par l'Association for the Study of Peak Oil and Gas (ASPO) démontrent qu'un pic pétrolier est observé depuis les années 70 à l'échelle de nations. Parmi les grand producteurs ayant dépassé leur pic de production, citons le Royaume-Uni, la Norvège et les Etats-Unis (Brocorens, 2007), ce qui n'exclut pas des rebonds de leur production , par exemple aux Etats-Unis lors de l'ouverture des gisements de l'Alaska (Brocorens, 2012). Le phénomène atteint maintenant le Moyen Orient et l'Afrique du Nord : Tunisie, Egypte, Syrie, Bahreïn, Yémen, anciens pays exportateurs, sont devenus ou en passe de devenir des importateurs, avec des conséquences sur les budgets des états et sur les prix de l'énergie dans ces pays qui ne sont probablement pas étrangères aux révolutions du printemps arabe (Brocorens, 2012). A l'échelle mondiale, il est difficile d'estimer à quel moment le pic de production sera franchi, car il faut évaluer l'évolution de la production des gisements tant actuels que futurs. Les capacités actuelles de production diminuent de 5 % par an. La mise en exploitation de nouveaux gisements ou l'application de techniques de récupération assistée aux gisements déjà en exploitation, deux mesures nécessaires pour compenser la perte de production et l'augmentation de la demande, équivalent à développer l'équivalent de 45 % de la production mondiale existante en seulement 10 ans (Brocorens, 2007). Il se pourrait que plus des deux tiers de la capacité de production de pétrole brut doivent être remplacés d'ici 2030, juste pour maintenir la production constante (Miller *et al.*, 2009).

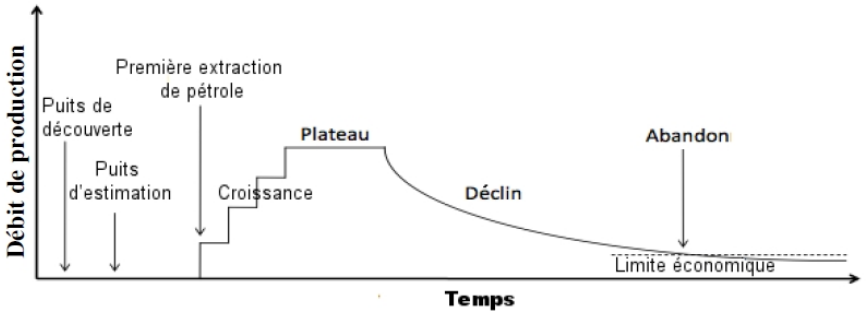


FIGURE 4.5 – Profil de production schématique d'un gisement de pétrole. Figure reprise de (Miller *et al.*, 2009) d'après (Höök *et al.*, 2009).

Quelque soit le moment où surviendrait le pic de production mondial, c'est la disponibilité de cette ressource à bon marché qui approche de sa fin. L'exploitation de gisements plus difficiles d'accès augmente les coûts de production, et la tension entre offre stable ou décroissante et demande croissante aura inévitablement une importante pression à la hausse sur les prix. L'envolée prévisibles des coûts de l'énergie risque d'entraîner une récession économique et une baisse de la demande qui, paradoxalement, masquera cette hausse (Brocorens, 2012). Mais cela au prix de crises économiques accompagnées de conséquences sociales importantes. Cette notion de pic de pétrole nous intéresse donc dans la mesure où elle va dans un avenir proche accentuer la question de précarité énergétique par deux effets parallèles : en augmentant, à performance égale, le coût du maintien de conditions de confort dans les habitations et en fragilisant une part plus importante de la population, au travers des risques de récession économique.

Face à la raréfaction d'une ressource, se pose la question du développement de ressources alternatives. Notons cependant que l'augmentation de la demande sur les ressources de substitution entraînera logiquement leur renchérissement par effet de cascade. Ce transfert ne fera donc qu'amortir les conséquences du pic pétrolier, sans les annuler. Quelles sont néanmoins les ressources de substitution et présentent-elles également un risque de pic de production à court ou moyen terme ? Parlant de l'énergie utilisée dans le bâtiment, nous identifions le gaz et la biomasse comme ressources privilégiées de remplacement.

A la différence du marché du pétrole qui est mondial, le gaz est organisé en marchés régionaux alimentés par pipelines. Certains de ces marchés ont déjà connu leur pic de production, notamment les marchés nord-américains et bri-

tanniques (Brocorens, 2007). Ces pertes de production ont entraîné une volatilité spectaculaire des prix et leur hausse tendancielle, ainsi que des reports vers le gaz liquéfié importé par tanker, marché où tous les grands consommateurs sont en concurrence. Si la production actuelle de gaz est en croissance, elle connaîtra aussi un pic à moyen terme, certains auteurs parlant de 2020-2030 (Brocorens, 2007). Cette échéance est d'ores et déjà inférieure à l'espérance de vie des chaudières domestiques installées aujourd'hui. Il y a cependant une grande incertitude autour de ces chiffres, qui dépendent non seulement des seuls paramètres physiques, mais aussi de l'ampleur du report de la consommation de pétrole vers le gaz.

La récente mise en exploitation des gaz de schistes, notamment en Amérique du Nord, devrait augmenter la capacité du gaz à prendre le relais du pétrole, sans pour autant modifier fondamentalement la logique présentée ici d'un effet de cascade entre différentes formes de combustibles. Signalons également que l'exploitation de ces gaz par fracturation hydraulique pose de nombreuses questions environnementales et ne constitue pas une réponse face aux enjeux climatiques (les scénarios de transition énergétique considèrent généralement le gaz comme une forme d'énergie de transition (Cormier, 2013; association négaWatts, 2012)).

Pour ce qui concerne la biomasse, il est utile de relever que c'est la seule source renouvelable qui puisse fournir une alternative aux combustibles liquides, toutes les autres énergies renouvelables étant de forme électrique. Les biocarburants feront donc l'objet d'une demande très importante de la part du secteur automobile, face à laquelle le secteur du bâtiment risque d'être marginalisé. La capacité de production de biocarburant est en effet très largement insuffisante pour répondre aux besoins en transports. L'Europe des 15 devrait consacrer environ les trois-quarts de ses terres agricoles aux biocarburants pour remplacer seulement 5 % de sa consommation de pétrole (c.-à-d.10 % de sa consommation en combustibles utilisés dans les transports) (Pearce, 2006). Relativement aux ressources forestières, pointons qu'en Belgique la surface boisée par habitant n'est que de 577 m^2. Avec une période de rotation de 20 ans, la surface forestière disponible annuellement à la coupe par belge est de 28.8 m^2 seulement (Brocorens, 2007). Sur base d'une production indicative de 12 m^3/an de bois par hectare, une densité moyenne du bois de 700 kg/m^3 et une densité énergétique de 2.2 kWh/kg pour du bois vert, ceci ne représente que 51.7 kWh/(habitant.an). Mentionnons en outre que de nombreuses questions restent en suspens sur le caractère écologique des biocarburants (pression sur les forêts primaires, bilan CO_2 discutable, appauvrissement des sols) (Brocorens, 2007), et qu'ils sont en concurrence avec les besoins alimentaires. Il sera donc à court terme nécessaire de définir des priorités dans l'usage de la

biomasse, entre l'alimentation, les transports, les bâtiments, les autres valorisations énergétiques et la préservation des massifs. Face à de tels concurrents, il nous semble peu probable que la priorité soit donnée au chauffage des logements.

Il ressort de ceci que l'idée d'une réponse à la raréfaction du mazout de chauffage par un transfert modal vers le gaz ou la biomasse ne constitue pas une réponse globale crédible à moyen terme. Dès lors, pour échapper à cette situation de pénurie d'énergie, nous devrions chercher à créer des conditions thermiques acceptables (pour ne pas parler de confort) sans recours à une énergie importée autre que celle liée à la mise en œuvre du bâtiment lui-même, au moins pour des conditions climatiques non extrêmes. Il s'agit donc de viser des bâtiments zéro-énergie au sens littéral du terme, grâce à leur sobriété et leur capacité à capter et stocker l'énergie principalement solaire. Une autre piste est d'identifier un combustible qui échapperait à l'effet de cascade décrit plus haut entre le pétrole, le gaz et la biomasse.

Echapper à cette cascade peut se faire si la forme d'énergie en question est produite sur site et difficilement exportable. Deux pistes de solution apparaissent : la valorisation des déchets et la valorisation de la chaleur du sous-sol. Nous n'envisageons pas ici l'électricité produite au départ de sources renouvelables pour des raisons explicitées au paragraphe suivant. Sur base d'études menées à l'échelle de municipalités, la meilleure utilisation des déchets ménagers est la production de gaz valorisés au travers d'unités de cogénération (réductions des émissions de CO_2 et de la dépendance aux énergies fossiles) (Munster et Lund, 2009). Si l'on intègre une analyse de cycle de vie, une incinération avec récupération de chaleur peut être préférable dans la mesure où elle se substitue à des combustibles solides tels que le charbon (Fruergaard et Asrup, 2011). Il s'agit cependant de technologies complexes, présentant des risques sanitaires et environnementaux lors de leur processus. Il est donc peu envisageable de les amener à l'échelle du projet d'architecture si ce n'est au travers de réseaux de chaleur urbains, alimentés par des unités de production optimalisée. Se pose néanmoins encore la question de la dissipation de la chaleur produite en été, dont la part ira croissante avec l'amélioration énergétique du parc de bâtiments. En comparaison, les applications de géothermie offrent une piste intéressante à l'échelle du bâtiment, dans la mesure où elles répondent à la recherche d'une source d'énergie produite localement et non délocalisable, qui de plus est beaucoup plus simple dans sa conception et sa gestion que la valorisation des déchets et qui ne dépend pas d'un rythme de production autre que le besoin énergétique du bâtiment. Ses inconvénients sont le coût, le potentiel variable selon les sites, la dépendance à l'électricité et certains risques environnementaux tels que la pollution des nappes phréatiques.

L'électricité renouvelable produite à l'échelle de projets d'architecture (que celle-ci soit photovoltaïque, éolienne ou hydroélectrique) ne nous apparait pas comme une alternative crédible face à cet effet de cascade du fait de sa facilité d'exportation par des réseaux basse et moyenne tension. Etant exportable, elle subira une demande importante depuis divers secteurs qui ne bénéficient pas d'alternatives en termes de vecteur énergétique. Les processus industriels, l'éclairage, les applications électroniques notamment dépendent totalement de l'électricité et doivent logiquement bénéficier de l'électricité renouvelable avant les usages thermiques. Tout comme la biomasse, il semble donc que l'électricité ne constitue pas une alternative complète à grande échelle pour le contrôle climatique des bâtiments. Ceci ne signifie pas que nous ne lui reconnaissons pas d'intérêt. Elle participe à la solution de par sa capacité à répondre au moins partiellement aux besoins d'énergie strictement électriques du bâtiment, ce que la valorisation thermique des déchets et de la chaleur géothermique ne permettent pas. Nous revenons dans le chapitre 7 traitant des bâtiments zéro-énergie sur la question de la production d'électricité renouvelable. Nous y reprenons l'idée d'une dissociation entre besoins d'énergie dans le bâtiment et potentiel de production d'électricité au départ de sources renouvelables.

Cette réflexion sur la raréfaction des ressources énergétiques bon marché a donc permis de dégager les pistes suivantes : la nécessité, encore une fois, de minimiser le besoin d'énergie ; la recherche de solutions de stockage de l'énergie solaire sur base saisonnière ; la valorisation des déchets à l'échelle collective au travers de réseaux de chaleur urbains ; l'exploitation des ressources géothermiques à l'échelle du projet d'architecture.

4.3 Précarité énergétique

De janvier à février 2012, une vague de froid particulièrement meurtrière s'est abattue sur l'Europe. Les deniers décomptes publiés dans la presse mentionnent plus de 600 décès (Wikipedia, 2012). Ce décompte doit nécessairement interpeller l'architecte, car certaines de ces victimes disposaient d'un logement qui n'a pas su les protéger des intempéries.

Dans les années 90, des chercheurs anglais établissent une relation explicite entre précarité énergétique et mortalité (Boardman, 1991). On en vint à parler de *winter excess deaths*, chiffrées à plus de 20000 personnes de plus de 65 ans par an encore aujourd'hui au Royaume-Uni (Palmer, 2012). La liaison entre surmortalité et précarité énergétique a été largement démontrée

(Rudge et Gilchrist, 2007). Ces décès ne sont qu'exceptionnellement causés par des hypothermies. Bien plus souvent, il s'agit d'affections respiratoires ou circulatoires causées ou amplifiées par des ambiances intérieures trop froides et/ou trop humides (Boardman, 2000). Ce type de décompte n'est pas, à notre connaissance, réalisé en Belgique. Mais nous savons que 5,1 % des Belges déclarent ne pas pouvoir chauffer suffisamment leur logement pour des raisons financières (Huybrechs *et al.*, 2011).

Boardman a proposé en 1991 la définition de la précarité énergétique suivante : "the inability to obtain adequate energy services for 10 % of income, excluding all housing costs" (Boardman, 1991), ce montant de 10 % devant couvrir non seulement les coûts liés au chauffage, mais également à toutes les applications énergétiques domestiques hors déplacements. Depuis, différentes définitions ont été proposées qui modifient partiellement celle de Boardman (limitation ou non aux coûts de chauffage, inclusion ou non des coûts de transport...), mais il n'y a pas à ce jour de définition faisant consensus en Europe (Huybrechs *et al.*, 2011). Une des définitions les plus récentes est de considérer qu'une personne est en précarité énergétique lorsque ses dépenses énergétiques sont supérieures aux dépenses énergétiques médianes de la population et que, une fois ces dépenses effectuées, ses revenus disponibles résiduels sont inférieurs au seuil de pauvreté (Hills, 2011). Partant de la définition initiale de Boardman, un *Affordable warmth index* (AWI) a été défini dans le cadre du National Home Energy Rating anglais (Chapman et Scannell, 2000), donnant une définition plus précise de la précarité énergétique. C'est la définition utilisée par le Service Public Fédéral belge. Il est calculé selon l'équation 4.1 et indique une situation de précarité énergétique si sa valeur est inférieure à 100. :

$$AWI = WeeklyIncome.52.\frac{10}{Totalannualfuelbill} \tag{4.1}$$

> "the Affordable Warmth Index should express the link between household disposable income and total fuel running costs based on actual occupants and standard comfort and non-heating energy use levels. [...] The assumed income level [...] is based on the benefit payments that can be claimed, excluding housing allowances. [...] It was decided to base the Index on total running costs rather than just space and water heating costs because : [...] there is no sense in comparing part of the fuel bill with total income ; Most of the non-heating uses are non-discretionary [...]. This means that,

> in practice, low income groups will control their total expenditure by reducing the space and water heating costs." (Chapman et Scannell, 2000)

L'ampleur de la question de la précarité énergétique ne doit pas être négligée. En 2004, 29 % du stock bâti anglais ne répondait pas aux standards de salubrité (combinaison de paramètres de bon état général, d'accès à des services de base et offrant un bon niveau de confort thermique). Ce niveau était de 33 % en 1996. (DETP, 2006). La situation est telle qu'une loi visant à éradiquer pour 2016 la précarité énergétique a été votée (The stationary Office, 2000). Si l'on se base sur les chiffres de l'enquête sur les revenus des ménages belges (SPF-Economie, 2009), on constate que la part des dépenses énergétiques dans les revenus moyens est relativement stable, de même que l'AWI (Figure 4.6). Si l'on décompose ces chiffres selon le niveau de revenus, on constate que l'énergie représente une charge plus lourde pour les revenus les plus faibles (déciles 1 et 2) (Dumortier *et al.*, 2006). La part de l'énergie dans les dépenses de ces revenus étant de l'ordre de 6 % en 2004 contre moins de 5 % en moyenne (Figure 4.7). C'est en Wallonie que cette part est la plus grande, avec en 2004 un niveau de 7.5 % pour les premiers déciles de revenus. En 2009, la part de 10 % était dépassée dans toutes les régions du royaume pour le premier décile de revenus (Huybrechs *et al.*, 2011). Cependant, il est difficile de se faire une image complète de la réalité sur base de telles statistiques. Ces évaluations se basent sur des données fiscales qui omettent une part importante de la population non soumise à l'impôt, ou des enquêtes de terrain travaillant avec des échantillons limités.

Une autre source de données est le nombre de personnes confrontées à des coupures totales ou partielles d'alimentation, bien que certaines difficultés d'interprétation soient présentes qui ne modifient pas les tendances (Huybrechs *et al.*, 2011). En Wallonie, en 2009, le nombre de clients protégés fédéraux ou régionaux s'élevait à 95.114 en électricité, soit 6.3 % de la clientèle résidentielle et à 43.780 clients en gaz, soit 7.6 % de la clientèle résidentielle. Le nombre de clients protégés bénéficiant du tarif social s'élevait à 78.986 clients en électricité, soit 5.25 % du total des clients résidentiels en électricité et à 35.830 clients en gaz, soit 6.2 % du total des clients résidentiels en gaz (CWAPE, 2010). Ces valeurs reflètent une hausse du nombre de clients protégés sur base annuelle (Figure 4.8). En Région de Bruxelles-Capitale, le nombre de limiteurs de puissance électrique en place, conséquence de situations de défaut de payement, s'élève à 13310 en 2008, ce qui ne représente que 2.6 % du total des compteurs électriques de la région (Brugel, 2009). Ce pourcentage ne reflète cependant pas la réalité de la population bruxelloise, puisque le total de compteurs inclut les clients professionnels. Comparativement, la fondation

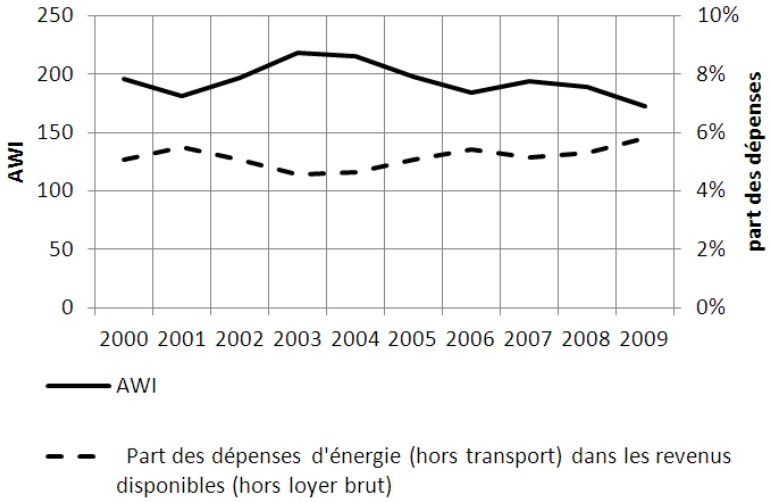


FIGURE 4.6 – Evolution de la part des dépenses énergétiques dans les revenus moyens et de l'Affordable Warmth Index en Belgique, sur bases des chiffres des Enquêtes sur les revenus des ménages (SPF-Economie, 2009).

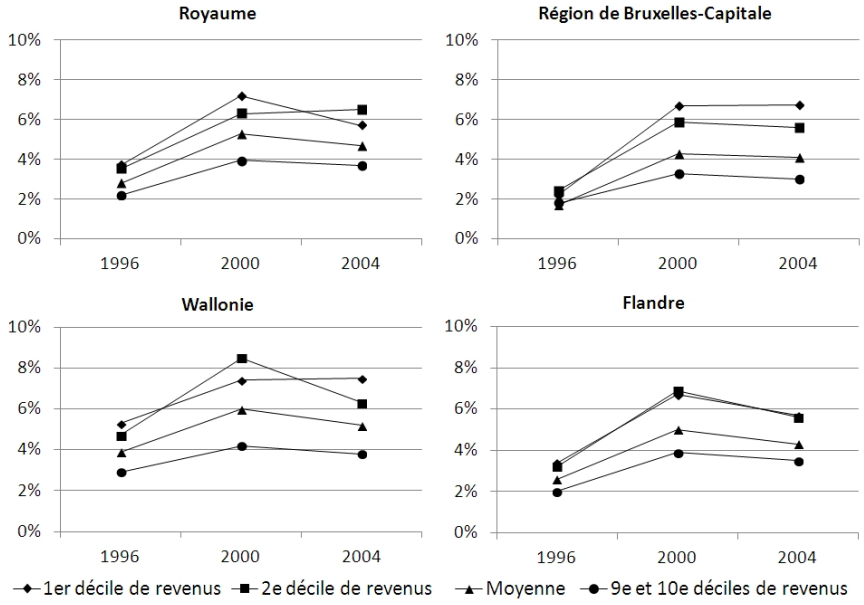


FIGURE 4.7 – Evolution de la part *énergie* dans la consommation des ménages pour les revenus faibles (déciles 1 et 2), moyens (moyenne des déciles 1 à 10) et élevés (déciles 9 et 10), en Belgique et pour chacune des trois régions (Dumortier *et al.*, 2006).

Abbé Pierre parle de 2.123.000 personnes en France disposant d'un logement mais en privation de confort (cumulant deux problèmes parmi le manque d'installations sanitaires, l'insuffisance de chauffage, une installation électrique défaillante ou des infiltrations d'eau), soit 3 % de la population, mais auxquels il faut ajouter les personnes privées de domicile, vivant en surpopulation ou dans diverses formes d'occupations précaires. Ils forment au total 3.6 millions de *mal-logés*, soit 5.5 % de la population, accompagnés de plus de 5 millions de personnes *fragilisées* par la crise du logement (Colin *et al.*, 2013).

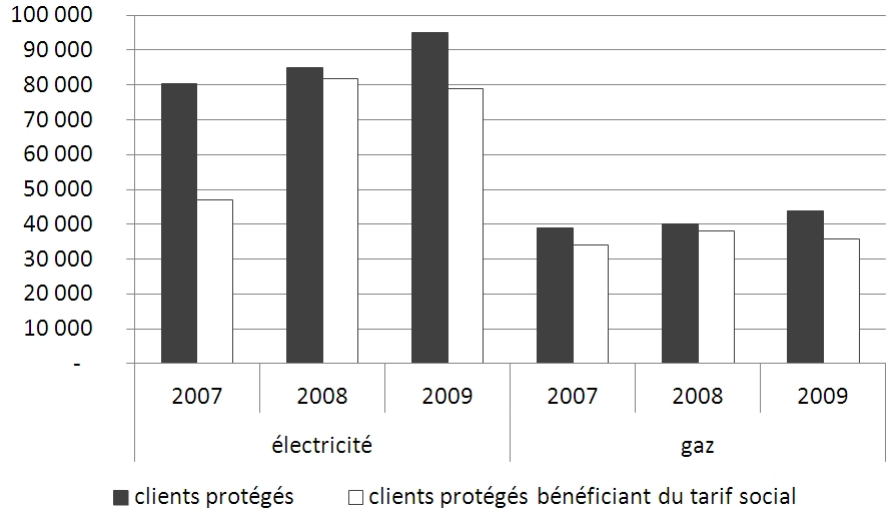


FIGURE 4.8 – Evolution du nombre de clients bénéficiant du tarif social en Wallonie (CWAPE, 2010).

La question de la précarité énergétique est d'autant plus pointue qu'elle croise celle de la santé dans l'habitat. Faute d'une performance énergétique suffisante ou de la capacité financière d'assurer un climat intérieur adéquat, les conditions sanitaires du logement se dégradent et affectent la santé des habitants. Or, les personnes les plus touchées par la précarité énergétique en Belgique sont les isolés, les familles monoparentales et les familles nombreuses (Huybrechs *et al.*, 2011), qui comptent des jeunes enfants plus sensibles physiquement, notamment aux affections respiratoires et allergies. Elle touche aussi quatre fois plus souvent les locataires, qui disposent de peu de moyens d'action dans leur logement, que les propriétaires (Huybrechs *et al.*, 2011). Il y a donc une multiplication de facteurs de risque liés à la pauvreté qui pourraient être annulés par la réalisation de logements sociaux économiques et sains à faible charge énergétique. La situation se présente différemment dans d'autre pays, notamment en France où le mal-logement touche en majorité des personnes

âgées (55 % ont plus de 60 ans) et des propriétaires (62 %), conséquence d'une politique facilitant l'accès à la propriété de pavillons de mauvaise qualité (Colin *et al.*, 2013).

Vingt ans après les premiers constats, où en sommes-nous ? Jamais les dimensions énergétiques de l'architecture n'ont été autant mises en avant. Directives européennes, standard *Passivhaus* et objectifs zéro-énergie concourent à rendre les bâtiments moins énergivores et, par conséquent, plus confortables à consommation équivalente. A ce titre, ces évolutions constituent des progrès. Mais elles ne constituent pas pour autant des réponses directes à la question particulière de la précarité énergétique et ce pour au moins deux raisons.

Premièrement, ces démarches concernent essentiellement la construction neuve, qui n'est qu'exceptionnellement accessible aux personnes précarisées. Le développement actuel de logements sociaux *Passivhaus* en région bruxelloise est à ce titre un effort important à souligner, mais ne constitue qu'une goutte d'eau face aux 140 000 logements sociaux de Bruxelles et de Wallonie.

Secondement, ces démarches ne révèlent pas un regard original sur la question de l'accès à l'énergie. Les méthodes de calcul sont toutes basées sur l'hypothèse de la continuation d'un mode d'habiter *normal* qui suppose le chauffage uniforme de l'ensemble des locaux. Dans cet esprit, elles évaluent systématiquement un besoin énergétique lié au maintien d'une température de consigne uniforme prédéterminée. Se souvient-on qu'il y a seulement 60 ans le chauffage central était un luxe ? Oublie-t-on qu'en 2009, 20 % des logements de la Région de Bruxelles-Capitale n'en étaient pas équipés (ICEDD, 2011) ? Cette approche centrée sur l'idée que les locaux sont chauffés est bien évidemment réaliste pour la plus grande part de la production de bâtiments neufs, mais elle est incapable de caractériser les conditions de vie des personnes précarisées dans le bâti existant.

Tout ceci nous fait dire que l'enjeu local et immédiat de la précarité énergétique doit interpeller l'architecte dans le sens d'une prise en compte de cette réalité malheureusement de plus en plus présente : une part conséquente de la population n'est pas en mesure de se fournir en énergie pour maintenir, non pas le confort, mais des conditions de vie saines. Bien évidemment une performance énergétique poussée est nécessaire en construction neuve et en rénovation pour limiter ce problème, mais au-delà de cela une réflexion spécifique sur cette réalité doit être menée pour apporter, par l'architecture, des réponses adaptées à ces situations de précarité.

4.4 Réflexion sur base de l'équation de Kaya

L'équation de Kaya (Kaya et Yokobori, 1997), reproduite ci-dessous, est en réalité d'avantage la formalisation d'une relation qu'un réel développement mathématique. Elle exprime que l'impact climatique des activités humaines, essentiellement lié aux émissions de gaz à effet de serre, est fonction du produit de quatre données : le niveau de population, la quantité de biens économiques produits par personne, l'intensité énergétique de l'économie, que l'on pourrait appeler efficacité énergétique et le potentiel d'émissions de gaz à effets de serre de l'énergie utilisée, autrement dit sa *propreté*.

$$GES = \frac{GES}{TEP}.\frac{TEP}{PIB}.\frac{PIB}{POP}.POP \tag{4.2}$$

avec
GES = émissions de gaz à effet de serre
TEP = tonnes équivalent pétrole
PIB = produit intérieur brut
POP = population

Sur base de projections économiques et démographiques, et en fixant un niveau d'objectif de réductions des émissions de $CO_{2,equivalent}$ cette équation peut être utilisée pour estimer la nécessité de se tourner vers des énergies propres ou d'améliorer l'efficacité énergétique des systèmes économiques. Nous n'entrerons pas ici dans une évaluation chiffrée, mais nous utiliserons cette équation pour mettre en évidence les aspects de choix de société, et donc d'éthique, sous-entendus derrière la démarche environnementale.

Partons d'une tautologie en rappelant que l'égalité de cette expression représente un équilibre. Ce n'est qu'à partir du moment où l'on choisit de considérer la valeur d'un terme comme inacceptable qu'une compensation doit être trouvée dans l'autre membre. Typiquement, il y a consensus aujourd'hui pour considérer que notre pression sur l'environnement (le membre de gauche de la relation) est trop élevée et pour exprimer la volonté de le réduire drastiquement. Ceci implique le rééquilibrage du membre de droite de l'équation, ce qui ouvre une palette d'actions possibles. Il suffirait qu'un seul des termes puisse être fortement réduit, voir tende vers 0, pour rétablir l'égalité, quel que soit le niveau d'émissions de gaz à effet de serre visé. Quatre voies s'ouvrent donc à nous :

1. l'utilisation exclusive d'énergie *propre* nous autoriserait à en consommer des quantités infinies, si tant est qu'elles soient disponibles ;

2. la mise au point de modes de production *zéro-énergie* dans un maximum de secteurs d'activité enlève toute pertinence à la question de la propreté de l'énergie utilisée ;
3. l'annulation des besoins de consommation, et donc de production économique, dispense de s'interroger sur la façon de produire ces biens ;
4. enfin, une réduction drastique de la population mondiale autoriserait les survivants à consommer tant et plus, quels que soient l'efficacité de leur mode productif et le type d'énergie utilisée : leur impact global serait marginal, à l'image de ce qu'il était par exemple à la préhistoire.

Ces différentes démarches ne sont bien sûr pas égales d'un point de vue éthique. Ainsi la quatrième option relève au mieux de l'eugénisme et au pire du génocide. Elle est évidemment exclue de notre réflexion. Rappelons que sur base des évaluations du GIEC, les ambitions actuellement affichées et citées plus haut de réduction des émissions de gaz à effet de serre sont de l'ordre d'un facteur 4 à 5. C'est donc bien une réduction massive de la population mondiale qui serait nécessaire, et non une simple diminution du taux de naissances par femme. Ensuite, la réduction des besoins de consommations n'est possible que dans une certaine limite et, à l'échelle planétaire, représente un potentiel limité. Seule une minorité de la population vit dans un luxe réductible, l'essentiel de l'humanité peut donc légitimement aspirer à un mode de vie plus décent, grâce à un confort matériel accru.

A ce stade nous énonçons donc un choix de société, à savoir celui d'une humanité qui ne voit pas en ses enfants ou en une partie de ses membres une charge insoutenable, et qui offre à chaque individu des conditions matérielles à même d'assurer son épanouissement. Une fois éliminé le luxe superflu, travail préliminaire indispensable, nous estimons donc que seuls les deux premiers facteurs de l'équation de Kaya sont des outils efficaces et acceptables. Tout deux peuvent être utilisés en architecture, et c'est précisément l'objet des démarches de construction basse énergie, *Passivhaus* ou zéro-énergie. Ces démarchent cherchent en effet d'abord à réaliser une performance énergétique drastique (réduction de l'intensité énergétique des activités humaines), puis à valoriser au maximum les énergies renouvelables (recherche d'énergies propres).

L'intérêt d'une prise de position radicale sur la performance énergétique apparaît donc de la manière suivante : plus radicale sera la sobriété énergétique des productions de bien, dont les bâtiments, plus la pression diminuera sur les autres facteurs. Ainsi, la population humaine pourra potentiellement se maintenir à un niveau élevé dans des conditions matérielles décentes, libérée

de l'hypothétique découverte de nouvelles énergies propres. Le choix aujourd'hui d'une radicalité extrême en termes de performance énergétique peut donc être justifié éthiquement par la pression que ce choix enlève sur les conditions de vie des générations futures.

4.5 Réflexion sur base des travaux de Georgescu

Une réflexion proche de celle menée ci-dessus, mais plus radicale encore en ce qui concerne l'amélioration de notre performance énergétique, peut être menée à partir des écrits de Nicholas Georgescu-Roegen (Georgescu-Roegen, 1976). Ce dernier construit sa pensée au départ de deux éléments : le type de ressources accessibles et la loi d'entropie.

Nicholas Georgescu-Roegen divise les ressources accessibles à l'homme en deux catégories : des ressources de stock, par définition limitées, à savoir l'ensemble des matériaux et combustibles disponibles sur terre, et une ressource de flux, à savoir l'énergie solaire, que l'on peut considérer illimitée dans la mesure où la mort du soleil est prévue à une échéance suffisamment lointaine pour ne pas nous préoccuper aujourd'hui. A cette dernière pourrait être attachées toutes les ressources liées à la biomasse, l'éolien ou l'hydraulique, qui sont des formes de stockage à court terme d'énergie solaire. La distinction entre les ressources de stock et de flux s'atténue si l'on considère une longue période de temps, les combustibles fossiles étant dérivés de la biomasse après une transformation de milliers ou millions d'années. Cette augmentation des ressources de stock ramenée en unités annuelles est cependant marginale en regard des stocks disponibles et de leur taux de consommation et peut donc être extraite de la réflexion.

Le deuxième élément est le second principe de thermodynamique, connu sous le nom de loi d'entropie. De façon simplifiée, cette loi stipule que, dans un système fermé tel que le système solaire, toute forme d'énergie est graduellement transformée en chaleur, laquelle devient finalement si diffuse que l'homme ne peut l'utiliser. Cette considération relative à l'énergie peut être étendue à la matière de la façon suivante : toute libération d'énergie stockée implique une destruction de matière et toute modification *avec valeur ajoutée* de la matière implique une dissipation d'énergie, ces deux relations étant toujours déficitaires.

A côté de ces éléments, N. Georgescu-Roegen pose le constat que la société humaine a besoin d'exploiter des ressources pour se perpétuer en tant que civi-

lisation, tant biologiquement, via la production d'aliments, que culturellement, via la production d'artefacts. Tout au long de l'histoire, tant des ressources de flux que de stock ont été utilisées pour ces usages.

Selon la loi d'entropie, les ressources de stock *valorisables* subiront dès lors une inexorable diminution due à cette exploitation, jusqu'à tendre vers l'épuisement. Cette évolution théorique est clairement illustrée par la notion de pic de pétrole discutée plus haut. Bien que grâce aux évolutions technologiques, on puisse faire son deuil d'une ressource grâce à sa substitution par une autre (du bois au charbon, puis au pétrole, au gaz, à l'uranium...), ces transferts ne peuvent offrir que des sursis, tant que l'on reste dans l'exploitation de ressources de stock. Vu la dépendance de l'humanité à ces ressources, la capacité de survie de celle-ci est elle-même logiquement limitée.

On peut donc théoriquement écrire la relation mathématique 4.3 entre la quantité de ressources de stock disponibles, le taux d'utilisation de celles-ci, et l'espérance de vie de l'humanité. Sur cette base Nicholas Georgescu-Roegen pose le constat logique que plus le taux d'utilisation des ressources de stock est élevé, plus courte est l'espérance de vie de l'humanité.

$$Vie = \frac{Stock}{Taux} \tag{4.3}$$

avec
Vie = l'espérance de vie de l'humanité
Stock = l'intégralité des ressources de stock disponibles
Taux = le rythme de consommation des ressources de stock

Ceci nous mène a poser deux questions d'ordre éthique : peut-on utiliser aujourd'hui des ressources de stock pour assurer des besoins non vitaux (c'est à dire non nécessaires d'une part à notre survie biologique et d'autre part à assurer notre condition humaine), tout en sachant qu'ainsi on réduit irrémédiablement l'espérance de vie de l'humanité et donc le nombre de vies humaines dans le futur ? Et, outre la satisfaction de besoins vitaux biologiques et culturels, la seule affectation admissible des ressources de stock n'est-elle pas la recherche de moyens de réduction de notre dépendance à ces même ressources, via un transfert vers l'exploitation des ressources de flux ? Nous postulons une réponse négative à la première question et affirmative à la seconde : les ressources de stock doivent être attribuées uniquement à la satisfaction des besoins vitaux et le virage vers une civilisation basée sur l'énergie solaire est une obligation éthique.

Si l'on interprète cette position du point de vue de l'architecture, deux conséquences apparaissent. D'une part, nous sommes amenés à exclure, dans la limite de nos moyens techniques actuels, les matériaux de construction autres que *vivants*, issus du réemploi ou recyclage de bâtiments existants, ou issus de ressources suffisamment abondantes que pour pouvoir être considérées comme pratiquement inépuisables. Ceci reviendrait à construire au moyen de matériaux en fibres végétales ou animales, de certains matériaux minéraux tels que la terre crue, et de matériaux recyclés à l'exclusion du *downcycling*. D'autre part, nous devrions limiter l'utilisation d'énergie dans les bâtiments à l'énergie de flux qu'ils sont capables de capter. Il s'agit donc de viser des bâtiments zéro-énergie, non pas dans le sens traditionnel d'un bilan net sur l'année (voir chapitre 7), mais dans le sens d'une absence totale d'utilisation de combustibles dans le bâtiment. A charge pour l'architecture de fournir, par sa conception uniquement, un niveau de confort adéquat pour l'épanouissement des occupants.

4.6 Conclusion - Nécessaire radicalité

Nous avons dans ce chapitre mené différentes réflexions autour de la question énergétique. Celles portant sur le changement climatique, la raréfaction des ressources et la précarité énergétique sont des reformulations d'éléments développés par d'autres auteurs. Elles sont suivies par des interprétations originales des travaux de Yoichi Kaya et Nicholas Georgescu-Roegen.

La discussion de l'enjeu climatique montre la nécessité d'une décarbonisation rapide du parc de bâtiments. Les études menées par le CERAA et Verbeeck *et al.*, bien que ne considérant pas les aspects de transformation des sources énergétiques, sont suffisamment parlantes que pour affirmer l'urgence de démarches drastiques de réduction des besoins d'énergie et la nécessité de se préoccuper en priorité de la rénovation du parc de bâtiments existants. Il s'agit là de nécessités pour répondre aux engagements politiques internationaux et pouvoir espérer limiter les conséquences du changement climatique en cours. Le fait que ce changement climatique est d'ores et déjà inéluctable est également une invitation à anticiper ses conséquences dans la limite de leur prévisibilité.

La question de raréfaction des ressources et l'effet de cascade entre différentes formes d'énergie est abordé succinctement. Il s'agit là de questions qui dépassent largement l'architecture et pour lesquelles notre compétence est limitée. Nous avons dès lors préféré éviter dans notre exposé les questions

d'actualité liées à l'énergie nucléaire, aux gaz de schistes ou sables bitumineux. Il n'en reste pas moins que le principe d'une concurrence de plus en plus dure entre différents besoins énergétiques alors que les ressources sont limitées nous semble fondé. Il en découle que l'établissement de conditions de confort dans les bâtiments gagnera à développer une forme d'autonomie énergétique par la valorisation de ressources à la fois locales (à l'échelle de la parcelle ou d'une collectivité) et peu délocalisables (c'est à dire à basse exergie, voir chapitre 10).

Le constat de la précarité énergétique d'une partie croissante de la population renforce la nécessité d'une action massive en faveur de la rénovation énergétique et nous rappelle que derrière les questions énergétiques se trouvent des hommes et leur habitat. La dimension sanitaire de la question énergétique et la responsabilité sociale de l'architecte sont donc mises en évidence.

Notre interprétation des travaux de Yoichi Kaya et Nicholas Georgescu-Roegen souligne la dimension éthique de la question soulevée par cette thèse. Elle montre également la logique qu'il y a à privilégier des modes constructifs basés sur des matériaux biosourcés ou en quantité abondante. Elle réaffirme aussi la pertinence d'un usage de l'énergie limité à terme à l'énergie de flux pouvant être captée localement.

Deuxième partie

Analyse des approches de l'énergie en architecture

Chapitre 5

Complexité de la question de l'énergie en architecture

Dans la première partie, nous avons identifié le contexte de notre sujet. Ce contexte est cerné par la mise en perspective historique de l'architecture verte ou écologique, par le recours à une définition de l'architecture soutenable qui s'inscrit dans cette perspective historique et par la reconnaissance des multiples enjeux liés à la performance énergétique des bâtiments.

Nous résumons les principaux constats des chapitres précédents comme suit :

- La notion d'écologie dépasse aujourd'hui celle de préservation de l'environnement et des ressources naturelles. Elle propose de considérer l'homme comme une part constitutive d'un milieu fait d'interactions complexes, ce qui inclut notamment une dimension sociale et culturelle ;
- Les outils actuels de reconnaissance de l'architecture écologique n'intègrent pas ou peu cette dimension, pour se centrer sur une inclusion uniquement physique de l'homme dans l'environnement et sur des aspects méthodologiques.
- L'interprétation de l'architecture soutenable qui est donnée au chapitre 3 est inspirée par cette vision actualisée de l'écologie. Elle inclut en effet simultanément le principe d'équité entre et au sein des générations et le principe d'intégration des composantes du développement soutenable. Le principe d'équité permet de prendre la mesure des enjeux actuels et à venir et de justifier une ambition forte et surtout concrète (aspect physique). Quand au principe d'intégration, s'il est compris comme incluant la dimension culturelle de l'homme, il est une transcription assez immédiate de cette nouvelle interprétation de l'écologie.

- La problématique énergétique est multiple, et concerne tant des aspects environnementaux (changement climatique) que de stratégie économique (raréfaction des ressources) et sociaux (précarité énergétique). Chacun de ces trois volets suffit à justifier une radicalité dans les démarches de performance énergétique. Les aspects environnementaux et de raréfaction des ressources justifient en outre le développement d'alternatives aux ressources fossiles et carbonées, particulièrement le développement de ressources locales et non-délocalisables ;
- Par une réinterprétation des travaux de Nicholas Georgescu-Roegen et Yoichi Kaya, nous pouvons placer ce besoin de radicalité dans les démarches de performance énergétique dans le domaine de l'éthique.

Nous pouvons prendre du recul par rapport à ces constats pour reconnaitre qu'ils placent notre question dans un domaine qui est en train de mettre en évidence sa propre complexité. Affirmer l'immersion de l'homme dans un milieu qui lui est extérieur, fait d'interactions multiples, et dans lequel il est libre d'agir, est une traduction presque explicite de l'idée de complexité. Pour E. Morin, l'acceptation de la complexité est "l'acceptation d'une contradiction" (Morin, 1990). La complexité est l'acceptation que deux idées semblant s'exclure doivent être liées pour arriver à la compréhension du monde, ici l'homme et la nature. La multiplicité des problématiques liées à l'énergie est également un indice de complexité. Alors que l'enjeu environnemental invite à augmenter la performance énergétique et à opter pour des énergies supposées propres, la raréfaction des ressources et l'effet de cascade qu'elle entraine met en évidence la limitation de toute forme d'énergie. Simultanément, le constat de précarité énergétique et à travers lui de paupérisation de la population rappelle que notre capacité de changement par l'investissement dans la performance énergétique est limitée.

Parallèlement, la reconnaissance des multiples visages de la crise énergétique met en évidence l'ampleur et l'urgence de la question posée. A ce titre, avoir fait le lien entre notre question et des aspects éthiques constitue à la fois un encouragement et une piste méthodologique : face à l'incertitude d'un monde en crise, il reste pour guider nos actions les valeurs que l'on se donne.

Ce contexte général ayant été reconnu, nous pouvons dans la deuxième partie présenter et critiquer un état de l'art plus précis, restreint à la dimension énergétique de l'architecture. Il s'agit d'identifier les démarches actuelles de performance énergétique dans le secteur de la construction, de les contextualiser et de questionner leur pertinence avec la notion d'architecture soutenable. Après un exposé général de l'état du domaine (chapitre 5) nous nous attacherons à décrire deux démarches particulières : le standard *Passivhaus* (chapitre

6) et les bâtiments zéro-énergie (ZEB) et par extension à énergie positive (chapitre 7). Suite à cette analyse, nous serons en mesure, à la fin de cette deuxième partie, de préciser et commenter la question posée par cette thèse (chapitre 8.1).

Pour commencer notre approche de l'énergie en architecture, nous pensons donc utile de reconnaître la complexité propre à cette question. L'intuition du caractère complexe de l'énergie dans l'architecture vient de ce nous avons dans la première partie mis en évidence la complexité de la notion d'écologie et des enjeux énergétiques globaux. Si le contexte est complexe, il y a fort à parier que l'élément particulier soit le sera également, soit devra développer une façon de répondre à la complexité de son contexte.

Après avoir défini ce que nous entendons par système complexe, nous allons nous attacher ici de façon rigoureuse à reconnaitre en quoi l'*énergie dans l'architecture* peut être assimilée à un tel système. Ceci afin de déterminer dans quelle mesure les outils et concepts propres aux théories de la complexité et de la systémique pourraient être pertinents pour cette question. Pour répondre à cela, nous faisons l'exercice de construire une représentation originale de ce système sous la forme d'un organigramme positionnant les différents éléments de l'approche énergétique des bâtiments et leurs relations.

La construction de cet organigramme est accompagnée d'un exposé, certainement non exhaustif, des questions afférentes de recherche. Ceci permet de brosser un état de l'art général des recherches passées et en cours liées à la performance énergétique. Bien que la construction proposée soit progressive, elle ne reflète que partiellement une chronologie de développement, mais s'approche plutôt de la description d'une accumulation logique, les nouveaux questionnements ne signifiant pas nécessairement l'obsolescence des précédents.

5.1 Définition de la complexité

La notion de complexité a été développée durant la seconde moitié du XX^{e} siècle. Elle se base à la fois sur une réaction face à une science cartésienne qui réduit abusivement ses objets d'étude à des unités autonomes et sur les avancées de cette même science qui constate au sein de ses objets sa propre limite. Notons deux exemples de ces constats venant des sciences exactes :

– La physique a clairement identifié à l'échelle macroscopique deux types de comportements : celui d'onde et celui de particule. Or, les objets mi-

croscopiques tels que le photon d'un rayonnement lumineux présentent de propriétés relevant à la fois de l'onde et de la particule. Bien qu'efficace pour caractériser leur comportement, cette juxtaposition de propriétés ne permet pas de comprendre ce que sont réellement ces objets. L'exemple de la dualité onde-particule montre la difficulté de compréhension de phénomènes qui ne trouvent pas leur équivalent dans le monde macroscopique qui nous est familier.

– La théorie du Big Bang décrit l'univers entre 10^{-32} et 10^{-12} secondes comme un brassage de photons et de paires quarks-antiquarks. Les premiers se matérialisent dans les seconds et les seconds s'annihilent (matière et antimatière) pour redevenir photon (lumière). La totalité de la matière actuelle de l'univers viendrait du déséquilibre de la matérialisation des photons : pour 10^9 antiquarks créés, il serait apparu $10E^9+1$ quarks. Ce modèle place l'origine du monde matériel, dont nous cherchons par la science à comprendre l'ordre, dans le désordre et l'aléatoire de rencontres de particules sur un laps de temps de l'ordre de la picoseconde.

D'autres exemples d'incohérences apparentes peuvent être identifiés dans les sciences humaines, qui posent des difficultés méthodologiques lorsque l'on cherche à proposer des modèles d'explication du monde, et particulièrement le rapport de l'homme au monde. La théorie de la complexité est dès lors une approche qui reconnait les limites de la pensée simplificatrice issue du cartésianisme et qui cherche à proposer de méthodes de traitement des comportements paradoxaux et récursif (l'action auto-transformante). Parmi ces méthodes on trouve des principes de réflexion qui potentiellement pourraient s'appliquer à la question développée dans cette thèse. Citons Edgard Morin (Morin, 1990) et ses principes dialogiques, de récursion organisationnelle et hologrammatiques ou le nouveau discours de la méthode de Jean-Louis Le moigne (Le Moigne, 1994). Plus pratiquement, le raisonnement analogique, les techniques d'aide à la décision (recherche opérationnelle, théorie des jeux, etc.), la représentation graphique et la modélisation systémique sont proposés par Daniel Durant pour penser le monde aujourd'hui (Durand, 1979).

Une des idées-clef de la complexité étant la recherche d'un savoir sur base de la liaison des objets et non plus seulement sur leur dissociation, la notion de système a assez naturellement été présentée comme liée à celle de complexité. Un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique organisés en fonction d'un but (Groupe d'Intervention et de Recherche en Organisation des Systèmes, 2010). Il est dit complexe si le comportement du système n'est pas prédictible par l'analyse du fait par exemple de comportements paradoxaux de certains de ces éléments. Les individus et sociétés humaines ayant à l'évidence

un caractère paradoxal, toute activité intégrant une dimension humaine pourrait être analysée en tant que système complexe. Ce sera donc le cas à la fois de l'architecture et de la soutenabilité dont le principe d'intégration met en évidence la nécessaire prise en compte des multiples dimensions paradoxales du développement humain.

5.2 Le bilan énergétique

5.2.1 Méthodes d'évaluation

Le rapport technique du CEN (CEN, 2009) donne un aperçu de la cinquantaine de normes de calcul traitant de la performance énergétique des bâtiments, dont plusieurs ont été révisées suite à l'approbation de la Directive Européenne 2002/91/EC dite EPBD (Parlement européen, 2002b). Ces normes font dans une large mesure référence aux standards internationaux ISO classifiés ICS 91.060.01 et 91.120.10.

Ces normes établissent les équations de bilan énergétique qui servent de base à tous les outils de calcul actuels de la performance énergétique des bâtiments. Elles se basent sur des formes explicites et simplifiées des équations physiques générales de conservation de la masse et de l'énergie. Les principales simplifications sont :

- l'hypothèse d'un régime statique en conduction. Les températures dans les parois sont généralement supposées indépendantes du temps, ce qui permet d'écrire la loi de Fourier sous une forme linéaire simple mais néglige les effets d'accumulation de chaleur dans les parois. Cet oubli est partiellement corrigé par l'intégration d'une constante de temps utilisée pour calculer la valorisation des gains internes et solaires.
- Le comportement des occupants est négligé. Il n'est pris en compte que par le biais de températures de consigne en chauffage et climatisation et de valeurs forfaitaires de gains internes et de taux de ventilation. Précisons que cette simplification est le fait des outils de calcul et non des normes elles-mêmes.
- Le climat extérieur est simplifié. La température n'est pas corrigée par des paramètres microclimatiques, le vent est supposé constant et intégré uniquement au travers du coefficient de convection des parois externes. Une nouvelle fois, il s'agit là de simplifications liées aux outils de calcul.

Dans les outils dits statiques (PEB software, PHPP et autres), ces équations sont résolues sur base saisonnière ou mensuelle, voire hebdomadaire. Ces ou-

tils ne sont pas adaptés à un calcul sur des périodes de temps plus fines, car alors l'hypothèse d'un régime statique en conduction n'est plus valide. Pour des analyses plus fines, il est nécessaire de passer par des outils dits dynamiques qui, sur base des équations physiques générales non simplifiées modélisent le comportement du bâtiment face à des sollicitations variables, en intégrant l'impact de l'évolution temporelle des propriétés physiques, essentiellement la température interne des matériaux (trnsys, Energy+ et autres). Les logiques de résolution du bilan énergétique des outils statiques et dynamiques sont représentées par la figure 5.1. Outre une plus grande exactitude et la possibilité d'analyses plus fines, les outils dynamiques permettent d'intégrer des scénarios de comportement des occupants ou de tout autre paramètre et d'identifier leur rôle dans le comportement du bâtiment. Le passage des outils statiques aux outils dynamiques est donc celui d'outils d'évaluation standardisée à des outils d'analyse. Cependant, et bien que la résolution mathématique des équations ne soit plus explicite mais itérative dans les outils dynamiques, ces outils restent centrés sur une logique explicite. Des règles univoques de comportement sont établies pour chaque paramètre, y compris l'occupant, et le modèle suit ces règles. Différents outils mathématiques tempèrent le caractère *machiniste* de ces modèles, tels que les courbes d'hystérèse et l'imbrication logique de multiples conditions (règles en ET et OU), mais la logique reste celle d'un comportement entièrement décrit dont seule la conséquence physique est inconnue. De ce fait, nous sommes face à des systèmes compliqués (nombre important d'éléments liés entre eux dans un système) mais non complexes. La nouvelle génération d'outils apparaissant actuellement, dit de CFD (Computational Fuid Dynamic) ne modifie en rien cette situation (Fluent, Open Foam et autres). Leur seul avantage est de libérer l'évaluation de l'hypothèse *multizonale* des outils dynamiques. On passe d'une évaluation où chaque espace est représenté par un vecteur de valeurs (température, humidité, etc.), à une évaluation où chaque espace est divisé en milliers ou millions de points, ce qui offre une plus grande précision numérique et une capacité d'analyse spatiale plus fine.

5.2.2 Paramètres

Quel que soit l'outil utilisé, le comportement énergétique réel du bâtiment peut être limité à un nombre fini d'éléments en interaction. Ces éléments sont l'habitant, l'édifice construit, le climat et les systèmes *Fluides et Energie* (F&E). L'organigramme repris en figure 5.2 explicite les liaisons entre ces éléments. Nous y voyons deux types de développements liés à la performance énergétique. Les uns relèvent de l'optimisation de chacun des éléments, les autres de la valorisation de leurs liaisons. L'optimisation de chacun des élé-

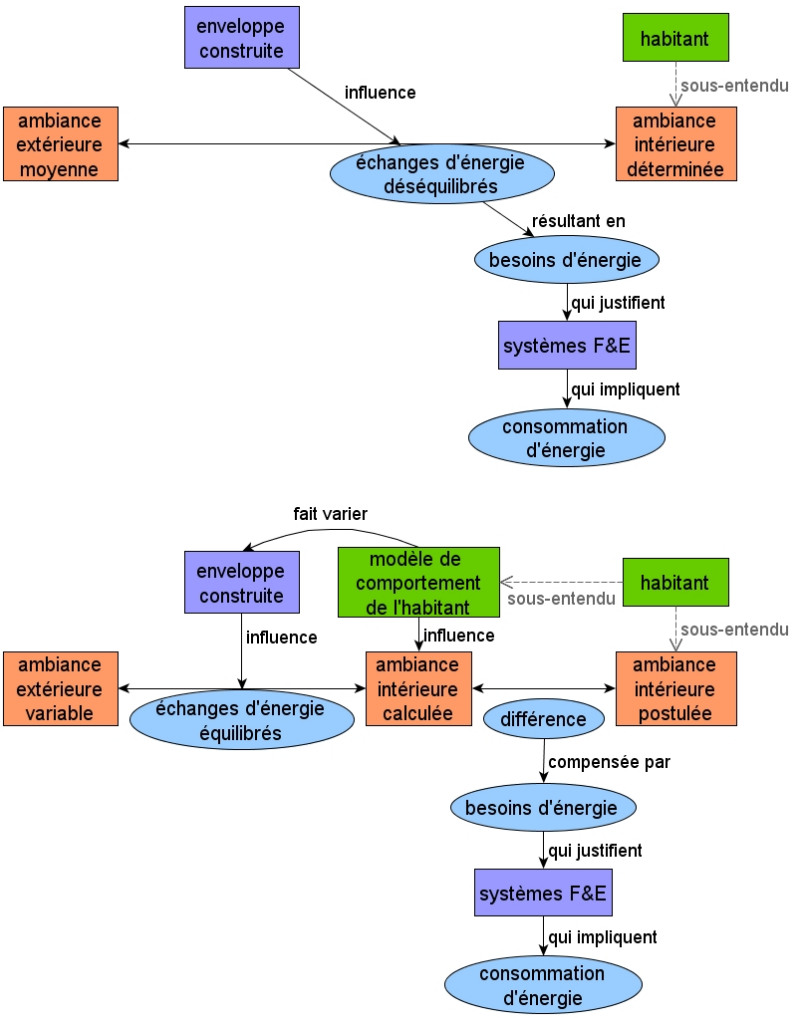


FIGURE 5.1 – Modélisations statiques (en haut) et dynamiques (en bas) du bilan énergétique d'un bâtiment. Place de l'habitant, des ambiances intérieures et extérieures, de l'enveloppe et des systèmes fluides et énergie.

ments pris isolément a permis de nombreuses évolutions améliorant la performance énergétique :

- Au niveau de l'édifice
  On a vu une adaptation des techniques constructives suite à l'énoncé d'objectifs performantiels. Leur objet est de minimiser les pertes d'énergie au travers de l'enveloppe. Typiquement, il s'agit de l'augmentation de la résistance thermique des parois couplée à leur étanchéification à l'air. En marge, des dispositifs nouveaux ont été proposés, tels que murs Trombe ou doubles façades ventilées, qui visent à donner aux parois un rôle de captage d'énergie solaire.
- Au niveau des techniques de contrôle climatique
  Les développements relèvent de l'amélioration des modes de production, distribution et émission de chaleur et de froid. C'est probablement au niveau des productions que les évolutions sont les plus spectaculaires, avec le développement de techniques à haut rendement (chaudières à condensation ou pompes à chaleurs) ou basées sur des sources renouvelables. Au niveau de la distribution et de l'émission, des développements tels que les plafonds rayonnants, les circulateurs à vitesse variable ou les groupes de ventilation à débit modulé permettent, moyennant une gestion adéquate, des économies d'énergie substantielles.
- Au niveau de l'habitant
  Une prise de conscience de l'impact des modes de consommation d'énergie a permis le développement de démarches volontaires basées sur la modération : réduction des températures de consignes, autodiscipline dans la gestion de l'éclairage...
- Au niveau des ambiances extérieures
  L'insistance sur l'existence d'une identité microclimatique aurait pu mener à des plans d'aménagement intégrant des propositions de développements justifiés par des éléments climatiques. Malgré le développement dès les années 1980 d'outils de modélisation des ombres portées à l'échelle urbaine (Goretzky, 1989), cette dimension semble n'avoir eu ces dernières décennies que peu de poids face aux autres forces décidant du caractère urbanisable ou non des territoires. Si le climat n'a que peu défini les développements urbanistiques récents, il reste que c'est une donnée qui peut être modifiée par des dispositifs spécifiques tels que plantations, bassins, ombres portées, principalement dans le sens d'une diminution des températures d'été. Inversement, des paramètres liés à l'accumulation de décisions individuelles tels que la circulation automobile créent en ville un effet d'îlot de chaleur. Le climat extérieur est donc un élément partiellement modifié par des actions humaines directes ou indirectes.

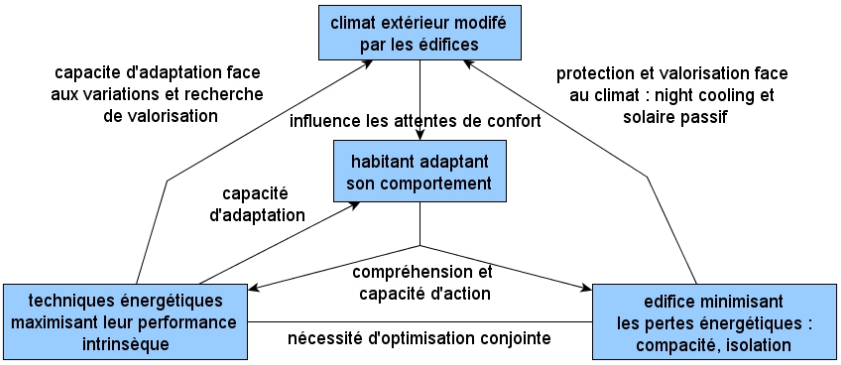


FIGURE 5.2 – Organigramme de l'efficacité énergétique des bâtiments

L'observation des relations entre éléments de l'organigramme permet également d'identifier des pistes de performance énergétique. Nous relevons les relations suivantes :

- Relation climat-habitant
  Nous savons depuis les travaux de divers auteurs tels que Gail S. Brager et Richard J. de Dear (Dear (de) et Brager, 1998; Brager et Dear (de), 2002) que le climat est une des composantes modifiant la sensation de confort thermique dans les bâtiments. Leurs travaux ont mis en évidence la variation des plages de confort dans les bâtiments en fonction des moyennes de température extérieure, pour autant que l'occupant ait une capacité d'action dans le bâtiment. La relation climat-habitant est donc une ouverture vers les relations habitant-édifice et habitant-systèmes. Par ailleurs, la relation de l'occupant au lieu, dont le climat est une des composantes est également un axe de réflexions plus philosophiques (Berque, 2009), qui peut être lié à la question énergétique. Ce point sera abordé dans un chapitre ultérieur (chapitre 12).
- Relation habitant-techniques et édifice
  La relation de l'occupant aux techniques et à l'édifice est un axe d'étude assez récent. L'étude du confort s'est initialement centrée sur la seule question du métabolisme (Fanger, 1970). La liaison du confort à des dimensions comportementales et la liaison du comportement aux conditions climatiques sont cependant connues depuis longtemps (Nicol et Humphreys, 2005). Il a néanmoins fallu quelques décennies pour voir apparaitre des théories du confort intégrant explicitement ces dimensions et la composante psychologique du confort (adéquation entre le ressenti et l'attente), sous le terme de confort adaptatif (Humphreys,

1976; Humphreys, 1978; Auliciems et Szokolay, 1986; Dear (de) et Brager, 1998; Dear (de) et Brager, 2001). Cette modification de la compréhension du confort a nécessité de reconsidérer l'individu comme un acteur de son environnement construit. Le manifeste Plea 2009 (PLEA2009 deleguates, 2009) et l'article qui lui fait suite (Cole *et al.*, 2010) décrivent très exactement ce tournant dans le rôle donné à l'habitant. Parallèlement, l'optimisation des techniques a, à un certain point, fait le constat qu'elle ne pouvait s'évaluer que par rapport à la réalisation effective d'un niveau de satisfaction des occupants, ce qui impliquait l'intégration de celui-ci dans le domaine d'étude (démarches de *commissioning* (Visier et Jandon, 2004)). Là aussi l'habitant a vu son statut se modifier, passant d'une notion abstraite justifiant des consignes climatiques déterminées à celui d'individu à part entière, acteur de la réalisation d'ambiances confortables, dont les attentes ne sont que partiellement définissables *a priori*. Du nouveau statut de l'habitant nait une exigence spécifique de compréhensibilité et de facilité d'interaction, tant avec les systèmes techniques qu'avec l'édifice. Ces dernières années, la gestion technique du bâtiment s'est complexifiée au travers de techniques plus poussées de communication entre organes et d'interfaces qui offrent plus de possibilités de programmation. Ces développements de solutions domotiques ouvrent beaucoup de possibilités en termes de gestion mais souffrent d'une complication réelle ou perçue qui limite leur développement. On est là face à une situation paradoxale où les développements des outils de gestion pourraient rendre celle-ci moins intuitive et limiteraient de ce fait la capacité d'une partie des habitants à développer des comportements éco-efficients.

– Relation édifice-techniques
  Elle s'est d'abord concentrée sur la question de l'intégration des réseaux techniques et leur possible valorisation en conception (Banham, 1984; Gruloos, 1996). Cette approche, assez similaire à celle de la question de l'utilisation d'éléments structurels en conception spatiale semble assez naturelle dans le travail de l'architecte. Plus récemment, et de façon peut-être moins concrète pour l'architecte, est apparue la question du choix simultané des techniques et de l'architecture. Cette combinaison se fait essentiellement au travers de notions performantielles, et relève donc plus de l'évaluation purement théorique que de la conception. Le standard constructif *Passivhaus* est une manifestation de cette approche, contrairement à ce que sa vulgarisation, centrée sur des niveaux d'isolation et des performances de fenêtres peut laisser croire. L'origine du standard se trouve dans une réflexion sur la capacité à se libérer de la contrainte économique d'un réseau de chauffage par émetteurs statiques, jusque là indispensables à la réalisation d'une ambiance contrôlée dans

l'ensemble des espaces d'un logement (voir chapitre 6). La recherche d'économie sur ce poste vise à dégager une marge d'investissement sur d'autres postes, tels que la récupération d'énergie sur la ventilation, l'étanchéité à l'air et l'isolation thermique, tout en conservant une pertinence économique globale (pour plus de détail sur l'origine du standard *Passivhaus*, voir le chapitre 6). Les conséquences physiques de la volonté de suppression de cet équipement sans modification du climat intérieur ont été traduites en performances, puis en modes constructifs (Feist *et al.*, 2005). Il s'agit donc bien d'une réflexion visant la liaison des questions de techniques et de modes constructifs. L'analyse des liaisons entre techniques et enveloppe montre également que la combinaison d'une réduction maximale des besoins et le choix d'une technique à performance maximale ne mène pas nécessairement à l'optimum énergétique. Le projet de recherche BTP1000 (van Moeseke *et al.*, 2012b) nous a notamment appris que, dans le cas de bâtiments tertiaires climatisés au moyen de pompes à chaleur géothermiques réversibles, une maximisation de la performance de l'enveloppe peut mener à un déséquilibre entre besoins de chauffage et de refroidissement qui pénalise le rendement global de l'installation.

– Relation climat-édifice
  La question de la relation de l'édifice au lieu a commencé par une approche solaire puis climatique de l'architecture. Les théories climatiques se sont décomposées dans nos régions en stratégies d'été, d'hiver et d'éclairement naturel. L'équilibre entre ces différentes stratégies, leur développement parallèle harmonieux est une difficulté de cette approche. Les exemples d'une intégration explicite de contraintes climatiques dans les formes construites sont multiples, dans l'architecture tant vernaculaire que conceptualisée. Récemment, dans un retournement de la thématique, l'étude de la qualité des espaces extérieurs en fonction de l'architecture des édifices est apparue comme sujet à part entière, sous le terme de microclimatologie urbaine.
– Relation climat-techniques
  Enfin, notons que la relation de la technique au lieu commence également à apparaître, notamment via des technologies de géothermie, qui impliquent une connaissance hydrique et géologique du site, ou des techniques de valorisation de l'énergie éolienne.

L'ensemble d'éléments liés et organisés en fonction d'un but représenté par la figure 5.2 page 77 constituera un système si les différents éléments sont en interaction dynamique. Nous voyons cette interaction dynamique à trois niveaux : le caractère paradoxal d'une difficulté de gestion causée par le développement des organes de contrôle ; le fait que l'optimisation dissociée de

la performance de l'édifice et des techniques ne mène pas nécessairement à un optimum énergétique ; le caractère dynamique de notre climat qui nécessite l'intégration simultanée de stratégies climatiques propres aux climats froids et aux climats chauds, ce qui renforce la nécessité d'une capacité d'action de l'habitant dans l'édifice et face aux techniques.

Mais le statut de système n'implique pas la complexité. Notons par exemple que la relation dynamique édifice-techniques est prédictible par l'analyse au moyen des outils mathématiques actuels et que la définition d'un optimum global est relativement aisée. Il en va de même pour la dynamique climatique qui peut être étudiée par des approches d'optimisation. La question du contrôle par l'habitant est par contre bien plus difficile à analyser et à prédire. Des modèles probabilistes qui tentent de décrire le comportement des habitants face à des paramètres physiques commencent à apparaître (citons par exemple le modèle de prédiction d'ouverture de fenêtre proposé par Humphreys (Rijal *et al.*, 2007)). Ils se basent sur une analyse statistique d'observations de comportements réels, et permettent au sein des modèles d'échapper à l'écriture de règles de comportements explicites. Ces modèles sont cependant encore limités et ne pourront intégrer toute la complexité des modes de décision humains. La complexité du système *efficacité énergétique des bâtiments* que nous avons construit apparaît donc comme étroitement liée au rôle de l'habitant dans le système.

5.2.3 Evolutions récentes

Ces dernières années, le domaine de l'énergie dans le bâtiment a connu une importante évolution sous la forme d'un élargissement de son champ d'évaluation. Cet élargissement est triple. Premièrement la prise en compte limitée aux besoins d'énergie de chauffage est devenue une évaluation de l'ensemble des postes de consommation d'énergie liés à l'établissement de conditions intérieures confortables dans le bâtiment. Deuxièmement la vision centrée sur l'usage de l'énergie s'est élargie à une prise en compte des impacts environnementaux particuliers des différents vecteurs énergétiques. Cet élargissement se fait au travers de la notion d'énergie primaire et de la notion aujourd'hui encore confidentielle d'exergie (Sakulpipatsin, 2008). Enfin, l'analyse du bâtiment a été replacée dans celle plus large des réseaux énergétiques, ce qui a mené à la définition de nouveaux objectifs performantiels tels que le concept *zero energy building* (Torcellini P., 2006). Ces différents élargissements sont soutenus notamment par les directives européennes sur la performance énergétique des bâtiments (Parlement européen, 2002b; Parlement européen et Conseil européen, 2010).

Cet élargissement n'est pas de nature à modifier le caractère partiellement complexe de la question de l'énergie dans le bâtiment. Il s'agit d'une augmentation de la complication (multiplication des paramètres à considérer) qui reste compatible avec l'idée d'un modèle analytique de la performance énergétique permettant l'identification d'optimums.

5.3 Le bilan environnemental

5.3.1 Approche agrégative

La réflexion énergétique intègre aujourd'hui l'idée que le bâtiment n'est pas seulement un objet habité, mais également un travail d'accumulation de matériaux. La question de l'impact environnemental de la matière s'est développée indépendamment de la question énergétique, et a mené à des concepts tels que l'analyse de cycle de vie (ISO, 1997), qui donne au bâtiment une échelle temporelle complète (avec origine, fin et étalon de mesure), et le place dans une filière industrielle qui elle-même s'interroge sur son impact. Cette intégration au sein de filières industrielles ramène l'édifice à un artefact matériel comparable à n'importe quel objet de design, voir même de consommation, ce qui devrait profondément interpeller l'architecte. Cette intégration des enjeux environnementaux liés à la matière mène notamment à des propositions d'objectifs nouveaux tels que la démarche *Craddle to Craddle* (Brauntgart, 2002), ou de redéfinition d'objectifs existants. Citons par exemple le concept de *Life-Cycle Net-zero Energy Building* (Hernandez et Kenny, 2010).

Il est aujourd'hui établi, vu le poids grandissant de l'énergie grise dans le bilan énergétique, que l'évaluation de la qualité énergétique d'un projet ne peut faire l'économie d'une prise en compte de cet impact (voir figure 10.1). Il ne s'agit cependant que d'ajouter un terme à l'équation énergétique, qui une fois encore va rendre la recherche d'optimums plus ardue, mais sans ajout de complexité au sens défini plus haut. L'évaluation de l'énergie grise n'entraine en effet aucun effet réellement paradoxal.

Qu'en est-il si l'on cherche à intégrer l'ensemble des dimensions environnementales des matériaux, au-delà de l'énergie grise ? Une telle évaluation présente une difficulté méthodologique : ces impacts étant multiples et touchant à des dimensions différentes, allant de l'acidification de l'atmosphère à l'utilisation de surfaces terrestres, nous sommes démunis lorsqu'il s'agit de poser un choix intégrant l'ensemble de ces problématiques. Pour appréhender cette diversité d'impacts, l'approche actuelle la plus courante est celle de l'agrégation. Celle-ci est rendue possible par le passage d'une mesure d'im-

pact environnemental absolu à celle d'un impact relatif : en définissant pour chaque dimension environnementale une échelle relative propre, il est possible d'obtenir un ensemble d'indicateurs permettant des opérations mathématiques telles que des moyennes pondérées. C'est, sous une forme ou une autre, l'approche proposée par les référentiels multicritères tels que BREEAM, LEED, HQE et équivalents. La définition pertinente de ces échelles de pondération entre variables indépendantes, ou de tout autre mode de calcul répondant à ce même objectif est une difficulté majeure. Cette difficulté relève-t-elle de la complexité ? Il reste théoriquement possible d'objectiver l'enjeu relatif de différents impacts dans un contexte donné. C'est par exemple l'objectif que se donnent des disciplines telles que l'économie de l'environnement. Malgré une grande difficulté inhérente à ces évaluations, des solutions analytiques peuvent théoriquement être établies et des optimums identifiés et démontrés de façon analytique. Nous ne sommes donc pas fondamentalement dans le régime du paradoxe et de la complexité.

5.3.2 Approche holistique

Une autre approche de la globalité des questions environnementales est l'approche dite holistique. Il s'agit ici d'acter la dissociation des différentes dimensions environnementales de l'acte de construire et de chercher à développer des projets simultanément pertinents dans chacune des dimensions. Les fondements de l'approche holistique ont été largement présentés lors de l'exposition "Habiter écologique" (Gauzin-Müller *et al.*, 2009) et avant cela dans le livre "25 maisons écologiques" de Dominique Gauzin-Müller (Gauzin-Müller, 2005). On trouve dans le catalogue de cette exposition des rapprochements explicites entre holisme et complexité, et des éléments de justification similaires à ceux utilisés contre la critique d'une démarche cartésienne de découpage de la réalité. L'approche holistique y est également représentée comme une tentative de rapprochement entre science et art, raison et intuition, portée par de nouvelles relations humaines entre les acteurs du projet. Cette démarche est censée synthétiser, dans un travail pluridisciplinaire, l'analyse des contextes physiques et socioculturels et de leurs interactions, avant l'évaluation des incidences positives et négatives du projet sur ces différents plans à différentes échelles de temps.

La volonté de réponse simultanée à de multiples enjeux de cette démarche cherche à sortir d'une approche purement cumulative que nous associons aux indicateurs habituels de construction environnementale. Notons que s'il existe un dispositif constructif qui présente une valeur ajoutée sur chaque dimension environnementale, il devrait théoriquement être identifié par les deux ap-

proches, tant holistiques qu'agrégatives. L'approche holistique a néanmoins une valeur intrinsèque qui tient à deux éléments. Le premier est son ouverture possible vers une multiplicité de dimensions qualitatives telles la qualité spatiale ou poétique de l'architecture. Il s'agit de dimensions dont l'intégration dans une démarche agrégative, nécessairement quantitative, présente des difficultés insurmontables. Le second est l'ambition d'aborder la multiplicité des paramètres, y compris la multiplicité des interactions entre paramètres, par la conception d'un objet unique cohérent, ce que ne vise pas une approche agrégative centrée sur l'optimisation plus que sur la cohérence. Cette recherche de l'objet unique aux cohérences multiples, lieu de synthèse et d'apparition d'une qualité supérieure à la somme des parties est en soi proche des raisonnements systémiques et complexes, qui cherchent la connaissance dans la liaison entre éléments différents plutôt que dans l'analyse de chaque élément.

Il apparait donc que l'approche holistique reflète une volonté de prise en main d'une forme de complexité oubliée par les approches cumulatives, qui est celle propre au projet. La recherche d'une réponse pertinente aux multiples enjeux quantitatifs relevant du projet d'architecture, le résultat du processus de conception ne peut être déterminé *a priori*. Ce projet est en outre évalué et modifié en fonction de sa réponse qualitative aux enjeux non quantifiés ou non quantifiables. L'ensemble du processus de conception prend donc la forme d'une itération entre des évaluations de multiples natures. Cette itération est non directive, dans le sens où son résultat ne peut être présupposé, et laisse place aux éventuels paradoxes de conditions identiques menant à des propositions différentes. Le résultat de l'approche holistique peut être éventuellement non optimal au sens de l'approche agrégative, mais il peut présenter une qualité supplémentaire selon sa propre échelle d'évaluation.

5.4 Complexité liée au processus

Ce qui précède a permis de montrer que la question de la performance énergétique de l'architecture est aujourd'hui approchée d'une façon qui ne relève que peu de la complexité. Seuls deux aspects permettent de faire le lien avec cette notion, à savoir le rôle de l'habitant et l'étude de cette question en tant que projet d'architecture, au travers de la démarche holistique. Ce dernier aspect relève plus de l'utilisation qui peut être faite du système que du système en tant que tel. Deux autres dimensions peuvent être considérées pour clore cette discussion sur le caractère complexe de notre sujet d'étude. Il s'agit du processus de production de bâtiments et de la question du développement soutenable.

Les sections précédentes se focalisent sur la conception du bâtiment. Or, l'impact énergétique réel est celui lié à la mise en œuvre et à l'habitation effective des bâtiments. Le passage du projet à la réalité concrète doit donc lui aussi être analysé. Nous nous bornerons ici à relever que la réalisation concrète d'un projet entraîne l'intervention de multiples intervenants : concepteurs, décideurs, constructeurs, habitants. Il est donc nécessaire de considérer la prise de décision de chaque acteur, et les moyens qu'ils mettront en place pour dire le projet, comme indiqué dans l'organigramme complété de la figure 5.3.

La prise de décision n'est pas systématiquement la résultante directe d'un développement analytique, et la communication entre humains est toujours imparfaite, dans le sens où l'image générée dans l'esprit de l'auditeur n'est jamais identique à celle de l'orateur. La définition adéquate des moyens de communication (dessins de différentes natures, rapports, notes de calcul, réunions, etc.), cherche à minimiser cette différence, mais tant que le médium demandera interprétation, cette différence subsistera. Le résultat de cette relative incompréhension est non prévisible. Il peut s'agir d'une perte de qualité comme de l'émergence de nouvelles idées, par exemple par confrontation entre les images mentales des deux parties.

De cela on peut conclure que la réalisation puis l'habitation concrète du projet, en ce qu'elles nécessitent prises de décision et communications entre hommes, sont sources de complexité dans l'analyse de la performance énergétique de l'architecture.

5.5 Complexité liée au développement soutenable

La notion d'architecture soutenable et les 5 principes théoriques que nous y associons ont été présentés dans le chapitre précédent. Relativement à la question de complexité de la réflexion énergétique, nous nous limiterons à relever que :

1. La question de la soutenabilité amène l'idée de finalité du système, finalité qui peut être différente pour les multiples acteurs (réduction d'impact environnemental, bénéfice financier…). Nous avons jusqu'ici implicitement considéré que l'approche développée visait la minimisation de la consommation énergétique, mais ce point de vue n'est qu'une des finalités possibles du système énergie-bâtiment.
2. Selon le principe d'intégration des composantes, la réflexion énergétique est plongée dans un contexte social, économique et culturel. L'approche

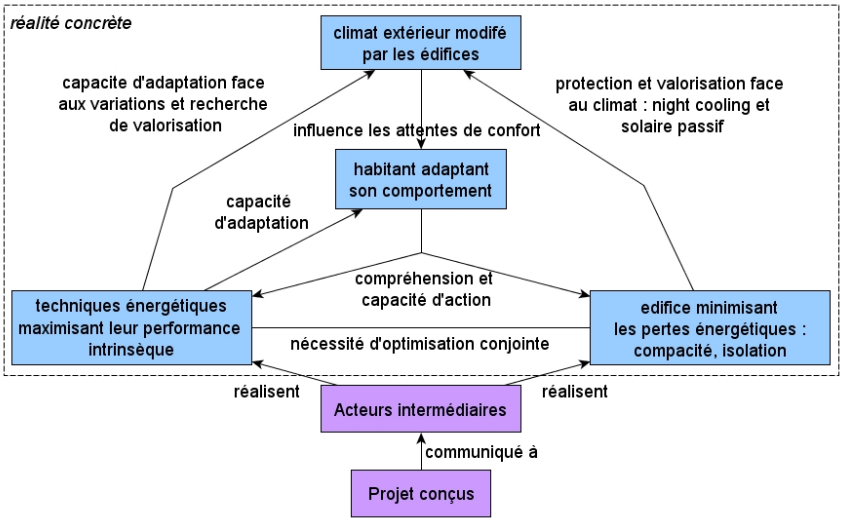


FIGURE 5.3 – Organigramme complété de l'efficacité énergétique des bâtiments

holistique présentée plus haut constitue une ouverture vers la prise en compte de ces éléments de contexte. Ce principe n'ajoute pas de complexité interne au système énergie-architecture, mais le replace comme sous-système d'un ensemble bien plus large de soutenabilité des sociétés humaines sur terre, en interaction avec d'autres questions tout aussi importantes que, par exemple, l'accessibilité au logement, les conditions de travail sur chantier, les politiques de dispersion ou concentration d'habitat, la situation macro-économique, etc. Ce recadrage du système que nous étudions ici, qui le place comme sujet d'influences extérieures marque un accroissement considérable de la complexité de la question de performance énergétique, vue comme partie d'une question plus large qui pourrait être celle de l'architecture, elle-même composante d'autres systèmes.

3. Selon le principe de précaution et d'incertitude, l'utilisation du système doit se faire en intégrant une incertitude quant à la qualité de sa modélisation, son efficience et sa robustesse face aux échelles de temps mises en jeu dans la question qui nous occupe. Il s'agit en effet de décider aujourd'hui, avec les limites qui sont les nôtres, ce qu'il convient de faire demain en fonction d'une finalité à moyen ou long terme.

La notion de développement soutenable augmente donc manifestement la complexité, non pas du système en tant que tel, mais de l'utilisation de ce système comme outil.

5.6 Conclusion - La complexité de l'homme et de ses finalités

Dans ce chapitre, nous reprenons la définition d'un système en tant qu'ensemble d'éléments en interaction dynamique organisés en fonction d'un but (Groupe d'Intervention et de Recherche en Organisation des Systèmes, 2010). Nous considérons ce système complexe si son comportement n'est pas prédictible par l'analyse du fait par exemple de comportements paradoxaux de certains de ses éléments. Notre présentation des recherches passées et actuelles liées à la physique du bâtiment nous a permis d'identifier les éléments constitutif d'un système *énergie dans le bâtiment*. Ce système englobe les dispositifs technologiques mais les dépasse largement pour y inclure le climat, l'habitant et les sources et usages de l'énergie. Le but que nous lui attribuons est la performance énergétique. Les développements présentés dans ce chapitre permettent de constater la part de complexité inclue dans ce système. Bien que les méthodes d'évaluation de la performance énergétique soient analytiques et qu'un grand nombre de paramètres puisse être modélisé dans une approche prédictive, des éléments de complexité sont bien présents.

Une part de complexité apparaît lorsque l'on considère le rôle de l'habitant, sujet non réductible à un jeu d'équations. Une autre part apparaît lorsque l'on considère l'action des différents acteurs de la conception et de la réalisation, leur mode de décision et la nécessité de communication entre eux. Enfin, la notion de développement soutenable a mis en évidence la relation entre le système étudié et d'autres éléments qui le côtoient ou l'englobent. La soutenabilité amène également l'idée de finalité du système. Tant la liaison du système énergie à d'autres dimensions, notamment économiques et sociales, que cette question de finalité propre à chaque observateur du système ajoutent une forme de complexité. Plus qu'une propriété du système étudié, cette complexité est celle du contexte du système.

A la question posée en début de chapitre de la pertinence éventuelle des outils propres à la pensée complexe et à la systémique pour aborder l'actualisation de l'approche énergétique des bâtiments, nous pouvons répondre par l'affirmative dès l'instant où l'on reconnaît que la physique du bâtiment n'est pas suffisante pour effectuer cette actualisation. La complexité apparaît dès lors que l'on considère la qualité énergétique de l'architecture comme un projet humain qui, matérialisé par des éléments répondant aux lois physiques, est entrepris avec une visée de soutenabilité dans un contexte particulier. Les développements de ce chapitre ont permis de pointer l'approche holistique comme une démarche acceptant cette complexité, à l'opposé d'une approche agrégative purement analytique.

Clôturons ce chapitre en pointant que l'analyse du caractère complexe visait le système limité *énergie du bâtiment*. Il ne s'agissait pas de discuter du caractère complexe de l'architecture. Une réflexion intéressante pourrait être celle de l'impact de la transcription des exigences énergétiques et environnementales sur la complexité de l'architecture elle-même. L'architecture relève de la gestion de la complexité car elle est le lieu de synthèse de multiples champs disciplinaires et se base sur l'invention de projets qui combinent qualités propres et réponses aux multiples attentes particulières des acteurs du projet. La tendance actuelle à l'intégration d'exigences énergétiques dans les codes de construction peut légitimement être perçue comme une limitation des capacités d'invention de l'architecte, si ces exigences brident objectivement la capacité de l'architecture à répondre aux autres attentes de la société et à déployer sa qualité propre. Un tel scénario participerait à une négation de la capacité d'invention et de prise en compte de la complexité du monde par l'architecture. Il tendrait à limiter l'architecture à la formalisation d'un objet essentiellement défini en dehors du processus de projet. Il nous semble qu'il s'agit là d'un enjeu de débat réel et immédiat qui mériterait une analyse spécifique, vu notamment les volontés politiques de renforcement majeur des impositions énergétiques (Parlement européen et Conseil européen, 2010).

Chapitre 6

Le standard *Passivhaus*

Puisque le standard *Passivhaus* domine aujourd'hui le paysage de la construction basse énergie en Belgique et dans une grande partie de l'Europe, il nous semble nécessaire de lui consacrer un chapitre de notre analyse des approches de l'énergie en architecture. C'est d'autant plus nécessaire que ce standard est en passe de devenir un niveau d'exigence imposé par règlement en Région de Bruxelles-Capitale (Vanderhaeghen *et al.*, 2012)). Nous proposons donc dans ce chapitre de rappeler les origines et principes de ce standard, avant d'effectuer une critique originale de sa traduction en Belgique et d'en effectuer une analyse détaillée à la lumière des principes de soutenabilité mis en évidence dans le chapitre 3. L'objectif est de déterminer dans quelle mesure ce standard est capable de constituer une manifestation de l'architecture soutenable telle que définie au chapitre 3. Notons qu'afin d'éviter toute confusion dans cette thèse, nous utilisons pour désigner ce standard le terme *Passivhaus* non l'appellation usuelle *maison passive*. Nous réservons au terme *passif* le sens plus général de valorisation par l'architecture des forces naturelles, tel qu'il était utilisé avant le développement du standard *Passivhaus*.

6.1 Origine et développement du concept

Les principes du standard *Passivhaus* ont été développés il y a 20 ans et se sont répandus rapidement suite au projet européen Cepheus qui a analysé la pertinence technique et financière ainsi que l'acceptabilité sociale de logements construits selon ce standard (Krapmeier et Drössler, 2001). L'idée centrale de ce standard est de pousser la performance énergétique suffisamment loin que pour atteindre un seuil permettant de simplifier l'installation de chauffage. On réalise ainsi des économies qui compensent partiellement le coût des autres investissements. "A passive house is a building in which a com-

fortable interior climate can be maintained without active heating and cooling systems" (site du Passivhaus Institut). Constatant qu'un réseau de ventilation mécanique avec récupération de chaleur est nécessaire pour atteindre de telles performances, ce réseau apparaît comme un émetteur de chauffage possible. Le chauffage par air étant un mode de chauffe peu utilisé en construction traditionnelle (à l'exception d'expériences dans les années 60) ou associé à de faibles performances, Wolfgang Feist s'est attaché à démontrer que ce mode de chauffe peut être confortable dans le cadre d'une telle construction (Feist *et al.*, 2005). Il prouve notamment que :

- ce mode de chauffage permet une bonne distribution de la chaleur dans le bâtiment malgré la limitation de la pulsion à certains locaux : les transferts par conduction au travers des parois sont au moins aussi importants que ceux par convection liés à la ventilation mécanique, et un échange de chaleur complémentaire peut être obtenu par ouverture de portes ou fenêtres intérieures. Ces échanges sont importants relativement aux pertes de l'enveloppe. Il observe au contraire une difficulté à maintenir des températures sensiblement différentes entre locaux ;
- les pertes thermiques des gaines de ventilation, et la distribution inadéquate de chaleur pouvant en résulter sont à évaluer. Ces gaines doivent être considérées comme des émetteurs potentiels et le bon usage de l'isolation de ces gaines est pointé comme un paramètre important du *fine tuning* de l'installation. La différence de température entre l'air pulsé et l'ambiance (de +20 K en hiver à -8 K en été), la variation de cette différence et l'influence de paramètres externes (cellules de convection dans l'ambiance par exemple) rendent le positionnement de la bouche de ventilation délicat.
- La position d'une bouche de ventilation au-dessus de la porte servant à l'évacuation de l'air peut entrainer une forme de court-circuit et une mauvaise distribution de l'air, mais permet une réduction du coût du réseau. Des évaluations sur un local de 462 cm*452 cm montrent que cette configuration ne génère pas d'inconfort thermique et qu'avec une pulsion à 40°C le flux d'air atteignait bien le fond du local (ce qui n'est plus le cas avec une pulsion à 16°C). Un taux de mélange proche de 50 % entre l'air neuf et l'air intérieur est constaté à la reprise (50 % étant un mélange parfait avant extraction et 100 % étant un comportement de piston).
- Une stratification de température inférieure à 1 K entre 5 cm et 220 cm de hauteur (1.5-2 K/m recommandé) est constatée lors de mesures en laboratoire. Le risque d'inconfort lié au courant d'air est également inférieur au seuil recommandé de 15 %.

Dans le même article, Wolfgang Feist analyse la possibilité de chauffer une maison *Passivhaus* avec comme seule source de chaleur un poêle central. Si une large masse thermique est associée au poêle, ou s'il est utilisé à faible puissance plusieurs fois dans la journée, le risque de surchauffe dans le séjour est maîtrisé. L'analyse montre que les forces convectives créées par le poêle sont 10 fois plus importantes que le tirage lié à la ventilation mécanique, ce qui permet une distribution de la chaleur.

La réflexion au centre de ce standard est donc le mode de chauffage et ses conséquences. Le choix d'un chauffage basé sur le réseau de ventilation hygiénique a des conséquences que nous regroupons dans la figure 6.1. Ces conséquences sont la performance énergétique des parois, qui doit permettre de limiter la puissance de chauffe à ce qui peut être apporté par le réseau de ventilation hygiénique sans surdimensionnement (soit une valeur de l'ordre de 10 W/m^2, pour une pulsion à 55°C maximum et un débit de 30 m^3/(h.personne) (Feist *et al.*, 2005)), et l'absence de surface rayonnante à même de compenser l'inconfort dû à des surfaces froides. Ces deux conséquences justifient les niveaux d'isolation et d'étanchéité à l'air du standard *Passivhaus*, ainsi qu'une température minimale de parois élevée, ce qui implique le choix de triples vitrages. Ces éléments, complétés par une limitation des ponts thermiques, la récupération de chaleur sur la ventilation hygiénique, qui est un présupposé à toute la démarche *Passivhaus* et par une architecture conforme aux principes bioclimatiques, permet dans le climat d'Europe Centrale de viser un besoin de chauffage de 15 kWh/(m^{2}an) (relativement à une surface habitable nette) (Feist *et al.*, 2005). C'est ce dernier chiffre qui est devenu le critère central de la certification *Passivhaus*, mais l'on voit ici qu'il n'est que la conséquence d'autres éléments. Les recommandations et exigences du standard *Passivhaus* sont décrits dans le tableau 6.1.

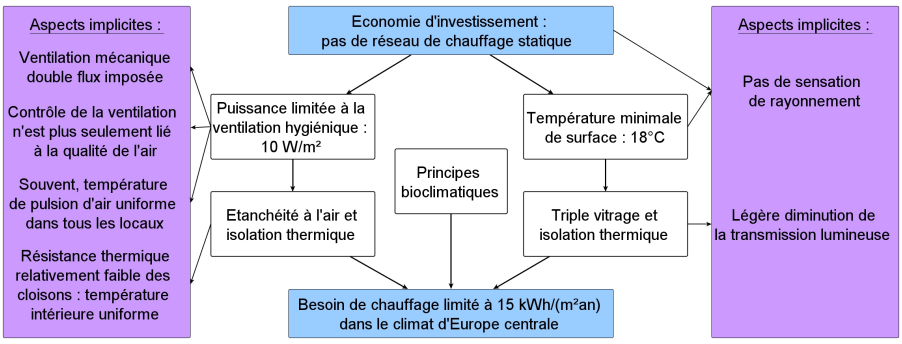


FIGURE 6.1 – Standard *Passivhaus* : conséquences du chauffage par air

TABLE 6.1 – Standard *Passivhaus* : critères et recommandations (Feist *et al.*, 2005)

Exigences	Requis	Meilleure pratique
Demande de chauffage (kWh/(m^{2}a))	$\leq$15	=<10
Demande d'énergie primaire (kWh/(m^{2}a))	$\leq$120	=72 ou 0
Taux d'infiltration n_50 selon EN13829 (h^{-1})	$\leq$0.6	=<0.2
Recommandation	Recommandé	Meilleure pratique
Valeur U parois opaques (W/(m^{2}K))	<0.15	0.06
Ponts thermiques : transmission thermique linéaire (W/(mK))	<0.01	<0
Valeur U vitrages (W/(m^{2}K))	<0.8	0.51
Facteur g vitrages (%)	>50	0.58
Valeur U fenêtres (W/(m^{2}K))	<0.8	0.75
Récupération de chaleur : rendement (%)	>75	92
Récupération de chaleur : pertes thermiques (W/K)	<5	
Récupération de chaleur : inétanchéités (%)	<3	<1
Demande d'électricité pour la ventilation (gestion incluse) (W/(m^{3}h))	<0.45	0.3
Equipement électrique domestique	Classe A	<60 % de classe A
Consommation primaire d'électricité pour applications domestiques (kWh/(m^{2}a))	<55	27

Ce développement nous amène à nuancer l'affirmation faite dans le chapitre précédent : si le standard *Passivhaus* est essentiellement performantiel dans ses recommandations, le raisonnement qui le soutien part de considérations techniques et constructives. Sans être basé sur une approche de projet d'architecture, ou sur une vision de la relation Homme-Monde telle que souhaite par James Wines, il bénéficie néanmoins d'une base concrète partant de données propres à l'art de bâtir. Nous verrons dans le chapitre 7 que ce n'est pas le cas des démarches zéro-énergie. L'application à l'identique du standard *Passivhaus* allemand en Belgique n'est cependant pas entièrement étayée, pour les raisons suivantes : le climat est différent, l'application du standard à différents programmes de bâtiment se fait sans remise en cause de sa logique et les débits d'air hygiénique pris en compte en Allemagne et en Belgique ne sont pas les mêmes. Nous détaillons ces trois points ci-dessous, pour démontrer que l'importation textuelle en Belgique des valeurs 10 W/m^2 de puissance maximale de chauffe et 15 kWh/(m^{2}an) de besoin maximal de chauffage est peu pertinente :

– Impact du climat
  La relation entre le 15 kWh/(m^{2}an) de besoin maximal de chauffage et les 10 W/m^2 de puissance maximale de chauffe est dépendante du climat. Elle a été établie pour l'Europe centrale. En faisant l'exercice de

relocaliser quelques projets passifs étudiés pour le climat de Bruxelles à Frankfurt Am Mein (ville proche de Darmstadt, siège du Passivhaus Institut, à seulement 318 km de Bruxelles), nous constatons une différence moyenne de 1.4 kWh/(m^2an et 1.1 W/m^2 dans le sens d'une moindre rigueur à Bruxelles (soit en moyenne +10 % de besoin et de puissance de chauffage à Frankfurt qu'à Bruxelles). Les projets considérés pour cet exercice sont décrit au tableau 6.2, page 97. Ce résultat reflète des hivers plus doux liés à une influence plus grande de la mer. Or, ces hivers plus doux pourraient être mis à profit pour viser un niveau de performance plus sévère que celui développé en Allemagne.

– Question du programme
L'évaluation du caractère *Passivhaus* change peu entre différents programmes. Tout au plus les valeurs standardisées de gains internes sont-elles adaptées et l'évaluation du confort thermique d'été est-elle plus poussée pour les programmes sujets à surchauffe. Or, la variation des débits d'air selon la densité d'occupation, le caractère diurne, nocturne ou saisonnier de l'occupation et la modification des bilans énergétiques globaux (négligeable dans les logements, l'éclairage artificiel devient dominant dans les bureaux) demanderaient un analyse poussée pour redéfinir un niveau de performance à atteindre qui soit réellement pertinent. A titre d'exemple, si l'on considère conformément à la norme EN13779 un débit d'air de 30 m^3/(h.personne) dans des bureaux et 15 m^2 utiles par personne (IBN, 2007a), la puissance disponible pour une température de pulsion de 55°C est 41 W/m^2, et non 10 comme dans les logements. Une telle puissance ne correspond pas à un standard de performance particulièrement élevé. La définition des critères pour les projets *Passivhaus* tertiaire a fait l'objet d'une étude et de consultations du secteur il y a quelques années. Cette étude montrait la relative facilité d'atteindre un besoin de chauffage de $\leq$15 kWh/(m^2an) dans un bâtiment compact et le caractère principalement "intuitif, au sens où elle ne correspond pas à un seuil technique" de l'imposition du critère de $\leq$15 kWh/(m^2an) de besoin de refroidissement (Deprez et Moreno-Vacca, 2009).

– Impact des débits d'air hygiénique
Le raisonnement logique qui mène au *Passivhaus* se base sur un débit d'air de 30 m^3/(h.personne) et 35 m^2 habitables par personne (Feist *et al.*, 2005). Ce débit d'air est en effet proposé par plusieurs normes, dont la EN13779 comme une valeur moyenne adéquate par habitant (IBN, 2007a). Elle correspond au maintien d'une concentration de 1000 ppm de CO_2 pour une émission de 18 litres de CO_2/(h.personne). L'évaluation pratique en vue de la certification d'un bâtiment se fait au moyen du logiciel PHPP (Passivhaus Institut, 2004). Dans ce logiciel, le débit d'air est évalué soit sur base du nombre d'occupants prévus (surface utile di-

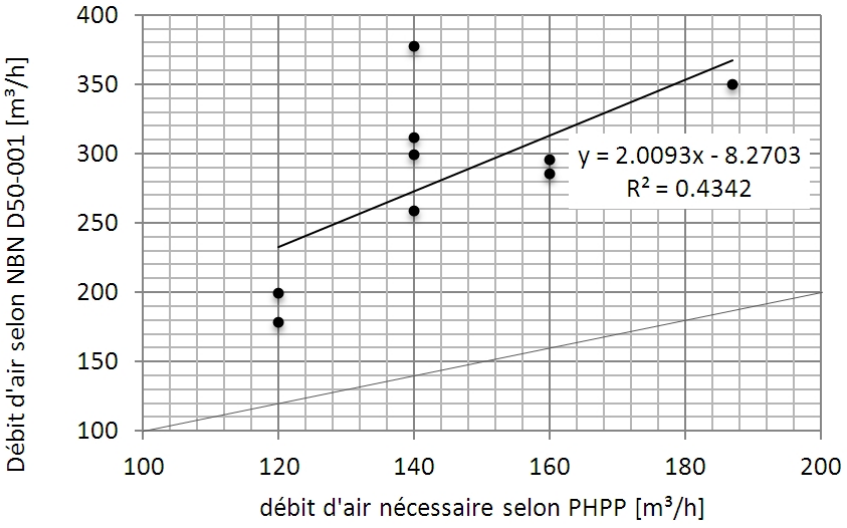


FIGURE 6.2 – Comparaison des débits d'air recommandés par le standard *Passivhaus* et la norme NBN D 50-001 (IBN, 1991) sur un échantillonnage de projets.

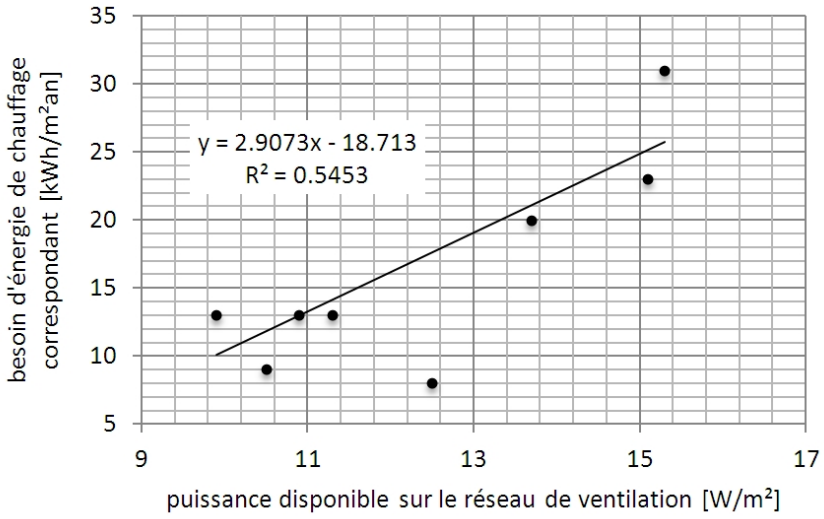


FIGURE 6.3 – Puissance disponible et besoin de chauffage associé pour des maisons répondant au standard *Passivhaus* sur base de la norme de ventilation NBN D50-001 (IBN, 1991) sur un échantillon de projets

visée par minimum 20 m^2 par personne), soit, pour les petits logements, sur base du nombre de locaux demandant une extraction (cuisine, salle de bain, WC, avec des débits nominaux par local), soit sur base d'un taux de renouvellement d'air minimum de l'ambiance de 3 h^{-1}. C'est le débit maximum entre ces trois évaluations qui est retenu et permet d'évaluer la puissance disponible pour le chauffage sur l'air hygiénique.
Le dimensionnement des débits d'air en Belgique ne suit cependant pas exactement cette norme. Il se base sur la NBN D50-001 qui propose une évaluation des débits d'air frais à fournir par local en fonction de leur superficie et non du nombre total d'occupants (IBN, 1991), et des débits d'air à extraire sur base du nombre de locaux *humides*, ceci étant par contre similaire à l'approche du PHPP. Les débits d'air installés sur base la méthode belge (qui a valeur de règlement) sont supérieurs à ceux considérés dans la démarche *Passivhaus* (Figure 6.2). Moyennant une modulation du débit d'air en fonction des besoins réels, ceci n'aura pas nécessairement d'impact sur le besoin de chauffage, mais les puissances disponibles sur ce réseau sont par contre plus élevées que celles supposées par le standard. Il en découle que l'on pourrait rester dans la logique du standard en acceptant une performance énergétique moindre, calibrée pour correspondre à cette puissance disponible.
Pour illustrer ceci, la figure 6.3 montre le résultat de l'exercice suivant : Nous partons de l'analyse d'un échantillonnage de projets répondants au standard *Passivhaus* pour lesquels nous disposons du bilan PHPP et réalisons un dimensionnement du réseau de ventilation conforme à la norme NBN D50-001. Les projets sont décrits dans le tableau 6.2. Le débit d'air total obtenu est alors introduit dans le bilan PHPP, en lieu et place de celui considéré par les concepteurs conformément aux recommandations du standard. Nous obtenons dès lors du PHPP une nouvelle valeur de puissance de chauffe tenant compte de la capacité du réseau qui réglementairement doit être installé. Nous revenons ensuite au débit d'air initial, faisant l'hypothèse que le réseau de ventilation installé ne sera pas utilisé à sa pleine puissance hors périodes critiques, mais nous adaptons simultanément les performances de parois pour retrouver une puissance de chauffage nécessaire équivalente à celle que nous venons de déterminer. Ce faisant, nous obtenons un scénario correspondant au calibrage des performances du bâtiment sur base de la puissance de chauffage disponible sur un réseau de ventilation tel que dimensionné en Belgique, mais modulé de façon à correspondre aux stricts besoins hygiéniques.
Les puissances constatées par cette démarche sont logiquement supérieures à 10 W/m^2. Les besoins de chauffage associés varient entre 8 et 31 $kWh/(m^2an)$. Notons que dans cette analyse nous ne faisons pas

usage de la possibilité qu'offre la norme NBN D50-001 d'organiser un recyclage d'air entre les chambres et le séjour, diminuant ainsi la quantité totale d'air neuf. Ce dispositif n'est cependant que rarement mis en œuvre en pratique et n'est pas aisément compatible avec un chauffage par l'air : la pulsion d'air dans un nombre très restreint de locaux devant compenser les déperditions de l'ensemble du bâtiment, ce qui risque d'entraîner une mauvaise distribution de la chaleur et une surchauffe dans les locaux amont.

Enfin, signalons que le standard tel que défini ci-dessus a ensuite fait l'objet de trois importantes études européennes, les projets Cepheus, PEP et PassiveON. Cepheus (Cost Efficient Passive Houses as EUropean Standards, clôturé en 2001) a pour objet la validation de ce mode constructif sur différents aspects : la faisabilité technique, les performances physiques (besoin d'énergie, consommation primaire et confort thermique), les performances économiques et l'acceptation sociale (Krapmeier et Drössler, 2001). Cette étude a permis l'observation de 221 logements. Les performances physiques attendues ont, en moyenne, été constatées. L'analyse sociologique a montré une bonne satisfaction des occupants, qu'ils soient propriétaires ou locataires. L'analyse économique a montré un temps de retour moyen des surinvestissements de 21 ans, pour un surcoût initial moyen de 8 %. PEP (Promotion of European Passive Houses, clôturé en 2007) cherchait à faciliter la diffusion et l'adaptation du standard aux différents contextes nationaux. Il a permis l'identification des barrières à la diffusion, et l'échange de bonnes pratiques entre pays (Elswijk et Kaan, 2008). Enfin, le projet PassiveON (clôturé en 2007) visait, comme PEP, à favoriser les transferts de bonnes pratiques et la dissémination du standard, mais avec une emphase particulière sur son adaptation au climat plus chaud du sud de l'Europe (ajout de critères sur le besoin de froid, prise en compte de la norme de confort thermique EN15251,..) (End-use Efficiency Research Group, 2007). Entre autres résultats, il a permis diverses améliorations de l'outil de calcul PHPP, et une réflexion combinant principes d'architecture climatiques et performance énergétique globale dans différents climats en termes de besoins d'énergie de chauffage et refroidissement.

TABLE 6.2 – Description des projets considérés pour construire les figures 6.2 6.3

Projet	Architecte	Typologie	Date de construction	Surface de référence	Volume habitable	Compacité V/A_t	Fraction enveloppe vitrée	Part fenêtre Sud (entre SE et SO inclus)
Immeuble 420 Avenue Georges Henri, 1200 Woluwe-Saint-Lambert. 2e et 3e étages	Edena	Appartement	2009	149	532	1.72	0.14	0.59
Immeuble 420 Avenue Georges Henri, 1200 Woluwe-Saint-Lambert. 1er étage	Edena	Appartement	2009	73	284	4.46	0.20	0.58
Immeuble 420 Avenue Georges Henri, 1200 Woluwe-Saint-Lambert. rez et rez-jardin	Edena	Appartement	2009	97	290	1.49	0.10	0
Résidence Dedecker-Boulanger	Marc Opdebeeck	Habitation unifamiliale 4 façades	2010	128	495	1.16	0.125	0.24
Maison à Avin	A2M	Habitation unifamiliale 3 façades	2009	153	572	1.57	0.08	0.3
Projet Archives	Tilman Raphaël	Rénovation maison mitoyenne	2009	149	540	2.52	0.20	0
Résidence Breels	Seutin Architectes	Maison 4 façades	2013	155	528	1.34	0.08	0.38
Résidence Henz-Noirfalise	FHW	Maison 2 façades	2009	192	755	1.86	0.15	0.8
Pic au Vent	Cabinet Archipel	Maison 2 façades	2009	163	693	2.09	0.12	0

6.2 Mise en œuvre

Nous avons dans les chapitres précédents présenté une vision essentiellement technique et performantielle du standard *Passivhaus*. Nous allons ici justifier cette position en cataloguant les différentes exigences et recommandations selon une division entre aspects spatiaux, techniques et performantiels (Figure6.4). L'aspect spatial considère la capacité d'une mesure à générer ou influencer la conception des espaces. L'aspect technique met en évidence le caractère technologique d'une mesure, que ce soit en termes de mode constructifs ou de systèmes de transfert de fluides et énergie. L'aspect performantiel caractérise les mesures qui relèvent principalement d'une évaluation chiffrée théorique. Une mesure ou exigence peut relever simultanément de plusieurs aspects. Les mesures considérées sont les exigences et recommandations présentées dans le tableau 6.1. Un exercice similaire est réalisé à titre de comparaison pour les mesures principales du bioclimatisme listées par Liébard *et al.* (Liébart et De Herde, 1996).

Pour le standard *Passivhaus*, tous les éléments, même ceux relevant de dimensions techniques, sont présentés au travers de leur performance et de leur traduction physique. Le fait est notamment marquant pour les fenêtres, décrites en termes de performances thermique et solaire (et non lumineuse !), alors que dans l'approche bioclimatique, on trouve à côté du vitrage la notion qui lui est intimement liée d'ouverture, relevant à la fois des aspects techniques et spatiaux. Par comparaison avec le bioclimatisme, on voit que le standard *Passivhaus* joue explicitement sur assez peu d'éléments techniques, et aucun élément spatial. Il se concentre sur des résultats à obtenir. De son côté le bioclimatisme se concentre à la fois sur des moyens techniques et spatiaux et sur des notions ou outils théoriques (gains solaires, outils de simulation). Les objectifs chiffrés de performances sont très rares dans la référence considérée. Notons cependant que la réalisation des performances théoriques du standard *Passivhaus* gagne bien évidement à utiliser les outils proposés par le bioclimatique, et que la réalité de la construction conforme à ce standard y recourt effectivement. Il ne s'agit donc pas d'essayer de présenter le standard *Passivhaus* comme incomplet ou moins intéressant pour l'architecte que le bioclimatisme. Les démarches se complètent sans s'exclure. Nous cherchons uniquement à mettre en évidence une forme de discours et une approche différente de ces deux démarches.

La présence de principes bioclimatiques dans la réalité de la construction conforme au standard *Passivhaus* peut être démontrée par l'analyse de la base de données CALE. Cette base de données regroupe les projets introduits dans le cadre de l'action *Construire avec l'énergie* de la Région Wallonne entre

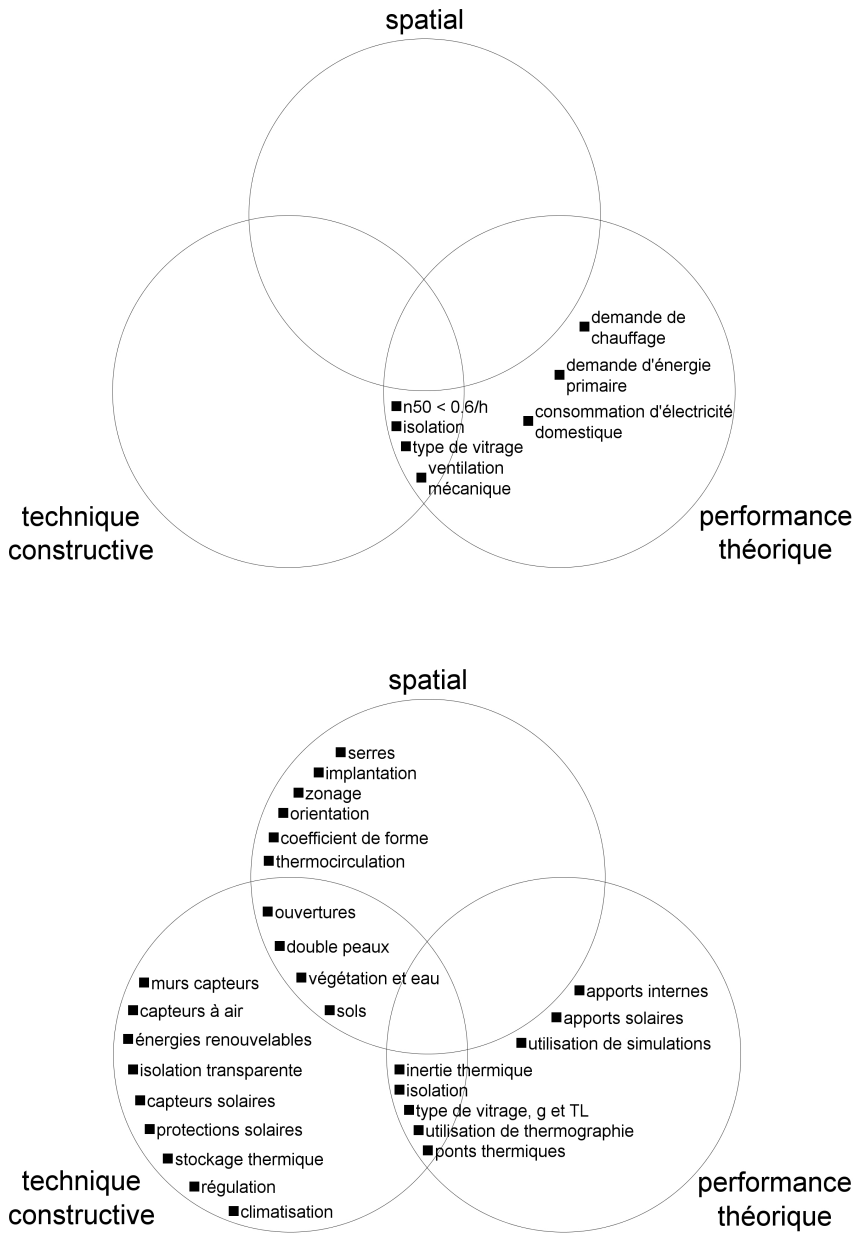


FIGURE 6.4 – Classification des recommandations du standard *Passivhaus* (en haut) et de l'approche bioclimatique (en bas) sur une triple échelle spatiale, technique et performantielle

2004 et 2011. Elle compte 1029 projets, dont 535 sont effectivement construits au moment de réaliser cette analyse, et 96 disposent d'une mesure de perméabilité à l'air selon la norme NBN EN 13829 (IBN, 2001). L'analyse présentée ici se limite à ces 96 projets, dont on peut considérer l'évaluation des performances plus précise du fait de cette mesure. Le niveau d'étanchéité à l'air devient en effet un paramètre important de l'évaluation du besoin de chauffage une fois l'isolation et la ventilation améliorées. Or les valeurs par défaut proposées par les réglementations sont particulièrement défavorables, ce qui fausse l'évaluation. Nous classons ces 96 cas en 4 catégories sur base de leur demande nette d'énergie pour le chauffage : supérieure à 60 kWh/(m^2an) (24 cas), entre 35 et 60 kWh/(m^2an) (34 cas), entre 15 et 35 kWh/(m^2an) (22 cas) et inférieure à 15 kWh/(m^2an) (16 cas). Ce besoin de chauffe est évalué par l'outil réglementaire PEB wallon. Les résultats sont présentés dans la figure 6.5. On y constate que :

- Les projets *Passivhaus* ne s'y distinguent ni par leur compacité, ni par leur taille, si ce n'est une moyenne légèrement plus élevée en termes de surface plancher brute (+11 % par rapport à la moyenne de l'échantillon complet). Ces deux aspects offrent assez peu de marge de manœuvre, car ils dépendent souvent des considérations urbanistiques et économiques plus que de l'architecture. On remarque à cet égard la faible variabilité de la compacité sur tout l'échantillon ;
- Le U moyen des parois marque par contre une cassure, grâce à l'utilisation des triples vitrages. L'étanchéité à l'air moyenne varie presque linéairement avec le besoin de chaleur, mais on remarque que l'échantillon correspondant aux exigences *Passivhaus* se distingue par une très faible variabilité des performances. Ces deux aspects étant typiques de ce standard, ce constat n'est pas surprenant ;
- Enfin, nous constatons que les projets *Passivhaus* ne présentent pas un rapport surface vitrée par surface plancher relativement plus important que les autres projets. L'orientation sud y est par contre plus clairement recherchée, 62 % de la surface vitrée étant orientée sud dans ces projets, contre 47 % pour l'échantillon complet. C'est là clairement une trace d'une prise en compte d'un concept de l'architecture bioclimatique qui est particulièrement poussée dans le standard *Passivhaus* sans en être une composante explicite.

Relevons par contre le constat plus inquiétant de la figure 6.6 qui indique que la performance globale en énergie primaire, représentée par le niveau E, si elle est effectivement meilleure en moyenne que pour l'ensemble de l'échantillon (41 contre 51), présente une variabilité plus importante qui indique qu'un nombre significatif de projets *Passivhaus* ne présentent en réalité pas une per-

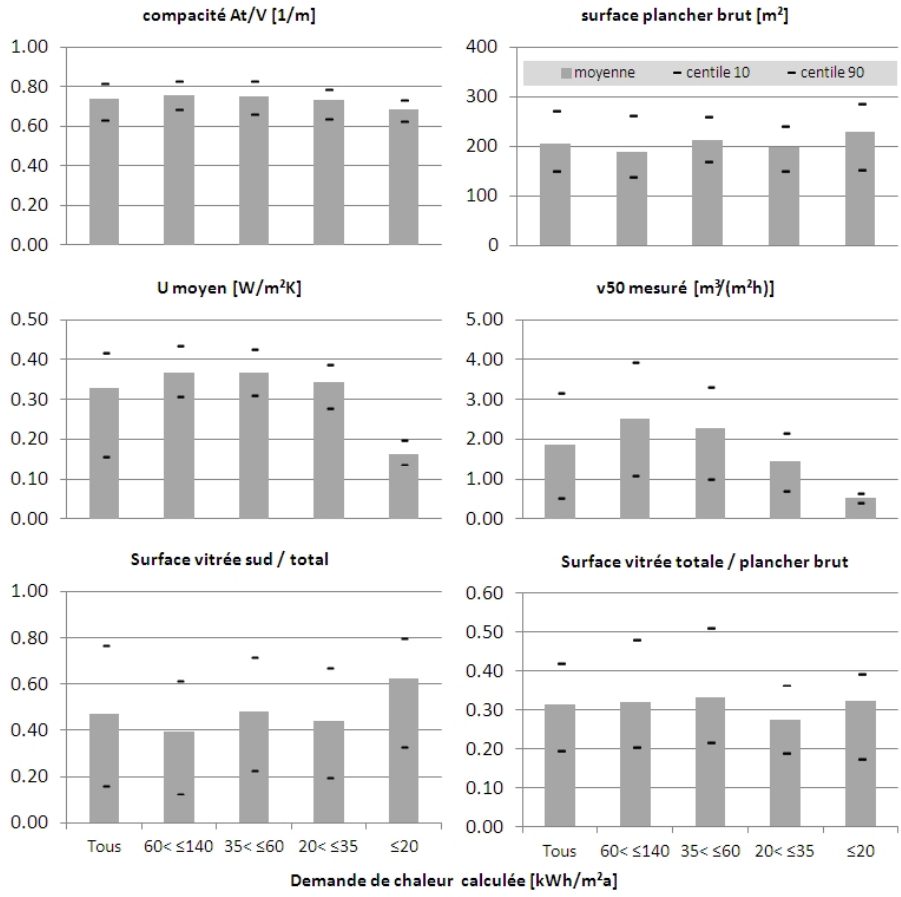


FIGURE 6.5 – Performances et ratios géométriques d'un échantillon de logements en fonction du besoin du chauffage, sur base de projets de l'action Construire avec l'Energie

formance globale théorique significativement meilleure que leurs homologues *basse énergie*. Ceci dénote l'importance d'un choix de techniques cohérent avec la démarche de réduction des besoins.

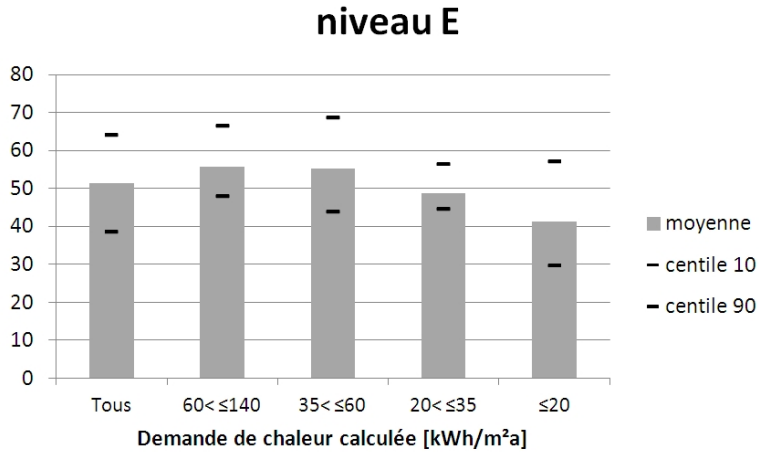


FIGURE 6.6 – Consommation globale en énergie primaire, représentée par le niveau E en fonction du besoin du chauffage, sur base de projets de l'action Construire avec l'Energie

6.3 Critique du concept

Nous proposons ici une critique du standard *Passivhaus* structurée autours des cinq principes du développement soutenable décrits précédemment (chapitre 3). Certains éléments de cette section ont fait l'objet d'une publication en conférence, dans le cadre de PLEA2011 (van Moeseke, 2011b). Les cinq principes sont envisagés successivement dans les paragraphes suivants tandis que le tableau 6.3 synthétise les résultats de cet exercice.

Cette analyse permet de mettre en évidence des réalisations effectives à porter au crédit du standard, mais également des manques et des incompatibilités. Les manques illustrent le caractère incomplet du standard au regard de la complexité de la notion de soutenabilité. Les incompatibilités relèvent d'un conflit entre le standard et un objectif de soutenabilité. Ce conflit peut être d'ordre technique ou de définition. Un conflit technique est lié à une façon de réaliser actuellement les bâtiments *Passivhaus*. Une modification de la façon de faire, sans remise en cause du concept même, pourrait le résoudre. Un conflit au niveau de la définition est plus problématique. Il reflète une incohé-

TABLE 6.3 – Réalisations et manquements du standard *Passivhaus* au regard des principes de soutenabilité

Principe	Réalisation	Manquement	Incompatibilité au niveau de la mise en œuvre du standard	Incompatibilité au niveau de la définition du standard
Intégration	Réduction des besoins et confort thermique réellement constaté Evaluation en énergie primaire Démonstration de l'acceptation sociale Pertinence économique réelle	Evaluation des émissions CO_2 équivalentes Prise en compte de l'énergie grise Recommandations d'entretien de la ventilation mécanique	Investissement initial important et non optimum économique	Négation volontaire de la dimension culturelle
Equité	Réponse à la précarité énergétique	Pas d'encouragement à la sobriété spatiale Pas de prise en compte des impacts sociaux de la construction (fairtrade)	Possible conflit avec la préservation du patrimoine	Centré sur le bâtiment hors contexte
Précaution	Intégration dès l'origine d'un critère de confort d'été	Pas d'évaluation de la résilience climatique	Flexibilité limitée ou coûteuse par qualité initiale et choix HVAC Technicité au-delà des capacités d'amateurs	
Responsabilité partagée	Prise de responsabilité partagée des architectes, entreprises et manufacturiers Habitants souvent militants	Intégration limitée des principes de confort adaptatif		Habitants vus comme des occupants plus que comme des acteurs
Participation	Travail en plateforme rassemblant tous les acteurs		Phénomènes physiques rendus imperceptibles	

rence fondamentale entre l'approche proposée par le standard *Passivhaus* et la soutenabilité. La non prise en compte de la dimension culturelle par exemple relève de cette catégorie. Cette classification peut servir à guider une évolution du standard sur base de notre analyse. Les manquements peuvent être complétés relativement facilement. Les incompatibilités techniques nécessitent une analyse plus approfondie pour identifier des pratiques alternatives qui restent dans le cadre du standard, puis la diffusion des exemples de meilleures pratiques corrigeant ces incompatibilités. Les incompatibilités au niveau de la définition demandent une analyse spécifique. Dans la mesure ou le standard *Passivhaus* est exclusivement énergétique et n'a pas vocation à devenir autre chose (Guerriat, 2010), il n'est pas évident si ces incompatibilités doivent être résolue dans le cadre du standard ou en-dehors, par des démarches complémentaires. Il s'agira là d'une décision stratégique à prendre évaluer par la Plateforme Maison Passive elle-même.

6.3.1 Principe d'intégration des composantes

Souvent, le développement soutenable est ramené à l'idée d'intégration de trois composantes : environnementale, économique et sociale. Nous avons rappelé plus haut que la composante culturelle doit également être considérée et mise en valeur en tant que telle, et non comme une sous-catégorie de la dimension sociale. Nous allons donc discuter ici de la réponse apportée par le standard *Passivhaus* eut égard à ces quatre composantes. Notons ici que l'étude Cepheus décrite plus haut propose un bel exemple d'application de la notion d'intégration, car elle inclut à la fois des volets énergétiques, économiques et sociaux.

La preuve de la limitation des besoins énergétiques des bâtiments conçus selon le standard *Passivhaus* a été apportée par Cepheus (Feist *et al.*, 2001b). L'intégration dans le standard d'un critère de consommation maximale en énergie primaire permet en outre de garantir un usage censé des ressources énergétiques pour satisfaire cette demande résiduelle d'énergie. Deux éléments négatifs peuvent néanmoins être pointés : D'abord, l'énergie primaire ne dit rien sur l'impact climatique des consommations d'énergie. L'évaluation parallèle des émissions d'équivalent CO_2 pourrait être envisagée. Ensuite, l'évaluation actuelle n'intègre ni l'énergie grise, ni les autres impacts environnementaux de la construction. S'il est difficile d'intégrer en une même démarche les multiples aspects de l'impact environnemental des matériaux, il a été démontré que sur le seul aspect énergétique, la non prise en compte de l'énergie grise peut annuler le bénéfice relatif du gain de performance par rapport à un projet basse énergie (Trachte et Massart, 2011). C'est donc un élément important à intégrer à l'évaluation.

La pertinence économique du concept a été étudiée par plusieurs auteurs. Cepheus indique un surcoût de l'ordre de 8% pour un temps de retour de 25 ans (Schnieders et Hermelink, 2006). L'évaluation réalisée par Audenaert *et al.* dans le contexte flamand montre un temps de retour variant entre 9 et 120 ans et entre 23 et 30 ans selon la référence prise et les scénarios d'évolution des coûts de l'énergie, avec un surinvestissement variant entre 4 % par rapport à une habitation basse énergie et 16 % par rapport à une habitation aux normes de 2008 (Audenaert *et al.*, 2008). Néanmoins, l'argument selon lequel une économie financière est possible grâce à la simplification du système de chauffe, au point de faire du standard *Passivhaus* un "second optimum économique" (Schnieders et Hermelink, 2006) semble ne pas se vérifier (Georges *et al.*, 2012). L'idée du second optimum est représentée par la figure 6.7, tandis que l'évaluation détaillée des performances énergétiques et économiques des systèmes de chauffages est représentée en figure 6.8. Cette dernière figure ne montre pas une discontinuité importante au niveau du standard *Passivhaus*, tandis que l'optimum constitué par le niveau basse énergie, avant intégration de la ventilation mécanique contrôlée (niveau *45 kWh/m²an*), est clairement apparent.

La question de la pertinence économique du standard *Passivhaus* dépendra de l'approche que l'on souhaite adopter. D'une part, tous les auteurs constatent un surinvestissement initial par rapport à une construction moins performante, toute autre chose étant égale. Ce surinvestissement est en soi un élément négatif, car il freine l'accessibilité du standard, particulièrement auprès des personnes en précarité énergétique. En outre, malgré un coût de fonctionnement réduit, l'optimum économique semble rester sur un niveau de performance moindre. La différence entre le niveau *Passivhaus* et un niveau basse énergie pourrait être compensée par des programmes d'investissement public (primes), mais c'est faire l'aveu d'une limitation du standard. D'un autre côté, la pertinence économique du standard est elle aussi démontrée, dans la mesure ou le temps de retour simple sur investissement est toujours largement inférieur à la durée de vie du bâtiment et que les coûts globaux actualisés sur le cycle de vie du bâtiment sont inférieurs dans le cas *Passivhaus* à ce qu'ils sont pour une habitation traditionnelle (Feist *et al.*, 2001b). Entre basse énergie et *Passivhaus*, le choix n'est donc pas aisé et dépend de la capacité d'investissement initial. Si elle est présente, le *Passivhaus* gagne en pertinence. Mais en son absence, un niveau moins performant reste aujourd'hui un choix économique plus rationnel.

Au niveau social, les évaluations menées dans le cadre de Cepheus ont démontré le confort thermique et l'acceptabilité des bâtiments *Passivhaus* (Hastings, 2004; Schnieders et Hermelink, 2006). La réponse que ces bâtiments

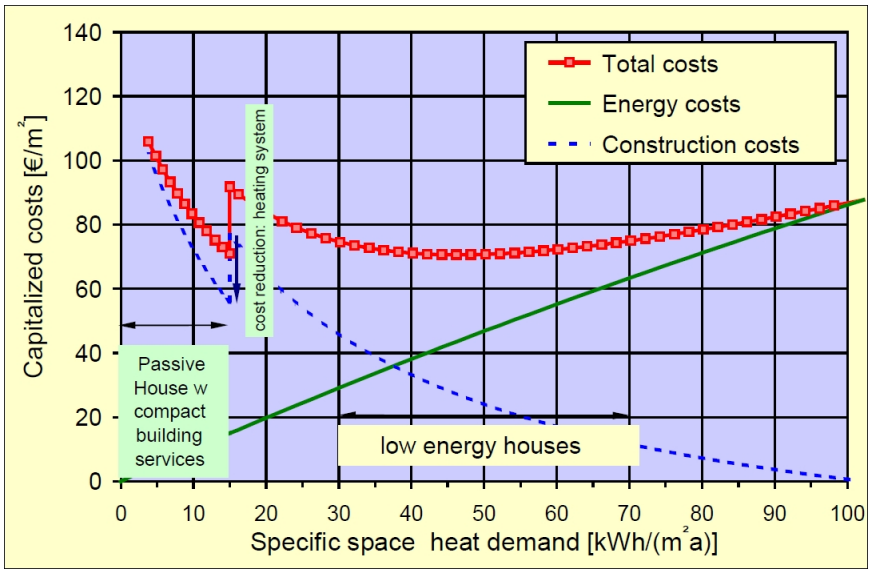


FIGURE 6.7 – Principe du double optimum économique. Figure reprise de Schnieders *et al.* (Schnieders et Hermelink, 2006)

apportent aux questions de précarité énergétique est à souligner, malgré la difficulté de représenter l'investissement initial. Ces évaluations ne couvrent cependant pas l'ensemble des questions sociales. Particulièrement, la question de la qualité sanitaire des logements n'est pas discutée. Or, un système de ventilation mécanique mal conçu, réglé ou entretenu peut présenter des risques importants pour la santé (Wargocki *et al.*, 2002). Puisqu'un tel système fait partie intégrante du standard *Passivhaus*, des recommandations spécifiques liées à son entretien devraient être prévues. Ce manque est selon nous symptomatique de l'oubli de la capacité d'action de l'occupant, que nous discutons plus loin dans la section dédiée au principe de responsabilité partagée. Nous pointons également dans la section sur le principe de précaution le caractère technologique pointu des maisons *Passivhaus*, qui limite la capacité d'intervention d'un particulier lors de petites transformations, ou en augmente le risque.

Enfin, la dimension culturelle semble complètement et délibérément absente de ce standard. Ces développeurs travaillent selon l'idée que toute forme architecturale doit être permise dans le cadre du standard. Il a par exemple été énoncé que :

> "Windows and window systems have been developed significantly in the last 10 to 15 years. Another factor was the decision to create thicker insulation. Additionally, it was decided to use a ventilation

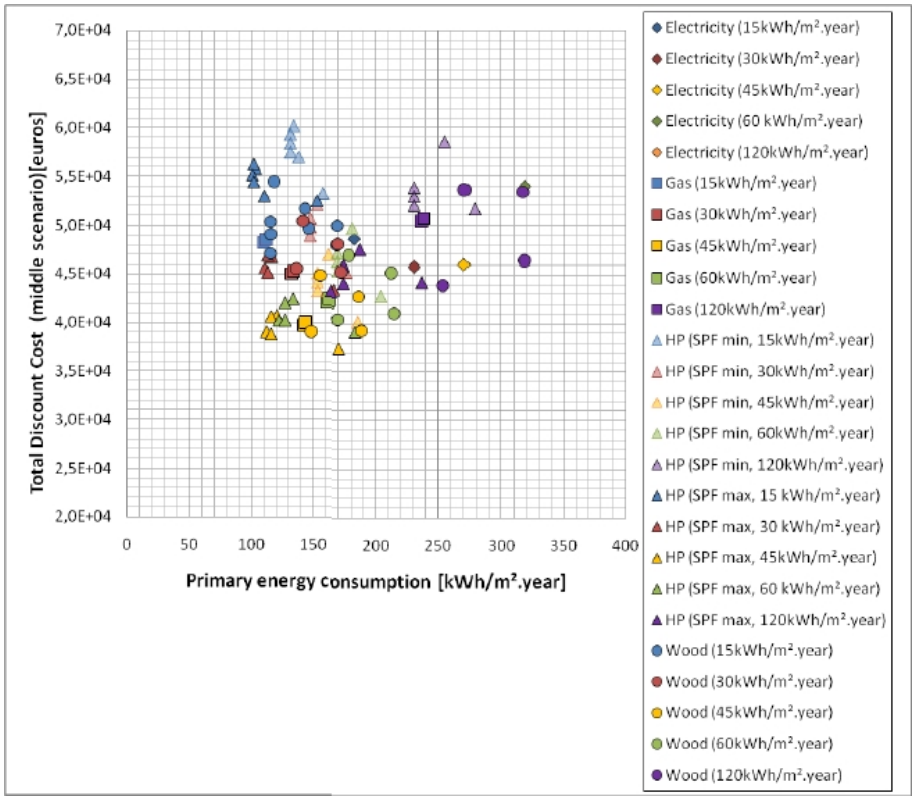


FIGURE 6.8 – Coûts totaux actualisés en fonction de la consommation d'énergie primaire pour différents niveaux de performance énergétique. Figure reprise de Laurent Georges *et al.* (Georges *et al.*, 2012).

> system including heat recovery for a single-family house [...]. These three developments lowered passive houses energy requirements considerably. This in turn reduced the demands on energy supply and therefore the solar energy use significantly in comparison to 10 to 15 years ago. This as lead to much more architectural freedom in designing a passive house today as opposed to the solar houses of the 70's and 80's. The difference from a conventional house doesn't have to be recognizable." (Krapmeier et Drössler, 2001)

Ce retrait sur des aspects purement techniques et performantiels est une position facilitant la diffusion du standard, car elle permet d'éviter l'écueil d'une image trop forte devenant icône et amenant une réaction de rejet. Elle ne remet pas non plus en cause la possibilité d'avoir une architecture correspondant au langage actuel. "Si le standard n'induit pas forcément un style, il dégage tout de même des maisons déjà construites une tendance à la modernité et à la simplicité." (Guerriat, 2008). Nous regrettons néanmoins cette frilosité, à la lumière des éléments développés en introduction sur le potentiel moteur créatif que constitue la question énergétique et dans le chapitre 2 sur l'appel à la création d'une architecture intégrant l'homme à son environnement. En outre, cette idée d'une indépendance entre forme et performance énergétique nous semble discutable. Si effectivement les dispositifs spatiaux propres à l'architecture climatique (serres, zonages thermiques, etc.) ne sont plus mis en avant, la conception de bâtiments *Passivhaus* à un coût maîtrisé demande rationalité, formes simples, compacité, ou encore maîtrise de la dimension des ouvertures, autant d'éléments ayant un impact important sur l'apparence et l'organisation du bâtiment.

6.3.2 Principe d'équité inter et intragénérationnelle

La transcription architecturale de ce principe est la prise en compte dans le projet des multiples échelles spatiales et temporelles dans lesquelles il se situe. En termes d'échelles temporelles, deux dimensions peuvent être considérées : l'intégration du projet dans une ligne du temps patrimoniale et la prise en compte à la conception de l'incertitude face aux multiples variations contextuelles que connaîtra le bâtiment. Ce dernier aspect est discuté plus bas dans la section dédiée au principe de précaution et d'incertitude scientifique. En termes d'échelle spatiale, nous pouvons aborder les échelles de la réalité matérielle du projet par la discussion des échelles de matériaux, espaces, bâtiments et ensembles architecturaux ou urbains, et les échelles des impacts environnementaux et sociaux, locaux ou distants.

L'intégration des projets *Passivhaus* dans une ligne du temps patrimoniale a déjà été abordée lors de la discussion du principe d'intégration. Il a été montré que dans une large mesure les défenseurs de ce standard prennent une position de retrait face aux questions non techniques de l'architecture. Cependant, dès lors que le standard cherche à s'appliquer également à des projets de rénovation, il devient porteur d'un message vis à vis du bâti existant. Ce message est généralement celui d'une transformation importante plutôt que d'une mise en évidence de la qualité intrinsèque du patrimoine. Selon Alois Riegl, cette qualité tient en la contemporanéité (valeur d'usage et valeur d'art, qui comprend la valeur de nouveauté - présence d'une qualité équivalente au neuf - et la valeur d'art relative - accessibilité aujourd'hui de cette qualité artistique) et en la remémoration (valeur d'ancienneté liée aux marques du temps, valeur historique liée au statut de jalon et valeur de remémoration) (Riegl, 1984). Si toute rénovation de bâtiment implique un questionnement face à ces valeurs, la rénovation au standard *Passivhaus* semble amener quelques questions particulières : l'exigence de performance des parois et fenêtres, combinée à la traque des ponts thermiques, implique une intervention particulièrement lourde sur l'enveloppe et parfois la structure du bâtiment (modification des sens de portées pour dégager la façade). Cette modification de la structure et du rôle des différents éléments de la construction pose question relativement à la valeur historique du bâtiment. Elle est également peu compatible avec le principe de réversibilité fortement mis en avant dans le domaine de préservation du patrimoine aujourd'hui (Conseil des métiers d'art, 2009), et n'est donc acceptable que moyennant la preuve d'une inexistence d'alternative.

Au niveau des échelles matérielles, pointons que la maximisation des gains solaires et de la compacité notamment ont des conséquences sur la forme, et l'implantation d'un projet qui peuvent créer une tension avec l'environnement bâti. La résolution de ces tensions implique une prise en compte du site (ombres portées par le bâtiment, compromis avec d'autres dimensions), ce qui met en lumière le caractère centré sur l'objet architectural de ce standard.

Pour les impacts environnementaux et sociaux distants, la recherche d'économie d'énergie et son effet positif sur les changements climatiques et l'épuisement des ressources sont assurément des éléments positifs. Le standard n'inclut cependant directement les questions sociales telles que l'on en retrouve par exemple dans les démarches de certification du bois ou de formation par le travail.

Plus proche de nous, la réalisation de bâtiments à très faible demande énergétique est une façon pertinente d'affronter les questions de précarité énergétique. Cette solution nécessite cependant une intervention publique pour com-

penser le surcoût lié à ce mode constructif, comme discuté précédemment. L'existence de ce surcoût entraine logiquement un développement du standard en premier lieu auprès d'un public disposant d'une capacité d'investissement. On peut dès lors s'interroger sur un éventuel effet caché des maisons *Passivhaus* qui en proposant des surfaces particulièrement importantes auraient un impact global moins favorable que ce que leur performance ramenée au m^2 laisse croire. Nous avons dès lors mesuré la surface par habitant sur notre échantillon de maisons décrit au tableau 6.2, auxquelles nous ajoutons celles décrites par Adeline Guerriat dans "Maisons passives" (Guerriat, 2008)). Le nombre d'habitants est déduit du dessin de l'architecte (nombre de locaux nommés chambres), en supposant un seul occupant par chambre, sauf une. Les chambres d'amis ne sont pas comptées. Une seconde évaluation est réalisée en convertissant en chambres tous les locaux de plus de 9 m^2 de type bureau ou combles habitables et en considérant deux personnes par chambres lorsqu'elle fait plus de 14 m^2. Cette seconde évaluation permet de mesurer le potentiel de ces maisons en termes de nombre d'habitants. Les surfaces pivot déterminant le nombre d'occupants d'une chambre sont reprises du PO/84 de la Société Nationale du Logement (Société Nationale du Logement, 1984). Cette évaluation montre (figure 6.9) que la surface brute habitable moyenne par habitant est proche de la moyenne des surfaces en construction neuve sur base des chiffres de l'Institut National de Statistiques (SPF-Economie, 2012) et que ces logements pourraient après transformation légère accueillir sensiblement plus d'occupants. Précisons que cette évaluation ne se base pas sur un échantillon représentatif de la construction *Passivhaus* (19 logements) et doit donc être considérée avec précaution. D'autant plus que la proportion d'appartements varie de 16 % dans notre échantillon à 47 % pour l'INS, ce qui suffit à expliquer la plus grande surface moyenne par habitant dans notre échantillon. Si la réalité des constructions conformes au standard *Passivhaus* ne semble donc pas dénoter un luxe particulier, l'absence d'encouragement à une sobriété spatiale dans le standard reste regrettable. Un changement d'indicateur, passant du kWh/(m^2an) au kWh/(habitant.an) par exemple mériterait selon nous d'être étudié (voir le chapitre 13 pour plus d'éléments sur les choix d'indicateurs).

6.3.3 Principe de précaution et d'incertitude scientifique

Une façon d'intégrer le principe d'incertitude est de faire appel à la notion de résilience. La résilience est la capacité à s'adapter à des conditions changeantes en maintenant ou en augmentant sa qualité. Appliquée aux questions de performance énergétique, il nous semble que la résilience doit être évaluée face à deux types de conditions changeantes : les variations climatiques probables et les variations dans l'occupation des bâtiments.

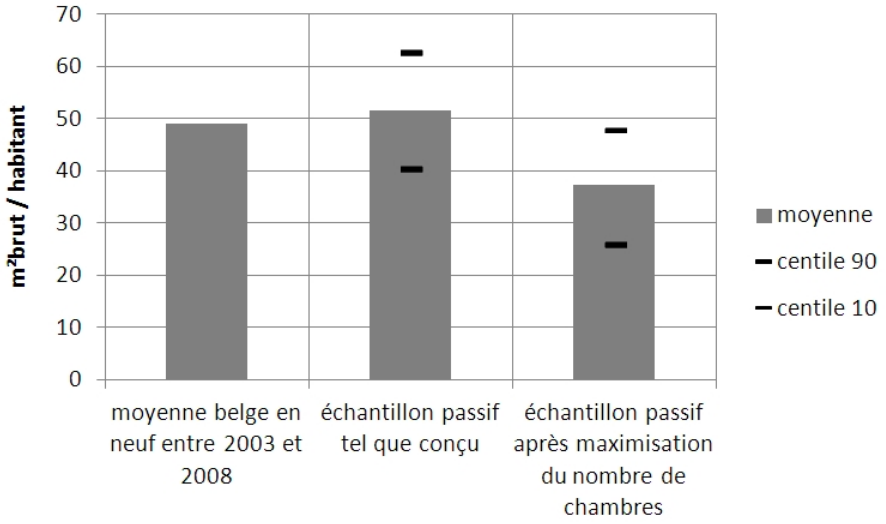


FIGURE 6.9 – Surface brute par habitant sur un échantillon de maisons répondant au standard *Passivhaus*

Les bâtiments construits aujourd'hui subiront tout au long de leur usage des conditions climatiques en cours de changement. Le changement climatique a en effet déjà commencé et ne se stabilisera pas avant plusieurs décennies. David Coley *et al.* ont montré qu'un bâtiment qui est aujourd'hui plus confortable thermiquement qu'un autre gardera probablement cet avantage relatif dans les futures conditions climatiques (Coley et Kershaw, 2010). Ceci ne dit rien sur leur propre niveau de confort thermique, mais permet de mettre en évidence la pertinence de l'intégration d'un critère de confort d'été dès la création du standard *Passivhaus*. Il aura fallu attendre la fin de la décennie 2000 pour qu'un tel critère soit généralisé à toute construction neuve en Belgique. David Coley *et al.* ont également montré que la variation de température intérieure dans un bâtiment du fait de modifications climatiques peut être linéairement liée à la variation de température extérieure. Un paramètre simple, qu'ils appellent coefficient d'amplification (le gradient de la droite de régression) s'avère suffisant pour caractériser la résilience du bâtiment (Coley et Kershaw, 2010). Une valeur inférieure à 1 indique une capacité du bâtiment à atténuer une variation climatique. L'intégration d'un critère de résilience climatique dans le standard *Passivhaus* serait mathématiquement aisée, de même que l'ajout de recommandations visant à minimiser ce coefficient d'amplification. Il est probable que l'inertie thermique du bâtiment serait de ce fait mieux valorisée.

La résilience face à des changements d'occupation doit s'aborder différemment. Il convient de différencier les changements d'affectation de petite am-

pleur (réaffectation d'un local, déplacement d'une cloison...) des transformations plus importantes, touchant par exemple à l'enveloppe ou aux techniques du bâtiment et des changements d'affectation de tout un bâtiment. Ces derniers impliquent généralement des travaux de transformation importants réalisés par des corps de métier professionnels. Les particularités de la conception *Passivhaus* (ventilation mécanique, étanchéité à l'air et surisolation) ne présentent alors *a priori* pas de difficulté majeure, pour autant que les travaux de transformations soient réalisés avec le même soin que ceux de construction à l'origine.

Les travaux de moyenne ampleur peuvent présenter des difficultés du fait de leur caractère partiel. Par exemple une intervention sur l'enveloppe de déperdition peut être souhaitée mais pas sur les réseaux HVAC, ce qui entraînerait éventuellement un inconfort thermique faute de marge de puissance de chauffage disponible sur la ventilation. Ce phénomène est identique dans toute transformation, quelque soit le niveau de performance au départ. Mais dans le contexte actuel, la transformation d'un bâtiment *Passivhaus* est le seul cas où la transformation se fera *a priori* avec un risque élevé de réduction de la performance. Dans tous les autres cas, une amélioration des performances d'enveloppe est théoriquement possible. En d'autres termes, la vision du bâtiment comme une combinaison d'éléments disposant chacun d'un cycle de vie propre est partiellement modifiée dans le cas des constructions à très haute performance énergétique. La liaison enveloppe - techniques y est plus forte que dans d'autres types de construction.

Enfin, la question des petites adaptations mérite un examen détaillé. De nombreuses situations peuvent justifier un souhait de modification des espaces ou des conditions climatiques : vieillissement des occupants, changement de la composition de la famille, état de santé d'un membre de la famille, intégration d'un espace de travail à domicile, etc. Ces modifications peuvent entrainer une réduction du taux d'occupation sans changement des attentes de confort thermique ou une modification à la hausse ou à la baisse de la température souhaitée dans certains locaux. Du fait de l'absence d'émetteurs spécifiques à chaque pièce contrôlés par un dispositif local (vanne thermostatique par exemple), de telles adaptations sont plus délicates dans une construction *Passivhaus* que dans des bâtiments plus traditionnels. Une solution serait de prévoir des émetteurs décentralisés ou de valves de modulation des débits d'air, ce qui est contraire à la recherche de simplification du système de chauffage. Concrètement, les conséquences d'une gestion de la température au moyen d'une batterie centralisée sur l'air hygiénique sont que :

– une modulation des consignes de température par zone n'est pas possible sans modification de l'équilibre aéraulique du réseau de ventilation ou

division du réseau de ventilation en branches distinctes, ce qui semble souvent au-delà de la capacité de réalisation d'un particulier ;
- les puissances de chauffage et d'un éventuel rafraichissement sont strictement limitées. Un besoin de température plus élevée implique l'adjonction d'une puissance complémentaire, souvent un convecteur électrique, ce qui est préjudiciable en énergie primaire ;
- si la puissance est disponible, une demande de température plus élevée pour une période limitée dans le temps impliquera une montée en température de tout le bâtiment, même si ce besoin est limité à certains locaux, sauf à disposer d'éléments de chauffage d'appoint mobiles.

On voit donc que si le standard *Passivhaus* mène à des bâtiments confortables relativement aux attentes initiales, ces bâtiments risquent de se montrer délicats à transformer et adapter à des conditions d'occupation changeantes. Ceci surtout dans le cadre d'adaptations de petite échelle réalisées sans interventions de professionnels. Cette difficulté tient à la qualité initiale des éléments mis en œuvre, à la précision de l'équilibre entre puissance disponible et déperditions et à la multiplication de fonctions liés au réseau de ventilation hygiénique. Il convient de ne pas dramatiser cette difficulté, mais d'être conscient qu'elle peut se traduire par un coût d'intervention plus important ou un risque de perte de qualité énergétique ou de qualité de l'air.

6.3.4 Principe de responsabilité partagée

Ce principe invite tant le concepteur que les constructeurs et habitants à agir à leur niveau contre les dérèglements climatiques et l'épuisement des ressources. Nous considérons que tant les architectes que les entrepreneurs et développeurs de produits impliqués dans ce standard prennent effectivement leur responsabilité en travaillant à l'évolution des modes constructifs. Les habitants également montrent une réelle prise de responsabilité par leur choix d'une construction basée sur le standard *Passivhaus* et souvent par leurs efforts de diffusion du standard (par exemple au travers de journées portes ouvertes).

Cependant, on peut s'interroger sur la place que le standard lui-même laisse à l'habitant. Celui-ci n'y apparaît qu'au travers de valeurs de gains internes standardisés et de l'estimation du niveau de confort (consigne de température fixe en hiver et calcul du nombre d'heures au-dessus de 25°C selon (Feist *et al.*, 2001a)). En pratique, si le chauffage est effectivement réalisé au travers du réseau de ventilation au départ d'une batterie électrique ou gaz, le contrôle climatique d'hiver par l'occupant est limité. Souvent, seule une valeur de consigne centrale est modifiable par l'occupant, puisque l'uniformité

thermique et la non indépendance des puissances de chauffe dans chaque pièce empêchent de gérer une différenciation thermique entre locaux et que la petitesse des déperditions thermiques limite l'ampleur des ralentis nocturnes. La faiblesse des puissances de relance dissuade également parfois l'occupant de réaliser de tels ralentis (Henz, 2010). En été, le maintien de la ventilation mécanique dispense l'occupant de gérer la qualité de l'air par ouverture des fenêtres et l'évaluation du confort thermique par le logiciel PHPP laisse peu de place à la mise en œuvre de stratégies de contrôle climatique impliquant l'occupant. Le module de calcul de la ventilation intensive par exemple est en effet limité.

Une telle limitation du rôle de l'habitant est non seulement regrettable, mais également inefficiente. La communauté PLEA a appelé en 2009 dans son manifeste à reconsidérer le rôle de l'occupant, pour le voir comme un habitant activement impliqué dans la régulation climatique et la définition des niveaux de confort thermique (PLEA2009 deleguates, 2009; Cole *et al.*, 2010). L'étude de la sensation de confort thermique a en effet démontré que la satisfaction des occupants dans une ambiance thermique donnée est déterminée par l'écart entre leur attente vis à vis de cette ambiance et leur ressenti physique (Fountain *et al.*, 1996). La conséquence pratique de cette découverte est que le confort thermique n'est pas quelque chose qui peut être aisément défini *a priori*. Des normes et ouvrages de référence tels que l'ASHRAE Standard 55 ou la EN15251 proposent aujourd'hui des modèles de confort adaptatifs (ASHRAE, 2004; IBN, 2007b). Depuis le projet PassiceON, le standard *Passivhaus* en Belgique inclut bien la notion de confort adaptatif selon la EN15251, mais uniquement pour la démonstration du confort d'été dans les bureaux.

6.3.5 Principe de participation

Le principe de participation appliqué à l'architecture implique d'une part d'organiser une participation conjointe de toutes les parties à l'élaboration et à la réalisation du projet, et d'autre part de donner un rôle d'acteur au projet en tant que tel. Il nous semble évident que l'on doive accorder au standard *Passivhaus* et à sa mise en œuvre en Belgique la qualité d'avoir rassemblé architectes, entrepreneurs, fabricants de matériaux et produits, pouvoirs publics et maîtres d'ouvrages privés. Le travail de la Plateforme Maison Passive est au centre de cette dynamique et reflète parfaitement la première dimension du principe de participation.

L'autre dimension de ce principe, qui veut que le projet lui-même soit un acteur de transformation de la société, ne se retrouve pas intrinsèquement dans le standard. Si certains projets ont servi de base à un processus de forma-

tion et d'éducation à l'environnement (par exemple le projet d'école Metis à Louvain-la-Neuve par Trait Architectes), c'est d'abord par le rôle militant que se sont donnés les maitres d'ouvrage. Les bâtiments, au contraire, se caractérisent souvent à l'extérieur par une grande sobriété qui ne les différencie pas de l'architecture actuelle. Les ambiances intérieures pour leur part sont souvent neutres, stables dans le temps et uniformes entre les différents locaux, ce qui ne permet pas de sentir les phénomènes physiques à l'œuvre. Rien dans le bâtiment conçu selon le standard *Passivhaus* ne permet à coup sûr d'en identifier le caractère particulier, si ce n'est l'épaisseur des vitrages ou l'absence de radiateurs dans tous les locaux. L'étanchéité à l'air et la ventilation mécanique suppriment toute sensation de mouvement d'air, l'absence d'émetteur de chauffage dans les locaux rend insensible le fonctionnement du chauffage d'appoint, la température élevée de toutes les parois ne permet pas de deviner les conditions extérieures, etc. Attention, nous ne proposons pas de revenir à des bâtiments peu performants pour le plaisir de se sentir en inconfort thermique. Mais il existe néanmoins une *dimension cachée* de la qualité spatiale qui a trait aux variations climatiques dans les bâtiments. Cet aspect de la qualité spatial a été décrit notamment par Lisa Heschong (Heschong, 1981). Cette dimension pourrait être utilisée pour sensibiliser l'habitant à l'origine de la chaleur dont il profite, qu'elle soit active ou passive. Il nous semble que la prise de conscience environnementale peut difficilement être réalisée uniquement sur base d'éléments abstraits (indicateurs physiques tels que les Wh/(m^2an)). Elle est au contraire facilitée par la perception directe, physique, des éléments en jeu. A performance énergétique égale, il nous semble dès lors que le dispositif impliquant une action consciente (placer une bûche dans un foyer) ou permettant de sentir les choses (par des gradients de températures, des mouvements d'air perceptibles ou un rayonnement thermique) sont à préférer.

6.4 Conclusion - Une approche surtout performantielle

Nous avons dans ce chapitre rappelé l'origine et les fondements du standard *Passivhaus*. Nous en profitons pour critiquer son importation sans remise en cause dans un contexte climatique et constructif différent de celui où il a été développé. Nous mettons en évidence également sa filiation limitée avec le bioclimatisme. L'inventaire comparé des moyens et objectifs de ces deux démarches et leur classement selon une grille spatiale - constructive - performantielle montre la différence de place qu'elles laissent aux aspects spatiaux.

L'analyse du standard au travers des cinq principes de soutenabilité met en évidence les qualités et limitations de ce standard. Elle révèle particulièrement

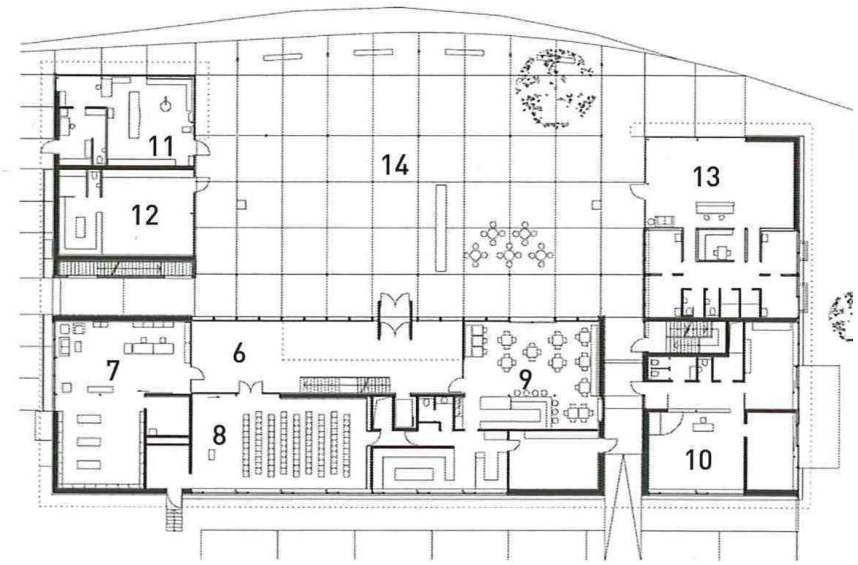
son aspect ambitieux et performantiel et souligne sa faible prise en compte des questions culturelles ou de la complexité de la question énergétique en architecture. Ce faisant, nous reconnaissons au standard *Passivhaus* une capacité à participer à une réponse aux enjeux climatiques et environnementaux, mais non à constituer par elle-même une traduction concrète de l'écologie ou de l'architecture soutenable.

Il est à mettre au crédit des promoteurs de cette démarche qu'ils ne prétendent pas le contraire. Lors des réflexions internes de la Plateforme Maison Passive belge francophone organisées en 2010 visant à redéfinir ses missions et valeurs, les opinions que "la PMP [...] vise le bien-être général à travers la promotion d'un concept énergétique d'utilité publique" et "le standard passif est un standard purement énergétique et il se concentre sur l'énergie consommée. Ce standard est au cœur de la mission de la PMP" ont obtenu un quasi consensus (Guerriat, 2010). De même, la Plateforme est consciente de la limitation de ce standard et cherche à conserver une vision globale, par exemple sur les qualités des matériaux ou les questions d'aménagement du territoire, qui "recadre continuellement les aspects techniques du passif". Elle affirme également que le caractère uniquement énergétique du label "n'empêche en rien de donner des conseils pour aller plus loin et d'ouvrir une réflexion sur des standards plus exigeants à l'avenir." (Guerriat, 2010). Dans cet esprit, citons l'exemple de la province autrichienne du Vorarlberg où se développe une pratique architecturale originale de qualité combinant le respect du standard *Passivhaus* à une mise en valeur du bois, matériau vernaculaire, support d'une tradition d'artisanat et écologiquement intéressant (voir par exemple le Centre Communal de Ludesh par Herman Kaufmann, figures 6.10 et 6.11). Ce développement architectural permet en outre un développement économique de la province et accompagne une réflexion sociétale plus large insistant sur la coopération et la décentralisation (Gauzin-Müller, 2009)), illustrant tant le principe de participation que ceux de responsabilité partagée et d'intégration des composantes.

Si l'on ne peut reprocher à une démarche de ne pas atteindre des objectifs qu'elle ne se fixe pas, est-il alors pertinent d'aborder une réflexion sur celle-ci sous l'angle de l'architecture soutenable ? Nous pensons que oui, pour plusieurs raisons.

Premièrement, sur base du principe de précaution et d'incertitude, il est justifié de s'interroger sur la façon dont la haute performance énergétique est réalisée aujourd'hui, notamment au travers du label *Passivhaus*. Le principe de précaution visant à identifier les risques liés à une pratique, et ces risques pouvant prendre des formes multiples, cette réflexion doit se faire dans un cadre plus large que les seules questions techniques et de performance.

FIGURE 6.10 – Centre communal, Ludesh , Hermann Kaufmann, 2005 : exemple de projet combinant respect du standard *Passivhaus* avec l'usage de matériaux à faible énergie grise (bois indigène, cellulose, laine de mouton), une qualité spatiale propre et un rôle structurant à l'échelle du village par la concentration de services en un centre prenant la forme d'un espace public. Implantation ©googlemaps et vue ©Hermann Kaufmann.



Plan du rez-de-chaussée.
6 hall d'accueil
7 bibliothèque municipale
8 salle polyvalente
9 café-restaurant
10 jardin d'enfants
11 bureau de poste
12 bureaux du cercle de qualité Holzbau-Kunst
13 locaux à louer
14 place couverte

Plan de l'étage.
15 accueil de la mairie
16 bureaux des services municipaux
17 bureau du maire
18 salle de délibération du conseil municipal
19 salle de séminaire
20 bureaux à louer

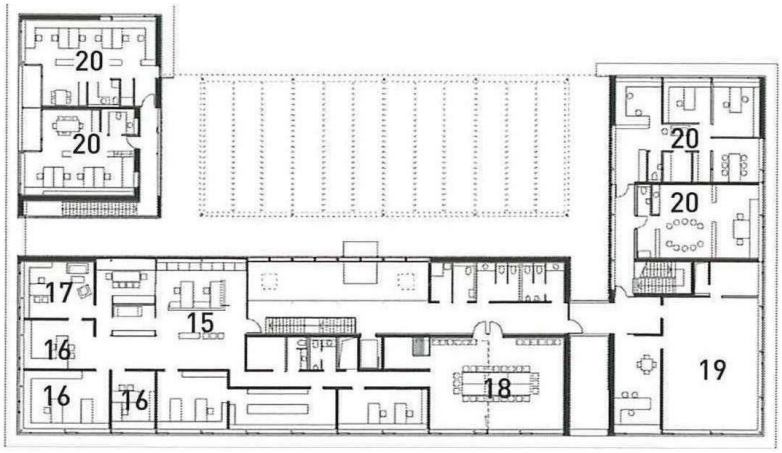


FIGURE 6.11 – Centre communal, Ludesh , Hermann Kaufmann, 2005 : exemple de projet combinant respect du standard *Passivhaus* avec l'usage de matériaux à faible énergie grise (bois indigène, cellulose, laine de mouton), une qualité spatiale propre et un rôle structurant à l'échelle du village par la concentration de services en un centre prenant la forme d'un espace public. Plans ©Hermann Kaufmann.

Deuxièmement, en vertu du principe de participation, il est de la responsabilité des praticiens suivant le standard *Passivhaus*, tout comme des autres, de s'interroger plus largement sur la soutenabilité de leur démarche.

Troisièmement, nous l'avons déjà mentionné, les démarches de très haute performance énergétique sont vouées à une généralisation rapide. Devenant une des bases du projet d'architecture, tout comme la stabilité ou la pertinence économique, la réflexion autours de la performance énergétique ne peut se faire isolément, mais doit, en vertu de l'axe de conciliation, participer à une réflexion plus large. Une réflexion énergétique détachée et uniquement performantielle pourrait s'avérer contradictoire avec d'autres dimensions de la soutenabilité.

Enfin, plus positivement, la généralisation prochaine des démarches basse énergie constitue une opportunité extraordinaire pour l'intégration plus profonde dans la pratique architecturale des notions de soutenabilité. Dans les années qui viennent, les architectes seront amenés à revoir en profondeur leurs pratiques à l'aune des exigences énergétiques. Une telle remise en question à grande échelle est sans précédent de par son aspect contraint. Jusqu'ici, les mutations de la pratique architecturale, les naissances de courants conceptuels ou stylistiques ont été spontanées, reflets de considérations d'un groupe limité d'avant-gardistes, librement suivis ou décriés par le reste de la profession. Aujourd'hui, nous nous trouvons face à une obligation de changement. Dans ce changement, les démarches établies telles que le *Passivhaus* constituent des repères qui inspireront une part importante de l'architecture des prochaines décennies. L'enrichissement aujourd'hui de la réflexion du groupe d'avant-garde vise donc, par rebond, l'enrichissement à court ou moyen terme d'une part beaucoup plus importante de la pratique architecturale.

Chapitre 7

Bâtiments zéro-énergie

Tout comme le standard *Passivhaus*, les approches *zéro-énergie* constituent des repères incontournables aujourd'hui et à l'avenir pour les questions de performance énergétique. Il est donc justifié de leur consacrer un chapitre spécifique de notre analyse. Nous développons ici un court exposé de l'histoire de cette notion puis une double critique, l'une émanant de la littérature scientifique, l'autre originale autour de la notion de pragmatisme.

7.1 Histoire et définition des net-ZEB

Les premières mentions de bâtiments *zéro-énergie* sont la MIT Solar House I en 1933 (Butti et Perlin, 1980) et la Bliss House en 1955 (Bliss, 1955). D'autres exemples historiques sont la Vagn Korsgaard Zero energy Home au Danemark (Esbensen et Korsgaard, 1977) et la Saskatchewan Conservation House (Besant *et al.*, 1979) (figure 7.1). Les premières se concentraient sur la maximisation de la production et valorisation de l'énergie solaire, les secondes y ajoutaient des mesures de réduction de la demande de chaleur.

Assez vite est apparue une réflexion sur le caractère autonome ou non des bâtiments zéro-énergie. Vale *et al.* ont montré que l'idée d'une liaison au réseau permet une meilleure performance sur le cycle de vie du bâtiment que la recherche d'autonomie par le stockage in situ de l'énergie produite, et offre également plus de flexibilité (Vale et Vale, 2002). L'idée que le bâtiment zéro-énergie fait partie intégrante d'un réseau énergétique s'est dès lors généralisée. L'idée d'un habitat entièrement autonome est aujourd'hui limitée aux cas où les réseaux d'énergie font défaut. Pour éviter toute confusion le terme *bâtiment net zéro-énergie (net-ZEB)* est utilisé de préférence à bâtiment zéro-énergie pour désigner une situation évaluée à échéance, généralement an-

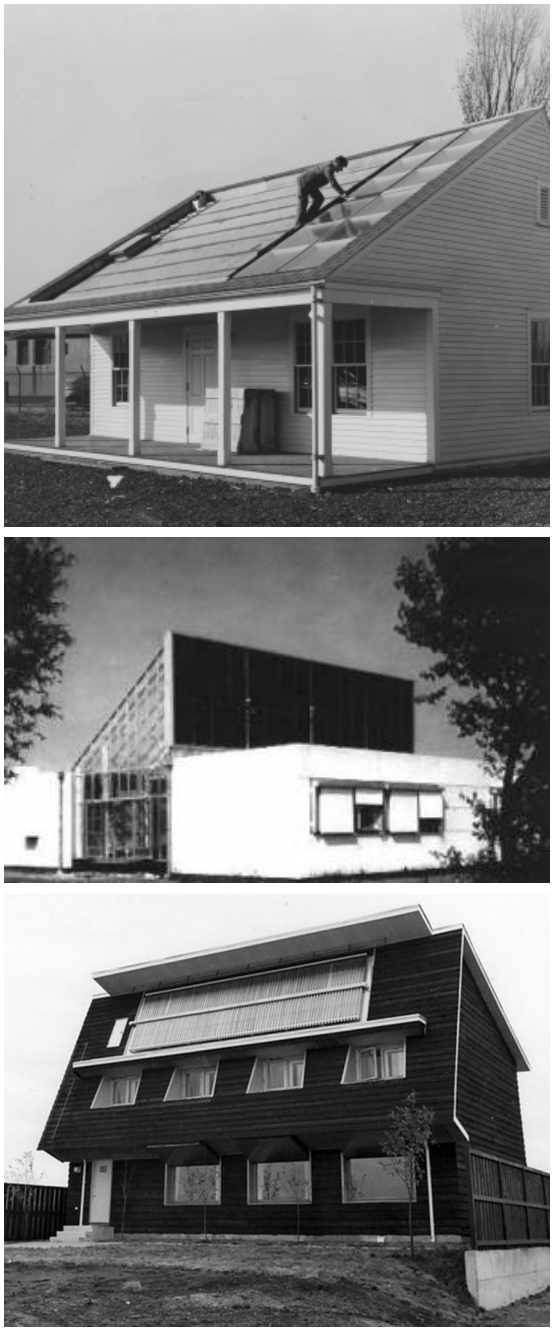


FIGURE 7.1 – Vue d'une des premières maisons solaires : la MIT Solar House I - 1933 (photo : http ://museum.mit.edu), la Vagn Korsgaard Zero energy Home - 1977 (photo : http ://passipedia.passiv.de) et la Saskatchewan Conservation House - 1979 (photo : http ://esask.uregina.ca, Regina Leader-Post)

nuelle. Il s'agit d'avoir pu produire et réinjecter sur un réseau autant d'énergie que l'on en aura consommé. Cette approche a le mérite de replacer le bâtiment dans un contexte régional (via le réseau d'électricité) ou local (via des réseaux de chaleur urbains). Notons que certains projets se présentent déjà comme plus ambitieux et prétendent à un statut de bâtiment à énergie positive. Ce statut est néanmoins défini relativement à la notion de net zéro-énergie. Il n'y a donc pas lieu de s'y étendre ici. Reprenant l'idée de bilans nets, le gouvernement fédéral belge définit un bâtiment net zéro-énergie de la façon suivante : "Le bâtiment doit répondre au standard *Passivhaus* et le besoin d'énergie résiduel pour le chauffage et le refroidissement des espaces doit être complètement compensé par une production d'énergie renouvelable sur site" (SPF-Finances, 2010).

Pointons que l'acronyme net-ZEB peut prêter à confusion avec l'expression anglophone *nearly zero-energy building* regroupant l'ensembles des approches visant à une très haute performance énergétique par la réduction des besoins, notamment dans le jargon des institutions européennes : "Un bâtiment dont la consommation d'énergie est quasi nulle [est] un bâtiment qui a des performances énergétiques très élevées [...]. La quantité quasi nulle ou très basse d'énergie requise devrait être couverte dans une très large mesure par de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, notamment l'énergie produite à partir de sources renouvelables sur place ou à proximité" (Parlement européen et Conseil européen, 2010). L'acronyme NZEB peut représenter l'une ou l'autre notion selon les auteurs et les contextes. Dans un soucis de clarté, nous utiliserons systématiquement dans cette thèse NZEB pour nearly zero-energy building et net-ZEB pour bâtiment net zéro-énergie.

Une autre clarification est à faire entre les notions zéro-énergie et zéro-carbone. Le "Common Language for sustainable construction" propose les définitions reproduites ci-dessous (European Concrete Platform et Architects Council of Europe, 2012). On constate une différence d'approche entre des objectifs exprimés en termes de carbone ou d'énergie primaire, selon que l'on se concentre sur l'impact climatique ou sur une approche plus large de l'enjeu énergétique. L'expression d'objectifs selon l'un ou l'autre terme est importante dans la mesure où les solutions techniques privilégiées sont différentes. Des solutions de chauffage à la biomasse ou à l'électricité nucléaire seront par exemple favorisées dans un bilan carbone, mais plus nuancées dans une approche énergétique.

> "Net zero carbon buildings : Buildings that, by virtue of the materials of which they are constructed and by virtue of the fact that they produce surplus energy from renewable sources, ensure that, over their Design Life, they compensate for all carbon emissions

> associated with the construction and use of the building." (European Concrete Platform et Architects Council of Europe, 2012)
>
> "Net zero Energy : The goal of Net Zero Energy is to become a community that produces its own energy. Net Zero Energy Buildings (ZEB), for instance, rely on efficiency to reduce energy needs and allow the balance to be supplied with renewables. ZEBs produce as much energy on-site as they use annually. The reason ZEBs are referred to as 'net zero' is that they are still connected to the grid. Sometimes they produce more power than they are consuming and feeding power to the grid and running the meter back. Sometimes they consume more power than they are producing and pulling power from the grid. But for a ZEB, the energy given to the grid is equal to the amount of energy pulled from the grid on an annual basis. It is important to note that net zero refers to energy use, and does not necessarily mean zero carbon emissions from energy use." (European Concrete Platform et Architects Council of Europe, 2012)

7.2 Critiques des net-ZEB

7.2.1 Critiques observées dans la littérature

Ces définitions restent très vagues et reflètent le manque de consensus international sur la notion de bâtiment net zéro-énergie. La Tâche 40 *Vers des bâtiments nets zéro-énergie* de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) a dès lors compilé les différentes définitions existantes et leurs critiques (Agence Internationale de l'Energie, 2010). Il ressort de cette tâche différents éléments vis à vis desquels toute définition des net-ZEB devrait se positionner (Sartori *et al.*, 2010; Marszal *et al.*, 2011; Torcellini P., 2006) :

1. Le niveau de spécification des paramètres de calcul doit être clarifié. L'évaluation doit-elle préciser quelles conditions climatiques intérieures réaliser ? Les charges internes doivent-elles être forfaitaires ? Pour quel climat doit se faire l'évaluation ? Si l'on va dans le sens d'une définition précise, le recours aux différentes normes internationales et réglementations nationales est possible. Ceci aurait l'avantage général de faciliter la comparaison entre bâtiments, mais risque de générer des situations exceptionnelles où le concept ne serait plus pertinent. Il est aussi nécessaire de prendre en compte les conditions particulières propres aux rénovations. La question du maintien d'exigences de consommations d'énergie

maximum est particulière, car elle présuppose une priorité à donner aux économies d'énergie. Une fois réalisées et vérifiées, celles-ci sont souvent acquises pour toute la vie du bâtiment. Leur donner la priorité est donc souvent l'approche la plus logique.

2. Le type d'indicateur et les règles de pondération entre formes d'énergie doivent être explicitées. Si l'énergie primaire est l'indicateur généralement préféré, elle soulève des questions telles que l'évolution dans le temps des coefficients de conversion et la façon de prendre en compte les énergies renouvelables (Segers, 2008). Les émissions de CO_2 sont une alternative possible, tout comme un bilan financier ou exergétique. Ces deux dernières possibilités sont cependant respectivement instables dans le temps et peu compréhensibles par le public.
3. Le caractère « net » de la définition doit être précisé : quels éléments sont pris en compte et sur quelle période de temps ? L'échelle de temps privilégiée est souvent l'année, ou un multiple d'années. Des divisions temporelles plus fines sont peu populaires car plus contraignantes, mais une tendance existe pour réaliser des évaluations sur le cycle de vie complet du bâtiment (Hernandez et Kenny, 2010). La question du type d'énergie considéré est également importante. A côté de l'énergie nécessaire au maintien du climat intérieur, il n'y a pas de consensus sur la prise en compte des énergies liées à l'occupant ou aux matériaux. Ces deux aspects souffrent d'un manque de précision des méthodes d'évaluation et d'une divergence de point de vue selon l'utilité que l'on donne à la définition des net-ZEB. D'un point de vue gestion des réseaux énergétiques, l'énergie grise n'a pas d'impact, mais l'occupation bien. Du point de vue du constructeur, l'inverse est plus vrai. L'importance relative de ces deux aspects est croissante au vu de la diminution des consommations d'énergie liées au maintien des ambiances intérieures. Il existe également un débat relativement aux énergies renouvelables, entre la limitation aux énergies produites sur site et l'intégration de crédits carbones.
4. Les conséquences en termes de réseau énergétique. Les approches net-ZEB considèrent souvent le réseau comme une forme de stockage infini, ce qui n'est pas la réalité. Des évaluations plus fines sont nécessaires, notamment au niveau de l'utilisation effective de l'énergie délivrée au réseau et des écarts entre les puissances maximales demandées et délivrées, ce qui devrait générer des indicateurs spécifiques à intégrer dans la démarche ZEB. Ceci doit se faire à la lumière des évolutions que connaîtront les réseaux énergétiques à l'avenir, avec la part croissante d'énergie renouvelable qu'ils devront intégrer.
5. Les procédures de monitoring et d'accompagnement doivent être précisées et devraient faire partie intégrante de la définition des net-ZEB.

Cette liste permet de mettre en évidence les faiblesses notamment de la définition belge. Erwin Mlecnik *et al.* lui ont pointé 11 faiblesses, parmi lesquelles nous pensons utile de relever la limitation aux seuls besoins de chaud et de froid, une définition statique du confort liée à la reprise du standard Maison Passive qui n'exploite pas entièrement la norme EN 15251, la non prise en compte des ensembles de bâtiments et de programmes autres que les logements, l'oubli de la question de la liaison intelligente au réseau énergétique et des éléments de monitoring ou de garantie de performance (Mlecnik *et al.*, 2011).

Récemment, le Building Performance Institute Europe (BPIE) a également réalisé une brochure reprenant les principales critiques à l'égard du concept net-ZEB (BPIE, 2011). Cette brochure ramène ces critiques à trois questions centrales : comment lier l'objectif net-ZEB avec la politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre et le principe d'optimum économique ? Comment assurer la logique interne à ce concept, notamment en faisant la part juste entre réduction des besoins et production renouvelable ? Et comment ouvrir ce concept à des évolutions futures, telles que la notion de bâtiment à énergie positive ? Pour répondre à ces questions, le BPIE propose une standardisation de la méthode de calcul à l'échelle européenne (ce qui n'exclut pas des adaptations nationales), une juxtaposition d'indicateurs énergétiques et d'émissions de gaz à effet de serre et la définition d'objectifs chiffrés parallèles pour la consommation d'énergie et le taux de couverture renouvelable.

Enfin, la Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations (REHVA) a proposé en 2012 une clarification de la définition européenne intégrant les commentaires listés plus haut (Kurnitski *et al.*, 2011). Les principales idées de cette proposition sont les suivantes :

- Définition générale :
  Le caractère net zéro-énergie est le résultat d'une différence nulle entre énergie importée et exportée, après conversion en énergie primaire. Les limites du système pour lequel réaliser cette évaluation sont à reprendre de la norme EN 15603 :2008. Cela implique qu'elle peut porter sur un groupe de bâtiment partageant des techniques et que des éléments techniques localisés partiellement à l'extérieur du bâtiment seront considérés dans le système.
- Méthode de calcul :
  Les méthodes de calcul pour l'évaluation des besoins et des systèmes sont à reprendre des transpositions nationales de la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments et la norme EN 15251 :2007. Les années climatiques de références doivent être établies sur base de la

norme ISO15927-4 :2005 et les facteurs de conversion en énergie primaire sur base de EN15603 :2008.

– Eléments à considérer :
  Sur base de l'article 2 de la directive européenne EPBD et sur base de la norme EN15603 :2008, les énergies liées au chauffage, au refroidissement, à la ventilation, à la production d'eau chaude domestique et à l'éclairage sont à considérer. L'énergie liée aux applications domestique ne l'est *a priori* pas.
– Place de l'énergie renouvelable :
  En accord avec la directive européenne EPBD, mais en conflit avec la norme EN15603 :2008, l'énergie renouvelable produite sur le site et utilisée dans le bâtiment est considérée comme une réduction du besoin net en énergie (rendements des techniques inclus) et non comme une énergie délivrée (voir figure 7.2). Cette nuance peut avoir un impact selon le mode d'expression des exigences : si un seuil de besoin d'énergie maximal est exprimé en parallèle à un bilan net par exemple, la production renouvelable pourrait être considérée pour les deux indicateurs si elle est assimilée à une réduction du besoin net.

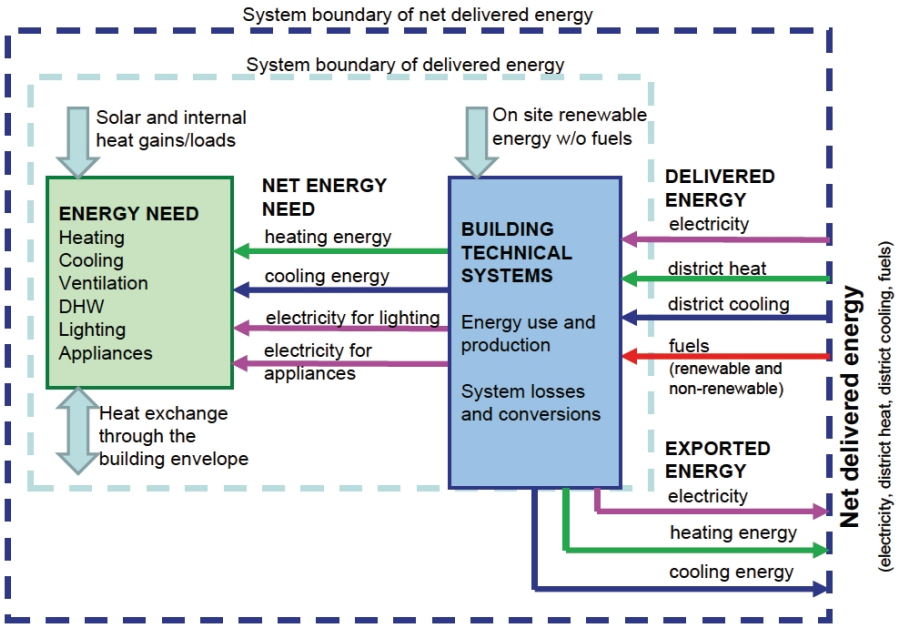


FIGURE 7.2 – Frontière du système *énergie fournie nette* dans le proposition du REHVA, figure reprise de (Kurnitski *et al.*, 2011)

Il ressort de ces analyses et contre-propositions que les définitions officielles actuelles :

1. manquent de clarté dans la portée de l'évaluation du caractère net-ZEB (que considérer ?) ;
2. manquent de clarté dans les conditions frontières de l'évaluation (comment évaluer ?) ;
3. manquent de pragmatisme du fait de leur non déclinaison selon les programmes, échelles... ;
4. sont réductrices du fait de l'évaluation d'un seul indicateur énergétique ;
5. sont inadéquates du fait de l'absence d'objectifs spécifiques pour les sous-problématiques ;
6. sont uniquement théoriques du fait de l'absence de suivi des consommations réelles.

7.2.2 Manque de pragmatisme

Aux critiques et limitations présentées ci-dessus, nous pensons utile d'ajouter que la définition des bâtiments zéro-énergie doit avant tout être un outil pratique destiné à guider le concepteur dans ses choix. Il en découle que cette notion doit répondre à trois caractéristiques : (1) la rigueur scientifique indispensable, (2) l'expression d'un niveau d'ambition proportionnel à l'enjeu et (3) le pragmatisme, compris comme sa cohérence avec la pratique de terrain. Nous estimons que la définition actuelle n'offre pas une réponse optimale à cette triple exigence.

La rigueur réduit le pragmatisme

Les critiques relevées plus haut ont mis en évidence qu'une limitation aux besoins de chauffage et de refroidissement n'était pas adéquate. Il y a aujourd'hui consensus pour considérer que la notion des net-ZEB devrait intégrer les consommations d'énergie liées au maintien des ambiances thermiques, à l'éclairage et aux auxiliaires HVAC. L'intégration de l'énergie grise liée aux matériaux et composants mis en œuvre est souvent mentionnée comme un élément à intégrer. Pour mieux refléter la réalité, l'évaluation devrait également intégrer d'autres consommations telles que l'énergie consommée par le chantier et le processus de conception en tant que tel, ou encore l'impact du projet sur l'énergie dépensée en transports et infrastructures ou son influence éventuelle sur les comportements énergétiques des habitants.

Sans trancher sur la liste des paramètres à intégrer, force est de constater que nous sommes face à une tendance qui pousse à agréger en une seule évaluation une série d'impacts énergétiques différents. D'une part, l'agrégation des différentes consommations rend la valeur finale difficilement compréhensible. Il devient difficile de se représenter concrètement ce qu'elle représente et quel est le poids de chaque mesure de performance énergétique dans le résultat final. D'autre part, il est difficile d'obtenir une valeur réaliste avant d'atteindre un stade d'avancement poussé du projet, vu que des choix préliminaires doivent avoir été faits pour chaque élément intervenant dans le calcul. Or, ce sont souvent les premières étapes qui déterminent la performance énergétique, ainsi que la combinaison de la performance énergétique avec la performance économique. La tendance à l'exhaustivité du calcul énergétique pourrait donc à terme rendre l'évaluation net zéro-énergie inopérante comme guide de conception.

L'AIE ne constate pas autre chose en proposant de façon limitée que l'exigence zéro-énergie soit accompagnée d'une exigence de besoin maximal d'énergie. Cette recommandation traduit la nécessité, face à la complexification et l'abstraction grandissante de cette notion, de conserver des indicateurs partiels intelligibles.

L'ambition des net-ZEB est détachée du projet

La recherche d'un niveau « zéro-énergie » reflète une approche sectorielle de l'impact énergétique des bâtiments. Cette ambition peut être acceptée en tant que projection à l'échelle du secteur d'un équilibre énergétique global de nos sociétés, mais rien n'indique que l'équilibre annuel entre production et consommation soit pertinent à l'échelle d'un projet d'architecture. Au contraire, le niveau net zéro-énergie génère une iniquité flagrante au niveau des projets individuels, notamment entre les sites bénéficiant d'un fort potentiel d'énergies renouvelables et les autres, ou entre les projets permettant une réduction drastique des besoins et ceux qui ne le peuvent du fait de contraintes propres et justifiée (pensons aux questions de patrimoine remarquable, de capacité d'investissement, etc.). Un niveau d'ambition unique ne peut pas être considéré *a priori* comme applicable partout. Certaines situations de projet nécessiteront de revoir les ambitions à la baisse face aux contraintes techniques, économiques ou patrimoniales, tandis que d'autres permettrons d'aller plus loin que l'équilibre énergétique.

Dès lors, quel crédit associer à ce niveau d'ambition, sourd à la diversité des situations rencontrées ? A l'opposé, le principe de responsabilité commune

mais différenciée du développement durable suggère de considérer chaque projet d'architecture comme un moment particulier, pour lequel un niveau d'ambition nécessairement très ambitieux mais éventuellement toujours différent doit être systématiquement redéfini.

7.3 Conclusion - Une démarche étrangère à l'architecture

Bien qu'incontournable aujourd'hui, la notion de bâtiment zéro-énergie apparait de part notre analyse comme assez éloignée de l'architecture, tant dans ses fondements que dans son ambition. Les critiques qui lui sont faites par la communauté scientifique portent principalement sur la rigueur physique de sa définition, tandis que nous lui voyons un manque de pragmatisme de par sa volonté (louable en soi) d'exhaustivité. Nous pensons symptomatique de ce détachement que la définition bruxelloise du bâtiment zéro-énergie l'assimile à un bâtiment conforme au standard *Passivhaus* équipé d'une capacité suffisante de production d'énergie renouvelable.

Il nous semble que cette distance a pour origine le renoncement au caractère autonome du bâtiment zéro-énergie et le basculement vers le concept net zéro-énergie. Sans ce basculement, le niveau d'ambition proposé aurait nécessairement eu à l'échelle de l'architecture des conséquences aussi fortes que le standard *Passivhaus*, mais différentes de ce dernier dans la mesure où l'objectif d'autonomie implique des formes de conservation de l'énergie dans le bâtiment et donc la nécessité d'analyses de comportements dynamiques sur base saisonnière et journalière. L'objectif d'autonomie totale aurait également posé différemment la question des formes d'énergie valorisables (attention accrue sur la conservation de l'exergie) et mis en cause la définition du confort thermique.

Si en l'état l'approche zéro-énergie n'est pas ou peu génératrice d'architecture, il apparait qu'une réouverture de la question de l'autonomie totale en énergie pourrait être porteuse au niveau académique, malgré qu'il soit admis que cette piste ne constitue pas un objectif rationnel à l'échelle collective dans le contexte actuel.

Troisième partie

Reconstruire une approche de l'énergie

Chapitre 8

Viser la soutenabillté

8.1 Retour sur la question

Dans l'introduction, nous avons formulé l'objet de notre recherche par deux questions : *Y a t-il lieu de rediscuter l'approche actuelle de l'énergie en architecture ?* et *Comment construire une approche de l'énergie cohérente avec l'idée d'architecture soutenable ?*

La première partie a permis de préciser les termes de ces énoncés. La mise en perspective historique a montré en quoi l'idée de développement soutenable va au-delà du débat entre anthropocentrisme et écocentrisme (chapitre 2). Nous avons également indiqué quelle est la définition de l'architecture soutenable que nous retenons (chapitre 3) et pointé son originalité : la double relation à l'environnement (depuis lui et vers lui), la double façon d'être au monde (physiquement et culturellement), la recherche de pertinence à des multiples échelles et l'inscription dans le temps. Enfin, nous avons montré dans le chapitre 4 que la raréfaction des ressources, la précarité énergétique et l'éthique appellent à une réduction drastique des consommations d'énergie. Nous y avons également montré que même les pratiques actuelles les plus ambitieuses pourraient être insuffisantes pour répondre aux attentes en termes de limitation des changements climatiques.

La deuxième partie questionne les démarches énergétiques actuelles, avec une attention particulière sur le standard *Passivhaus* et l'approche net-ZEB (chapitres 6 et 7). Le caractère essentiellement technique et performantiel du standard *Passivhaus* a été démontré et rend celui de l'approche net-ZEB évident. A côté de la reconnaissance de leur ambition, différentes limites à ces approches ont été pointées, à savoir celles de la capacité du standard *Passivhaus* à générer une architecture soutenable et celle de l'approche net-ZEB à consti-

tuer un outil pratique pour le concepteur. Ceci dit, si les approches techniques actuelles ne sont pas à même de générer une architecture soutenable, elles n'en sont pas moins les meilleurs outils actuellement disponibles pour répondre aux multiples enjeux liés aux questions énergétiques.

A ce stade, nous avons donc montré que les approches actuelles de l'énergie ne sont pas à même de générer une architecture soutenable. Nous pouvons donc répondre oui à la première question posée en introduction : il y a lieu de rediscuter notre approche de l'énergie, si l'on souhaite faire de cet aspect un levier d'évolution de l'architecture et par là de la société.

Nous pouvons dès lors dans la troisième partie nous attacher à la seconde question et proposer les bases d'une approche de l'énergie qui soit plus proche à la fois de l'objectif de développement soutenable et d'un discours d'architecte. Sans aller jusqu'à proposer des formes architecturales qui nous confronteraient à des questions stylistiques, nous nous donnons l'ambition d'identifier des moyens d'émergence de l'architecture soutenable, au départ de la question particulière de la performance énergétique. Nous pensons en effet que si l'architecture soutenable a pu être définie, sa manifestation concrète doit encore être identifiée et ses méthodes développées.

Ces moyens d'émergence ne sauraient être un retour aux pratiques de l'architecture bioclimatique oubliant les apports réels et les ambitions des démarches *Passivhaus* et net-ZEB. Les approches climatiques n'intègrent pas ou peu plusieurs dimensions de l'architecture soutenable, telles que les questions sociales ou liées par exemple au principe de précaution. Tout en reconnaissant leur intérêt, nous considérons que les approches tant climatiques qu'actuelles constituent des réponses à une question limitée, à savoir la raréfaction des ressources énergétiques. Elles répondent à cette question en adaptant ou inventant différents dispositifs et en questionnant certains paramètres de l'équation énergétique tel que le confort, mais n'intègrent pas pleinement le nouveau paradigme que certains voient dans les questions de soutenabilité (Morin, 2007).

Nous partons de l'idée que la réponse à une question nouvelle doit se faire avec des moyens originaux dont la logique même est une partie de la réponse, ainsi que le propose Edgard Morin : "Le problème désormais n'est pas de prolonger la voie, n'est pas même d'aménager la voie avec quelques adoucisseurs. Il faudrait changer de voie et c'est là le problème le plus crucial." (Morin, 2007). Notre apport principal dans cette thèse ne sera donc pas la critique des méthodes actuelles proposée jusqu'ici, mais une proposition d'approche nouvelle construite sur les bases même de l'objectif à atteindre, à savoir la soutenabilité.

8.2 Méthodologie

L'approche renouvelée de l'énergie en architecture que nous proposons est construire au départ de deux ensembles d'éléments. D'une part ceux pouvant être observés dans les pratiques et contextes actuels décrites dans les deux premières parties de cette thèse, et d'autre part ceux liés à l'objectif que nous nous sommes donné de participer à l'émergence d'une architecture soutenable. Partir ainsi de l'objectif pour définir notre proposition ne garantit pas qu'elle constitue la réponse unique à l'enjeu de soutenabilité, mais assure la cohérence de notre proposition avec cet enjeu.

Cette section méthodologique s'ouvre donc logiquement par le recensement des éléments mis en évidence dans les parties I et II. Parmi eux, nous constatons la place importante des cinq principes de soutenabilité décrits à la section 3.2. Sur base des éléments recensés et d'une réflexion autour de ces cinq principes, nous proposons le découpage en chapitres de la troisième partie de cette thèse.

La méthode proposée ici est proche de celle utilisée par Krystel de Myttenaere dans sa propre recherche doctorale (Myttenaere (de), 2006). Au départ des 5 principes de soutenabilité appliqués à l'architecture que nous reprenons de son travail, elle définit trois axes de conception présentés au chapitre 3 (Figure 3.1). Elle arrive ainsi à proposer une attitude de conception qui questionne les relations que l'architecture entretient avec son milieu plutôt que l'objet architectural lui-même. Elle valide ensuite la pertinence de ces axes par l'analyse comparée de deux projets, le musée Guggenheim réalisé par Frank O. Gerry à Bilbao et le musée Queensland réalisé par Robin Gibson à Brisbane. Elle montre que les axes identifiés sont bien capables de générer un discours architectural et identifie grâce à eux une qualité différente à ces deux projets du point de vue de la soutenabilité. Notre démarche sera semblable dans le sens où nous partons des principes généraux auxquels doit répondre notre proposition pour définir celle-ci, et cherchons à dégager des éléments de théorie suffisamment forts que pour dépasser les logiques de style et les standards pratiques. La validité de notre proposition est démontrée par sa capacité à générer des résultats applicables, lesquels sont présentés dans cette même troisième partie.

La proposition de cette thèse, focalisée sur les questions énergétiques tout en considérant l'intégration de ces questions dans un ensemble plus large, présente également une similarité d'approche avec les thèses rédigées par Valérie Mahaut (Mahaut, 2009) et Sophie Trachte (Trachte, 2012). Considérant respectivement les questions relatives à l'eau ou aux matériaux, elles s'efforcent comme nous de replacer ces questions de toujours dans le cadre général de la

soutenabilité. Notre approche se différencie un peu des leurs dans la mesure où nous faisons un détour plus appuyé par l'analyse des principes du développement soutenable, pour questionner l'approche de l'énergie tant de l'intérieur que de l'extérieur.

8.2.1 Inventaire

Lors de l'analyse du contexte et de l'état de l'art présentée dans les parties I et II, nous avons pu identifier des éléments de deux ordres. Les uns ont trait à la méthode avec laquelle construire notre proposition, les autres directement à ce qu'elle pourrait être. Nous listons ces éléments dans le tableau 8.1. Parmi ceux-ci, pointons particulièrement les éléments 2.4, 6.1 et 7.1 (outils négligeant la vision actuelle de l'écologie, faiblesse des fondements des approches actuelles et focalisation sur les aspects techniques) qui justifient notre méthode de recherche basée sur des principes plus larges que les aspects physiques et technologiques de l'énergie. La volonté d'influencer l'architecture par une réflexion sur l'énergie est quand à elle soutenue par la piste 2.1 et l'exemple de l'architecture bioclimatique.

8.2.2 Structure

Parmi les éléments repris au tableau 8.1, les cinq principes de soutenabilité apparaissent au travers des pistes 3.1 et 6.3. Par leur ampleur, ces principes peuvent être redéployés en un certain nombre d'axes de réflexion. Nous choisissons, par facilité, de regrouper ces différents axes en cinq chapitres qui seront étudiés dans la suite de cette thèse :

- chapitre 9 : Travailler avec des concepts propres à la complexité ;
- chapitre 10 : Synthétiser les sous-thématiques de l'énergie ;
- chapitre 11 : L'énergie parmi les autres dimensions de l'architecture ;
- chapitre 12 : L'homme dans le monde par l'architecture ;
- chapitre 13 : Adapter les méthodes de conception.

Cette structure en chapitre est faite sans hiérarchie entre les thèmes qu'ils abordent. Ils ne reflètent qu'une volonté de clarifier notre discours et de faciliter la mise en évidence de ses éléments originaux.

TABLE 8.1 – Principes acquis dans les parties I et II

Chapitres	Pistes identifiées
1 - Introduction	1.1 - Postulat que l'architecture est un cadre modelant du mode de vie, et que le mode de vie peut être mis en cause
2 - Jalons de l'architecture verte	2.1 - L'histoire, et particulièrement la théorie bioclimatique, a démontré la capacité qu'a la compréhension des phénomènes physiques à générer des formes architecturales 2.2 - L'approche à développer doit concilier performance environnementale et idées écologiques 2.3 - La vision actuelle de l'écologie est l'intégration de l'homme dans son milieu. 2.4 - Les outils d'évaluation de l'architecture écologique intègrent peu cette compréhension de l'écologie.
3 - Soutenabilité	3.1 - Cinq principes liés à la soutenabilité ont été énoncés
4 - Ambition	4.1 - Le climat est amené à changer. Ce changement doit être anticipé. 4.2 - La réduction de l'impact énergétique des bâtiments passe par un travail ambitieux sur le bâti existant. 4.3 - La raréfaction des ressources nécessite de minimiser les besoins d'énergie et de viser une utilisation exclusive de ressources énergétiques locales et non délocalisables. 4.4 - L'architecture doit offrir passivement des conditions d'habitation adéquates aux personnes en précarité énergétique. 4.5 - Les modes constructifs doivent chercher à se limiter aux matériaux biosourcés ou en quantité abondante, y compris le stock de matière actuellement présent dans les bâtiments dans une approche *craddle to craddle*. 4.6 - Les bâtiments doivent se limiter à l'usage des énergies de flux qu'ils peuvent capter.
5 - Complexité	5.1 - La complexité apparaît dès lors que l'on considère la qualité énergétique de l'architecture comme un projet humain entrepris avec une visée de soutenabilité dans un contexte particulier. 5.2 - La théorie de la complexité propose divers outils et principes de réflexion. 5.3 - L'approche holistique, proche du projet d'architecture (conception d'un objet unique aux multiples pertinences) parait propice à la prise en compte de la complexité.
6 - *Passivhaus*	6.1 - La définition d'une approche sur des bases uniquement techniques est aisément remise en cause. 6.2 - L'approche *Passivhaus* est trop limitée, car s'accompagne d'emprunts au bioclimatique et ne garantit pas la performance réelle. 6.3 - Diverses réalisations, manquements et incompatibilités ont été identifiés par l'application des cinq principes de soutenabilité.
7 - Bâtiment zéro-énergie	7.1 - Une démarche basée sur l'analyse quantitative d'un caractère unique est difficilement conciliable avec le pragmatisme souhaité des démarches énergétiques

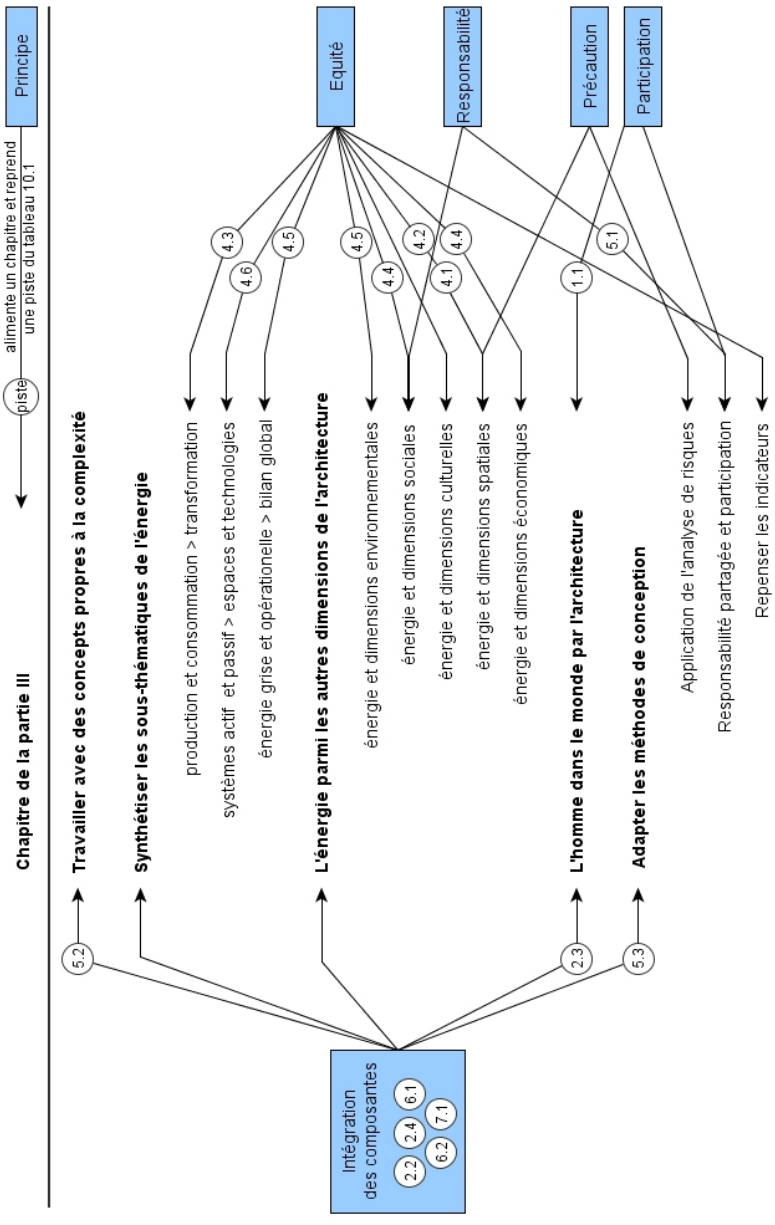


FIGURE 8.1 – Redéploiement de la réflexion autour des cinq principes de soutenabilité, entre les éléments pointés dans le tableau 8.1 et les différents chapitres de la partie III

Les chapitres proposés permettent de combiner les éléments précédemment identifiés et les cinq principes de développement soutenable auxquels nous nous référons régulièrement, sans nous enfermer dans une discussion linéaire de ces différents principes. Les paragraphes 8.2.2 à 8.2.2 ci-dessous expliquent comment ces cinq principes et les pistes répertoriées au tableau 8.1 alimentent cette structure. Le principe d'intégration des composantes apparait comme central dans l'organisation de notre réflexion. C'est véritablement autour de l'idée de l'intégration (comment ?) de composantes (lesquelles ?) que nous structurons notre travail. Les autres principes nous permettent d'identifier des questions spécifiques dans cet exercice d'intégration, et de nous donner des points d'accroche, des repères pour orienter la réflexion. En particulier, le principe d'équité nous permet d'identifier un grand nombre de questions et nous donne une mesure du niveau d'ambition à avoir relativement aux enjeux sociaux et environnementaux. L'imbrication entre ces chapitres, les cinq principes du développement durable et les différentes pistes listées au tableau 8.1 est illustrée par la figure 8.1.

Principe d'intégration

Le principe d'intégration des composantes environnementale, sociale, économique, politique et culturelle du développement durable se trouve reformulé par les pistes 1.2 (nécessité de décloisonnement) et 2.2 (nécessité de concilier idées et techniques) du tableau 8.1. Les pistes 6.1, 6.2 et 7.1 qui pointent les limites des approches uniquement techniques le réaffirment également par effet de contraste.

Il n'échappera pas au lecteur la proximité du principe d'intégration avec les idées de système et de complexité développées au chapitre 5 (piste 5.2). Les théories de la pensée complexe et de la systémique proposent un corpus de concepts et d'outils. Sont-ils pertinents pour aborder la dimension énergétique des bâtiments et si oui, que peuvent-ils nous apprendre ? Nous proposons au chapitre 9 *Travailler avec des concepts propres à la complexité* l'exemple de l'application à la question énergétique des quatre principes du nouveau discours de la méthode proposé par Jean-Louis Le Moigne (Le Moigne, 1994). Cet exemple de réflexion reste cependant assez théorique et nous en dit peu sur l'application concrète du principe d'intégration de composantes. Cette application implique un travail d'identification des éléments à intégrer et de leurs relations, et une réflexion sur les méthodes d'intégration.

Concernant l'identification des éléments à intégrer, un travail doit être effectué à la fois vers l'intérieur, orienté vers la synthèse des multiples aspects

de l'énergie, et vers l'extérieur, orienté vers la liaison à d'autres aspects de l'architecture. Concrètement, d'une part, quelles propositions naissent de l'approche simultanée des différents aspects de la dimension énergétique (mesures passives et actives, énergie opérationnelle et grise, etc.), et d'autre part quelles propositions naissent d'une approche de la dimension énergétique au départ de son interaction avec d'autres dimensions de l'architecture ? Ces deux exercices sont effectués aux chapitres 10 *Synthétiser les sous-thématiques de l'énergie* et 11 *L'énergie parmi les autres dimensions de l'architecture*.

Parmi les éléments à intégrer, il en est un auquel nous donnons un statut particulier. Il s'agit de la piste 2.3 qui relève de la mise en question de la relation de l'homme à son environnement. Nous choisissons de ne pas considérer l'homme comme une dimension de l'architecture parmi les autres, mais comme prétexte premier de la conception architecturale. Le principe d'intégration, tout comme la vision actuelle de l'écologie suggère à l'architecture un rôle d'interface entre l'homme et l'environnement physique et culturel. Ce rôle peut-il être transposé à la dimension énergétique de l'architecture ? L'énergie peut-elle être vue comme un médium, comme une mise en évidence pour l'homme de la nature (l'énergie étant un élément physique) et de la culture (il s'agit d'un élément domestiqué, géré, objet de génie, et également d'un vecteur d'espoirs et de craintes relatifs à la viabilité de notre monde actuel) ? Que suggère un tel statut pour la dimension énergétique de l'architecture ? Ces questions sont discutées dans un chapitre spécifique (chapitre 12 *L'homme dans le monde par l'architecture*).

Enfin, une fois l'inventaire des éléments à intégrer réalisé, se pose la question de la façon de faire pratiquement cette intégration. La piste 5.3 identifie l'approche holistique comme piste de réflexion à ce sujet. Nous présentons au chapitre 13 *Adapter les méthodes de conception* des réflexions sur l'organisation pratique du travail de conception et les outils des concepteurs.

On voit que ce principe d'intégration est particulièrement porteur pour la question qui nous occupe et justifie à lui seul la structure de la troisième partie de cette thèse.

Principe d'équité inter et intragénérationnelle

La traduction de ce principe pour la question qui nous occupe revient à analyser les conséquences à court et moyen terme, ici et ailleurs, des dimensions énergétiques. Le chapitre 4 de la première partie peut être vu comme une application de ce principe, car il considère tant les questions de pauvreté

que d'épuisement des ressources et de risque climatique dans une approche à court ou moyen terme, que des considérations éthiques à long terme. Les éléments concrets mis en évidence dans ce chapitre étaient la nécessité de développer une pratique de rénovation à haute qualité énergétique pour répondre au changement climatique (piste 4.1), la nécessité d'une analyse spécifique de la situation particulière des personnes en précarité (piste 4.4), notamment dans le cadre de rénovations (piste 4.2), ainsi que la prévalence à donner aux matériaux biosourcés (piste 4.5) et aux sources d'énergie locales et non délocalisables (pistes 4.3 et 4.6). Dans la critique que nous faisons du standard *Passivhaus* (chapitre 6), nous mettons en évidence d'autres traductions de ce principe. Il s'agit de l'intégration du projet dans des échelles de temps (positionnement face aux questions de patrimoine et de flexibilité) et d'espace (intégration urbaine, définition d'indicateurs de sobriété spatiale).

Nous revenons sur ces éléments dans les chapitres 10 *Synthétiser les sous-thématiques de l'énergie* et 11 *L'énergie parmi les autres dimensions de l'architecture* qui explorent de façon systématique le décloisonnement de la pensée de l'énergie. En particulier :

- la question de la précarité est envisagée sous l'angle de la salubrité et de l'absence de ressources énergétiques (section 11.2), ainsi que sous l'angle de la contrainte économique (section 11.5) ;
- l'aspect patrimoine et rénovation est abordé brièvement à la section 11.3 ;
- la question des ressources matérielles est abordée aux sections 10.4 et 11.1.1 ;
- la question des formes d'énergie est discutée à la section 10.3 ;
- la question de flexibilité, qui relève également du principe de précaution, est abordée dans le chapitre 11.4.3 ;
- la dimension urbaine est discutée dans le chapitre 11.3.

A chaque fois, nous tentons d'identifier les conséquences des relations de ces éléments avec l'énergie. Seule la question des indicateurs est reportée à la section 13.3 traitant des méthodes de conception.

Principe de précaution et d'incertitude

Une logique de non-détermination du futur est une réponse évidente à ce principe : axer toute la pensée énergétique sur la capacité d'adaptation et de changement. A l'inverse de cette idée d'adaptation, nous pouvons chercher à minimiser les conséquences des changements extérieurs sur un objet plus sta-

tique, au travers de la notion de résilience. Nous revenons sur ces aspects dans la section 11.4.3 sur la flexibilité, déjà annoncé suite au principe d'équité.

Une autre réponse est de constater que le principe de précaution ne freine pas la prise de position, mais demande que toute prise de position soit basée sur une analyse rigoureuse des avantages et inconvénients des différents choix possibles, ainsi que des capacités à effectivement réaliser ces avantages tout en minimisant les inconvénients. Ces deux aspects relèvent de l'analyse et de la gestion du risque, deux domaines qui ont été théorisés dans différentes disciplines (ingénierie et management notamment). Nous analysons les enseignements que nous pouvons tirer de ces domaines dans le chapitre 13 *Adapter les méthodes de conception*. En particulier, nous discutons dans la section 13.1.4 de notre capacité limitée à anticiper une performance réelle dans des contextes dynamiques, ce qui fait écho à la piste 4.1 appelant à anticiper le changement climatique.

Principe de responsabilité commune mais différenciée

Le caractère humain des questions énergétiques et la complexité qui y est associée a été mis en évidence (piste 5.1) : l'architecte n'est pas le seul intervenant de la conception et production de bâtiments, et le rôle de l'habitant est fondamental par rapport à la réalité des performances énergétiques. Les responsabilités étant différenciées entre intervenants, il convient d'identifier leur distribution et leur nature aux différentes étapes de la vie d'un bâtiment. Cette identification peut aider à dégager des méthodes de travail favorisant la prise de responsabilité de chaque acteur. Cette idée de partage de responsabilité intervient à plusieurs reprises dans les chapitres suivants, soit comme objet direct de la discussion (section 13.2), soit comme principe directeur (section 11.6).

Principe de participation

Le principe de participation est à double sens. Au-delà de la participation des habitants ou riverains à l'élaboration du projet, il faut également considérer la participation du projet à la transformation de l'homme, comme indiqué par la piste 1.1. L'aspect participation au projet est abordé dans le chapitre 13 *Adapter les méthodes de conception*. L'idée que le projet d'architecture est un élément participant à la relation entre l'homme et son milieu est développée au chapitre 12 *L'homme dans le monde par l'architecture*.

Chapitre 9

Travailler avec des concepts propres à la complexité

Nous avons montré que la question de la qualité énergétique des bâtiments était complexe dans la mesure où elle intégrait le comportement humain. Il s'agit tant du comportement de l'habitant que de celui des concepteurs et constructeurs. Dès lors, les outils proposés par la théorie de la complexité peuvent *a priori* avoir une certaine pertinence pour réfléchir aux questions d'énergie du bâtiment, et plus largement de soutenabilité de l'architecture. Un des outils de base de la complexité est le nouveau discours de la méthode proposé par Jean-Louis Le Moigne (Le Moigne, 1994). Ce discours s'articule autour de quatre principes complémentaires aux principes fondateurs du discours de la méthode de René Descartes (Descartes, 1637). Nous proposons dans ce chapitre de parcourir ces quatre principes, sans nous attarder sur leur justification, et de chercher des échos possibles dans la réflexion sur la durabilité de l'architecture. Cet exercice original est réalisé en vue de mettre en lumière certains éléments féconds pour la pratique et la réflexion sur l'architecture soutenable et sa composante énergétique. Une grande partie des éléments de ce chapitre a fait l'objet d'une publication en conférence, dans le cadre de Systemica 2011 (van Moeseke, 2011a).

Pour clarifier la compréhension des quatre principes que propose Jean-Louis Le Moigne, nous réalisons d'abord un détour par les principes originaux de René Descartes. Le discours cartésien sur la méthode, bien que probablement rarement lu dans le texte, imprègne en profondeur l'approche scientifique actuelle. Il tient en quatre principes.

Le premier, appelé principe *d'évidence*, est celui de la primauté de la raison sur le savoir acquis, du libre examen sur l'autorité. Il justifie le scepti-

cisme scientifique : "ne recevoir jamais aucune chose pour vraie, que je ne la connusse évidemment être telle" (Descartes, 1637).

Le deuxième principe est dit *réductionniste*. Il postule que la compréhension viendra de la dissociation des problèmes en unités simples analysables. De là, la division en disciplines scientifiques supposées autonomes : "[...] diviser chacune des difficultés que j'examinerais, en autant de parcelles qu'il se pourrait, et qu'il serait requis pour les mieux résoudre" (Descartes, 1637).

Le troisième principe, lié au précédent, est dit *causaliste* et pose la capacité de construire une connaissance globale sur la somme des parties précédemment dissociées, ce qui présuppose l'existence d'une structure d'association des éléments simples, structure que le scientifique se devrait de dégager : "conduire par ordre mes pensées, en commençant par les objets les plus simples et les plus aisés à connaître, pour monter peu à peu, comme par degrés, jusqu'à la connaissance des plus composés" (Descartes, 1637).

Enfin, le quatrième principe, dit *d'exhaustivité*, balise la méthode et d'une certaine façon conditionne sa bonne application au fait de "[...] faire partout des dénombrements si entiers et des revues si générales que je fusse assuré de ne rien omettre" (Descartes, 1637).

En résumé, la démarche cartésienne stipule qu'en se basant sur la seule raison, et en examinant la totalité des hypothèses, il est possible d'atteindre toute connaissance de problèmes par l'examen des sous-problèmes et l'identification de leur structure d'association. Cette méthode a fait ses preuves au long des siècles, tant dans les domaines techniques que des connaissances fondamentales. Elle n'en est pas moins critiquée aujourd'hui, non pour son inexactitude ou inefficience, mais pour ses limitations.

9.1 Principe de pertinence

En réaction au principe d'évidence, Jean-Louis Le Moigne propose un principe de pertinence :

> "Convenir que tout objet que nous considérons se définit par rapport aux intentions implicites ou explicites du modélisateur. Ne jamais s'interdire de mettre en doute cette définition si, nos intentions se modifiant, la perception que nous avions de cet objet se modifie. " (Le Moigne, 1994)

Ce nouveau principe expose que la vérité est une notion relative. Notre intelligence, moteur de la raison, est motivée par une finalité qui enserre ce qui apparait comme la vérité. L'intelligence est influencée par le prisme de nos limites émotionnelles, sensorielles, corporelles, technologiques. La pertinence consiste à ne jamais s'interdire de mettre en doute une définition si, nos intentions se modifiant, le regard porté sur un problème ou une vérité se modifie. Ce qui était vrai hier peut ne plus l'être aujourd'hui.

De ce principe, deux questions peuvent émerger : quelles sont donc les intentions actuelles liées au développement durable, et qu'est-il pertinent de remettre en cause ?

9.1.1 Identifier les intentions

La question de l'intention est particulièrement pertinente pour la pensée écologique. Ce tournant de siècle, présenté comme le commencement d'une nouvelle ère écologique (Morin, 2004) (Morin, 2007) est précisément caractérisé par une modification des intentions. Nous ne nous trouvons pas dans une transformation visant un *mieux de la même chose* mais un *autre chose*. Il s'agit au minimum de la volonté de prise en compte de dimensions environnementales nouvelles, qui forcément modifient les grilles de lecture traditionnelles, et au maximum d'une volonté de modification complète du rapport au monde. Que le niveau de changement amené par la donne écologique se révèle in fine minimal ou maximal, l'intention globale de la société, le paradigme, aura changé. En vertu du principe de pertinence, tout notre référentiel de définitions et d'échelles de valeurs, y compris architecturales devrait accompagner ce changement. A ce titre, le concept même d'architecture durable ou soutenable est critiquable. Postulons que l'intention globale actuelle est d'atteindre un état de soutenabilité de nos sociétés, et considérons que la qualité d'un projet d'architecture se mesure au moins en partie à l'échelle de sa pertinence culturelle. L'architecture se doit dès lors de prendre position par rapport à cette nouvelle intention, l'architecte doit se positionner dans son projet par rapport aux paradigmes de son temps. Or, pour que cette intégration soit réellement pertinente, il ne suffit pas de juxtaposer des technologies à un projet conçu en-dehors de cette question. La dimension environnementale devrait devenir un moteur de conception, comme l'essor industriel en fut un au début du XX^{e} siècle.

Le principe de pertinence nous renforce donc dans l'idée qu'il ne s'agit pas de caractériser l'architecture, de lui adjoindre une épithète durable, soutenable, verte ou écologique, aussi bien choisie soit-elle, mais de nourrir la discipline

architecturale elle-même par une traduction pertinente de l'objectif de soutenabilité. Nous considérons que la question de soutenabilité en architecture doit s'intégrer à la définition même de cette discipline, et non, comme elle le fait aujourd'hui, s'y juxtaposer comme qualificatif ou amendement, telle une piste d'étude facultative proposée à l'exploration aux architectes de bonne volonté.

Cette question de la finalité peut aussi se traduire par la question suivante : S'interroge-t-on sur la soutenabilité pour, entre autres, définir une nouvelle façon de faire de l'architecture, ou cherche-t-on à utiliser l'architecture pour faire du développement durable ? Cette dernière position, qui place l'architecture dans le champ politique, est notamment visible dans le travail de Carin Smuts (lauréate 2008 du Global Award for Sustainable architecture) dont les projets en Afrique du Sud sont pour une grande partie des prétextes au développement social et économique des communautés locales (Contal et Revedin, 2009) (Figure 9.1). A l'opposé, la première alternative dénote une approche plus centrée sur la discipline. On est tenté de rapprocher de cette position le travail d'un Philippe Samyn ou Stefan Behnisch (également lauréats de ce prix) pour lesquels c'est le changement de paradigme qui remet en cause leur façon de faire l'architecture.

FIGURE 9.1 – Dawid Klaaste Centre, Laingsburg, CS Studio Architects, 2005. "For Carin Smuts, people are paramount when it comes to sustainable architecture. She believes that sustainability is an integrative and engaging process that focuses on a simple concep : Local - local material, local details, local people and local labour." (Photo ©Carin Smuts et citation : www.designmind.co.za)

Appliquée à la question énergétique, la question de clarification des intentions mérite également d'être posée. Elle permet en effet de mettre en évidence des objectifs multiples et de mettre en perspective le souci très souvent mis en avant de réduction de l'impact environnemental. Sur base du chapitre 4, nous pointons les objectifs listés ci-dessous, auxquels toute proposition dans le domaine de l'énergie devra apporter une réponse :

1. résoudre et prévenir les conséquences de la précarité énergétique ;
2. se détourner des ressources épuisables ;
3. limiter les conséquences environnementales de la consommation d'énergie.

9.1.2 Remettre en cause

La question de la remise en cause, quant à elle, ne s'applique pas qu'à la discipline architecturale elle-même. Le bagage de construction basse énergie, défini en grande partie dans les années 1970 et 1980, autour, par exemple, des concepts bioclimatiques, doit également être remis en cause. Les principes d'organisation spatiale proposés, les modes constructifs encouragés avec comme finalité la maitrise des consommations énergétiques et la valorisation de la relation homme-climat, sont-ils encore pertinents au regard de l'évolution des connaissances et des nouveaux objectifs de soutenabilité ? Méthodologiquement, la remise en cause de cet acquis passe par la définition de nouveaux indicateurs de pertinence. Ce travail est actuellement en cours pour les aspects énergétiques. Pointons, par exemple, le glissement de l'objectif de réduction de la consommation énergétique à celui de la réduction de consommation d'énergie primaires et d'exergie (Sakulpipatsin, 2008). Un travail semblable se fait autour de la dimension matérielle, comme le montre la multiplication des indicateurs d'impact environnemental sur le cycle de vie (ISO, 1997).

Mettons ici en avant le danger d'oubli lié à un changement d'indicateur. La réévaluation d'un principe précédemment acquis sur base d'une grille de lecture neuve ne devrait être appliquée que pour autant que la nouvelle grille complète tout en reprenant intégralement l'échelle de mesure précédente. Tout abandon ou transformation d'un indicateur se doit d'être rigoureusement justifié. Illustrons ce risque par l'exemple suivant : la volonté actuelle majeure est la maîtrise totale des émissions polluantes. Celle-ci rend caduques les systèmes de ventilation naturelle hygiénique, dont la performance énergétique est moindre que celle de leurs homologues mécaniques, qui intègrent des possibilités de récupération d'énergie. Cependant, ces techniques de ventilation furent initialement proposées pour assurer la salubrité des logements, et non dans

une démarche énergétique. Méthodologiquement, l'évaluation des ventilations mécanisées se devrait donc d'intégrer cette dimension sanitaire. Cela n'a pas toujours été le cas, comme en témoigne le constat de risques sanitaires directement liés à des installations de ventilation mécanique (Duijm *et al.*, 2007).

Nous discutons le choix des indicateurs d'évaluation dans le chapitre 13 portant sur les questions méthodologiques. Signalons uniquement ici que si l'idée d'une remise en cause de l'acquis soutient le développement de nouveaux indicateurs, le principe de pertinence voudrait que cette remise en cause soit systématique. La question de l'intention et de la pertinence de l'indicateur par rapport à cette intention devrait être reposée à chaque projet. L'on peut supposer que l'intention proposée au paragraphe précédent relève du paradigme et n'évoluera que lentement. L'indicateur par contre est confronté à une multiplicité de questions et d'influences (type de programme, méthode de calcul, cohérence avec des normes existantes...) qui conditionnent sa pertinence. Typiquement, nous avons montré dans le chapitre 6 que la transposition en Belgique des indicateurs énergétiques du standard *Passivhaus* était critiquable du fait de différences réglementaires au niveau de la ventilation et de variations climatiques. Nous avons aussi montré que l'affectation des locaux remettait également en cause ces indicateurs.

Le principe de pertinence, appliqué à la question de la soutenabilité de l'architecture, soutient donc le double constat que cette question ne relève pas de la correction marginale de pratiques constructives mais directement de la pertinence culturelle du projet, et que l'ensemble du discours hérité des approches énergétiques et climatiques antérieures doit être réactualisé à la lumière de la notion de soutenabilité. Ceci vient conforter le propos et la méthode proposés dans cette thèse. Ces deux objectifs ne pourront être atteints que si une échelle de mesure adéquate, cohérente avec l'objectif peut être créée.

9.2 Principe de globalisme

En réaction au principe réductionniste, Jean-Louis Le Moigne propose un principe de globalisme :

> "Considérer toujours l'objet à connaître par notre intelligence comme une partie immergée et active au sein d'un plus grand tout. Le percevoir d'abord globalement, dans sa relation fonctionnelle avec son environnement sans se soucier outre mesure d'établir une image fidèle de sa structure interne, dont l'existence et l'unicité ne seront jamais tenues pour acquises. " (Le Moigne, 1994)

Ce principe propose de faire de l'intelligence de l'environnement de l'objet la condition de notre connaissance de cet objet. Il est évident que le discours sur la soutenabilité de l'architecture est d'abord un discours sur la relation de l'élément bâti avec son contexte. Cependant, le principe de globalisme ne nous suggère pas seulement l'inclusion du contexte dans l'étude d'un objet, mais également l'étude d'un objet au travers de son contexte. L'application de ce principe à la question de soutenabilité de l'architecture nécessité l'identification des objets et de leur environnement.

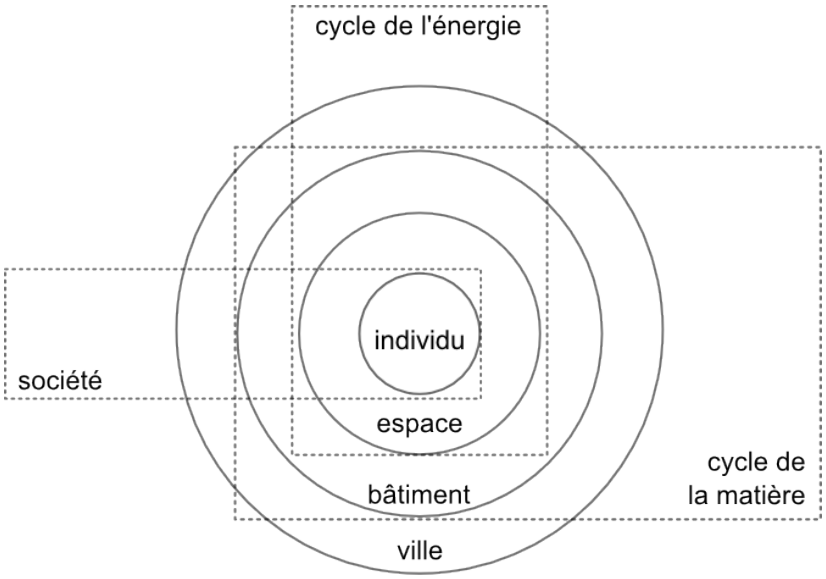


FIGURE 9.2 – Propositions de paires objet-environnement pour l'application du principe globaliste

Nous proposons à titre d'exemple dans la figure 9.2 une décomposition simple de l'architecture en objets d'échelles différentes. Cahque objet est lié à un élément de contexte spécifique lié à la question environnementale. Pour chaque paire objet-environnement identifiée, l'application du principe globaliste sous la forme d'une interrogation au départ de l'environnement permet de dégager des questions particulières, notamment :

– *Qu'est ce que le cycle de la matière dans sa déclinaison locale suggère comme mode constructif ?* qui prend la place de la question traditionnelle formulée sous la forme *quel est l'impact environnemental des matériaux mis en œuvre ?* La réponse suggérée par la reformulation est l'analyse des ressources locales en matériaux et systèmes et l'invention de leur utilisation possible, plutôt que l'importation d'éléments

extérieurs à faible écobilan. Sur base de la description qu'en donnent Marie-Hélène Contal et Jana Revedin, il semble que le travail du bureau américain Rural Studio correspond assez bien à une telle démarche .

- *Qu'est-ce que la connaissance du cycle de l'énergie suggère comme démarche à l'échelle des espaces ?* qui remplace la question de la réduction des consommations énergétiques. On retrouve là une démarche de l'architecture climatique de traduction des phénomènes physiques en espaces (serres, tampons, etc.), ainsi que la question actuelle des *smart-grids* qui pourrait dicter aux bâtiments des comportements énergétiques particuliers. Cette attitude est opposée à une approche uniquement programmatique qui laisserait la traduction d'ambition énergétique aux soins des seuls paramètres constructifs. L'intention du travail actuel de Philippe Rahm, par exemple son projet "Interior gulf stream" peut être vue comme une traduction assez littérale de cette création d'espaces au-départ des phénomènes physiques (voir figure 9.3).
- *Qu'est-ce que la connaissance de la société suggère sur le rôle d'un individu dans un bâtiment ?* qui s'oppose à la question du comportement souhaité de l'habitant. Typiquement, cette question invite à étudier les comportements des habitants face aux techniques et dispositifs architecturaux ainsi que l'acceptabilité de ceux-ci. Forts de cette connaissance, nous pouvons envisager une conception incluant l'habitant. Pour répondre à cette invitation, des études dites de *post occupancy evaluation* sont de plus en plus souvent menées et mériteraient probablement une généralisation.

On le voit, ces trois questions ne suggèrent pas des propositions originales, dans la mesure où elles peuvent être attachées à des pratiques existantes. Celles-ci sont cependant marginales face à la masse de développements liés aux analyses de cycle de vie, au développement de bâtiments basse énergie et au développement de recommandations comportementales. Les trois exemples donnés montrent la créativité qui peut émerger d'un travail d'analyse du contexte. Nous souhaitons insister sur le terme *analyse*, et pas uniquement *prise en compte*. L'analyse implique une recherche de compréhension de ce qu'est le contexte particulier du projet, de ce qu'il peut générer, quand une simple prise en compte se limite souvent à l'examen des conséquences du projet sur le contexte. Ce faisant, il est peu probable qu'une richesse particulière puisse être identifiée. Nous arrivons donc à l'idée qu'une approche soutenable de l'énergie en architecture doit se baser sur une analyse du contexte climatique, social et industriel préalable à la conception, pour permettre la valorisation des ressources et propriétés du contexte particulier du projet.

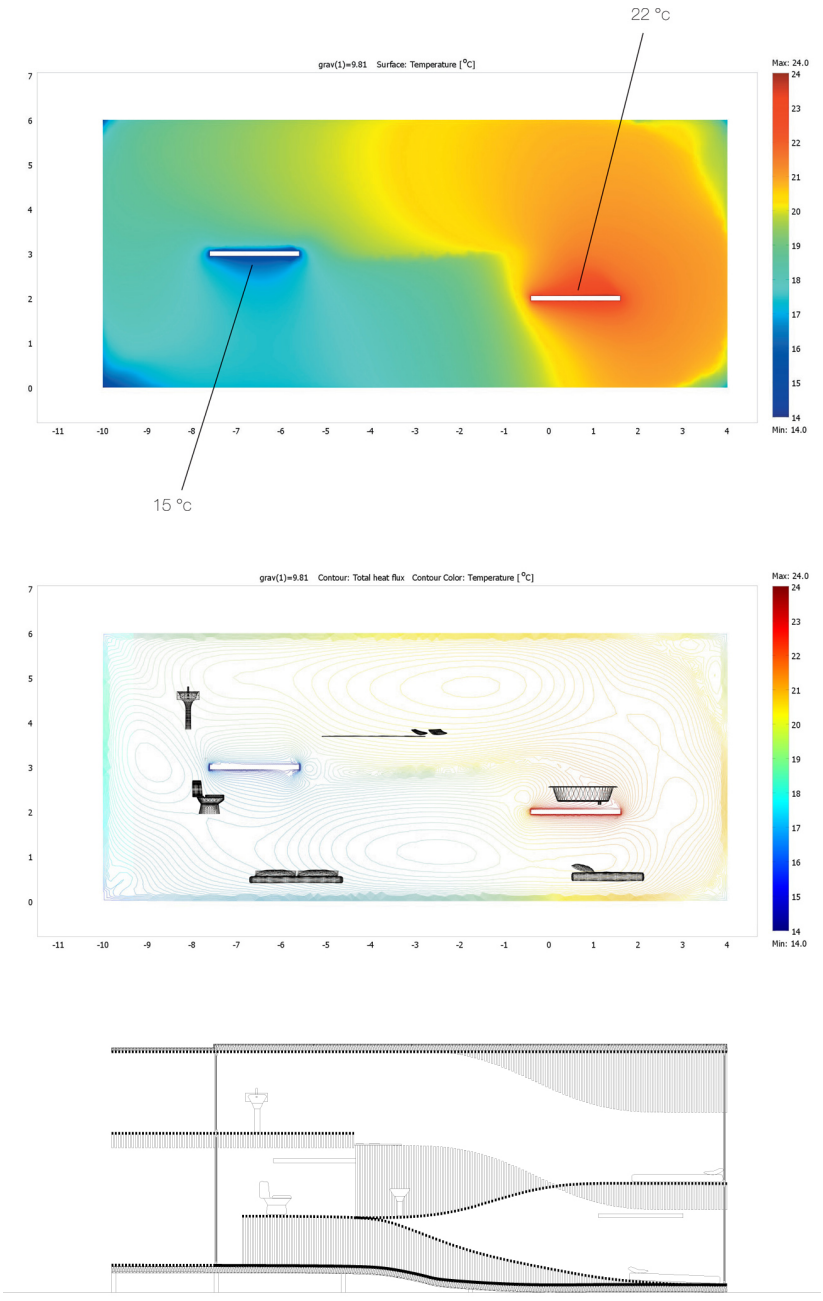


FIGURE 9.3 – Interior gulf stream - Logement et studio pour Dominique Gonzalez-Foerster, Paris, Philippe Rahm, 2008 (photo : www.philipperahm.com). L'agencement des espaces suit, pour le concepteur, les mouvements de convection et les gradients thermiques générés par deux plans, l'un chauffé à 22°C, l'autre refroidit à 15°C. Dessins ©Philippe Rahm.

9.3 Principe téléologique

En réaction au principe causaliste, Jean-Louis Le Moigne propose un principe téléologique :

> "Interpréter non pas l'objet en lui-même, mais par son comportement, sans chercher à expliquer *a priori* ce comportement par quelque loi impliquée dans une éventuelle structure. Comprendre en revanche ce comportement et les ressources qu'il mobilise par rapport aux projets que, librement, le modélisateur attribue à l'objet. Tenir l'identification de ces hypothétiques projets pour un acte rationnel de l'intelligence et convenir que leur démonstration sera bien rarement possible ". (Le Moigne, 1994)

Ce principe propose de ne pas présupposer l'existence d'une structure de cause à effet déterminante dans le comportement des objets d'étude, partant du principe que "nous observons tous les jours que les mêmes causes n'entraînent pas toujours les mêmes effets" (Le Moigne, 1994). Une application du principe téléologique est celle de l'étude de l'architecture soutenable et de sa dimension énergétique non par la théorie mais par l'exemple. Souvent, l'enseignement de l'architecture basse énergie passe par l'apprentissage premier des principes physiques théoriques, lesquels sont par la suite utilisés pour justifier des stratégies de conception, dans un processus analytique. Le projet d'architecture n'intervient que tardivement dans ce processus, comme s'il résultait de l'analyse théorique. Or, la démarche inverse serait possible : un apprentissage de la physique par l'analyse du comportement effectif des bâtiments dans leur environnement humain et climatique. Cette approche correspond d'ailleurs mieux à l'histoire des théories bioclimatiques qui se sont fondées en grande partie sur l'observation de modèles vernaculaires. Elle permet en outre d'intégrer dès l'origine la complexité des contextes et le caractère multidimensionnel du projet, même limité à sa composante énergétique. La performance énergétique dépend en effet des choix de conception, de la qualité de mise en œuvre, de la cohérence des choix avec le mode de vie, etc. Cette approche place l'objet entier, élément réactif d'un système qui le dépasse, comme porte d'entrée vers la connaissance de cet objet. Au-delà de l'enseignement, on peut également remarquer les appels de plus en plus pressants à une concentration des efforts sur le suivi de bâtiments en usage plutôt que sur leur conception. De multiples exemples de conception avec un accent marqué sur les aspects énergétiques ruinés par un usage inadéquat rappellent que le bâtiment reste un projet tout au long de son existence. Deux tâches de l'Agence Internationale de l'Energie (Annexes 40 et 47 de l'ECBCS) se sont notamment attelées à la définition de méthodes de *commissioning* des bâtiments (Visier et Jandon, 2004).

9.4 Principe d'agrégativité

Enfin, en réaction au principe d'exhaustivité, Jean-Louis Le Moigne propose un principe d'agrégativité :

> "Convenir que toute représentation est partisane, non pas par oubli du modélisateur, mais délibérément. Chercher en conséquence quelques recettes susceptibles de guider la sélection d'agrégats tenus pour pertinents et exclure l'illusoire objectivité d'un recensement exhaustif des éléments à considérer. " (Le Moigne, 1994)

Ce principe assume nos capacités limitées de compréhension. Partant de l'idée que l'on ne peut "faire partout des dénombrements si entiers et des revues si générales que nous soyons assurés de ne rien omettre", il convient de chercher à définir des objets identifiables, les agrégats dont nous nous attelons à définir le comportement au sein du système sans maîtriser nécessairement l'ensemble des logiques internes.

Ce principe reflète assez justement une tendance actuelle dans l'évolution des outils de modélisation mathématique des bâtiments. Ces outils cherchent progressivement à intégrer une modélisation correcte du comportement des occupants en fonction des conditions en question. Or, nul ne prétendrait expliquer exhaustivement le comportement des occupants, et encore moins démontrer que ce comportement est entièrement déterminé par des paramètres microclimatiques. D'où la tendance actuelle à intégrer le comportement humain sur base de modèles probabilistes ou liés aux techniques d'intelligence artificielle. Ces démarches ont en commun le fait de chercher à décrire sans expliquer la relation entre une ambiance et un comportement. Toutes deux proposent des outils de reproduction relativement fidèles de ce comportement non expliqué (Rijal *et al.*, 2007; Santamouris, 2007). Il nous semble qu'il s'agit là d'une démarche d'assimilation du groupe d'occupants à un objet dont le comportement est décrit mais la logique interne non explicitée.

Un autre exemple d'agrégat peut être, pour l'architecte, un indicateur de performance énergétique, tel que le niveau E actuellement utilisé pour représenter la consommation d'énergie primaire relative global du projet. Derrière cette valeur se trouvent synthétisés les principaux paramètres physiques liés aux problématiques de consommations d'énergie pour le maintien d'ambiances intérieures. Le détail des relations entre ces paramètres, bien que parfaitement accessible dans la mesure où il s'agit d'un modèle mathématique simple, ne doit pas nécessairement être connu du concepteur, d'autant moins s'il ne réalise pas lui-même son évaluation. Cet indicateur de performance

constitue donc un agrégat lui permettant d'intégrer une performance globale dans son travail de conception. Si la non compréhension des structures mathématiques de cet indicateur est dommageable, car elle prive le concepteur d'une maîtrise complète de la performance du projet, la lourdeur de l'évaluation est telle qu'il est illusoire de penser que, outre quelques spécialistes, un concepteur puisse maîtriser parfaitement cette évaluation. On se trouve donc face à une agrégation partielle de fait, dont seule quelques propriétés sont maîtrisées par l'architecte.

Ce principe d'agrégativité semble donc décrire des réalités méthodologiques déjà en place. Il est cependant utile de relever que l'agrégation n'est pas sans risque, et qu'une connaissance de la façon dont l'agrégat a été défini est nécessaire à sa bonne utilisation.

9.5 Conclusion - éléments d'une approche soutenable

Dans ce chapitre, nous sommes parti des quatre principes méthodologiques de Jean-Louis Le Moigne pour interroger la notion de soutenabilité de l'architecture et sa dimension énergétique. Ces quatre principes sont pris comme exemples des outils proposés par la théorie de la complexité et n'épuisent pas l'apport potentiel de ces théories. Leur application esquissée ici démontre la capacité de ces principes épistémologiques à générer des idées originales dans le domaine qui nous occupe. En particulier, nous avons dégagé les idées suivantes :

- ces principes nous poussent à clarifier les intentions des démarches de performance énergétique ;
- ils suggèrent l'évaluation des diverses performances et qualités par des indicateurs relatifs plutôt qu'absolus, dont les référents reflètent les intentions de la démarche ;
- ils suggèrent une analyse concrète des contextes microclimatiques, économiques et sociaux comme base préalable à l'invention du projet, plutôt qu'une simple évaluation des conséquences du projet ou qu'une prise en compte théorique d'un contexte supposé ;
- ils suggèrent une méthode de recherche et d'enseignement basée sur l'analyse d'objets dans leur contexte, et non une vision uniquement théorique et analytique ;
- ils mettent en évidence une tendance actuelle à la constitution d'agrégats, éléments utilisables d'un modèle général mais dont les propriétés intrinsèques sont peu comprises.

Forts de cet exemple, nous pensons pouvoir affirmer que si la physique du bâtiment a permis de comprendre les mécanismes physiques des flux d'énergie dans les bâtiments, il est intéressant désormais de recourir à d'autres approches pour définir adéquatement ce que nous souhaitons faire de cette connaissance et de quelle façon l'utiliser. La physique du bâtiment n'est donc à l'évidence plus la seule façon de progresser dans la compréhension et maîtrise des flux d'énergie dans le bâtiment.

Chapitre 10

Synthétiser les sous-thématiques de l'énergie

L'idée de décloisonnement de la réflexion sur l'énergie nous semble une des plus porteuses de renouveau dans notre réflexion. Elle constitue la deuxième application concrète du principe d'intégration des composantes, après l'analyse de la complexité ébauchée au chapitre 9. Ce décloisonnement peut être interne ou externe, tourné vers les multiples sous-thématiques de la question ou vers des questions connexes. L'analyse des sous-thématiques de l'énergie implique un travail en deux temps. Il faut d'abord réaliser un inventaire de ces sous-thèmes pour ensuite en proposer une critique ouvrant sur une alternative. Nous reprenons dans ce chapitre cette structure en deux temps. L'inventaire réalisé est basé sur les distinctions rencontrées dans la littérature. La critique qui en est faite est par contre originale.

10.1 Inventaire des sous-thématiques

Nous rassemblons ici les différentes divisions en sous-thématiques rencontrées dans les discours et pratiques qui dominent dans le domaine de la performance énergétique. Nous reprenons donc des éléments mis en évidence au chapitre 5 lors de l'analyse du caractère systémique et complexe de ce domaine. Nous identifions trois sous-thématiques structurées comme autant d'oppositions : la distinction entre besoins et consommations pour différents postes, la distinction entre mesures passives et actives et celle entre énergie grise et opérationnelle.

Les procédures de calcul des bilans énergétiques des bâtiments se basent sur une distinction entre des usages différents (chauffage, ECS, refroidisse-

ment, éclairage, auxiliaires électriques (CEN, 2007b) - on pourrait ajouter les applications domestiques, les transports de personnes, les équipements de sécurité, etc.). Elles considèrent également, pour chacun de ces usages, une distinction entre besoin net, besoin brut, consommation finale et consommation primaire d'énergie (Ministère de la Région de Bruxelles-Capitale, 2007). Ces différents usages sont considérés de manière indépendante. Ce n'est qu'au niveau de la consommation d'énergie primaire qu'une synthèse par addition est proposée. Cette consommation totale est alors utilisée comme mesure de la qualité énergétique des bâtiments. Cette mesure fait généralement assez peu de cas de la méthode utilisée pour réduire cette consommation. Les réglementations basées sur cette logique sont néanmoins parfois assorties d'exigences intermédiaires complémentaires à l'objectif global. C'est le cas notamment de l'approche proposée par la directive PEB et du standard *Passivhaus*. Enfin, ce découpage de la question énergétique laisse une place à la production d'énergie renouvelable comme moyen de compensation des consommations primaires ou de diminution des consommations finales (Kurnitski *et al.*, 2011).

Partant de la même distinction entre besoins et consommations, diverses approches telles que la Trias Energica ou négaWatt proposent une classification des priorités d'action en trois niveaux : La Trias postule qu'il faut d'abord réduire les besoins, puis rencontrer les besoins résiduels par des énergies renouvelables, et en dernier recours par l'utilisation la plus propre possible des énergies fossiles (Lysen, 1996). L'approche négaWatt met la même priorité sur la sobriété, mais propose l'efficacité de l'usage de l'énergie avant le développement des énergies renouvelables (association négaWatts, 2012). Ces approches offrent au concepteur des règles de travail claires allant dans le sens de la minimisation de l'impact environnemental, et mettent plus explicitement en évidence la différence entre différentes sources d'énergie (renouvelables ou non). Ces démarches rappellent la distinction souvent rencontrée entre des approches passives de réduction des besoins ou de valorisation des énergies renouvelables et des méthodes actives de transformation d'énergie renouvelable ou fossile. Cette distinction entre actif et passif est souvent faite en présentant les méthodes passives comme devant avoir la priorité, de par leur robustesse et leur faible impact énergétique. En mettant en avant la réduction du besoin, tant les coûts pour l'habitant que la pression sur les énergies de stock se trouvent réduites, ce qui offre une réponse intéressante aux enjeux de précarité énergétique et de raréfaction des ressources énergétiques pointés au chapitre 4. Le second accent mis sur les énergies renouvelables participe à la réduction de pression sur les ressources de stock, ce qui répond partiellement à l'appel au passage à une société *solaire* justifié éthiquement au chapitre 4. En architecture, ce type de prise de position mène à privilégier les mesures d'économie d'énergie, sans pour autant négliger la qualité des techniques HVAC. Une idée

implicite en architecture bioclimatique notamment est qu'il est absurde d'avoir des systèmes HVAC complexes qui ne servent pas. Les techniques HVAC sont dès lors vues comme des appoints nécessaires en conditions extrêmes, dont la simplicité et la réactivité aux carences de l'architecture doivent être développées.

Une autre distinction fréquemment rencontrée est celle qui existe entre d'une part l'énergie impliquée en phase de construction et de déconstruction (énergie grise) et d'autre par celle impliquée en phase d'exploitation (énergie opérationnelle). L'importance de la prise en compte de l'énergie grise a été démontrée par le constat de la part de plus en plus importante de ce poste dans le bilan énergétique global, comme illustré en figure 10.1. Cette importance est liée à la réduction des consommations d'énergie opérationnelle, à l'augmentation des quantités de certaines matières mises en œuvre (matériaux isolants thermiques notamment), à un changement des types de matériaux utilisés (augmentation de la part relative des métaux, produits verriers et produits de la chimie au détriment des matières minérales) et à une tendance à la réduction des durées de vie en œuvre des composants. Dès lors se multiplient les études visant à établir et comparer le bilan en énergie grise de modes constructifs offrant des performances techniques équivalentes. Sophie Trachte *et al.* ont de cette façon montré le non-sens énergétique que constitue une construction selon les règles du standard *Passivhaus* qui ne se baserait pas sur un mode de construction limitant la consommation d'énergie grise (Trachte et Massart, 2011). Cette prise en compte de l'énergie grise pourrait à première vue être de nature à répondre à l'enjeu pointé au chapitre 4 de recours maximal aux matériaux biosourcés, abondants ou recyclés, selon l'idée que ces matériaux auront l'impact en énergie grise le plus bas. Ce n'est cependant pas nécessairement le cas. Il est aussi nécessaire de considérer les autres impacts de l'exploitation d'une matière, tels que la pression sur les ressources hydriques ou sur les paysages.

10.2 Critique de ces subdivisions

10.2.1 De la production et consommation d'énergie à sa transformation

Premièrement, la distinction entre consommation et production d'énergie constitue un raccourci de langage qui n'est pas correct du point de vue thermodynamique. En vertu du premier principe de thermodynamique, il ne peut y avoir ni création ni destruction d'énergie au sein d'un système, mais seulement des transformations de la forme de l'énergie. Si l'on peut parler de besoin

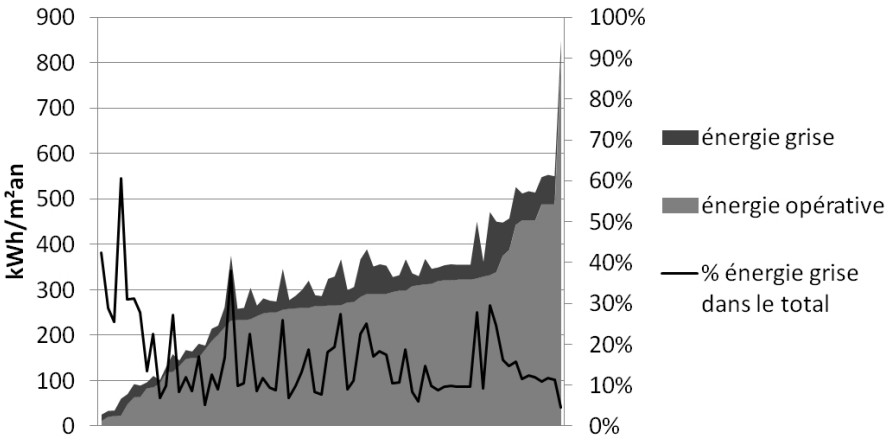


FIGURE 10.1 – Part de l'énergie grise dans le bilan énergétique. Figure construite sur base des résultats de Talakonukula Ramesh *et al.* (Ramesh *et al.*, 2010)

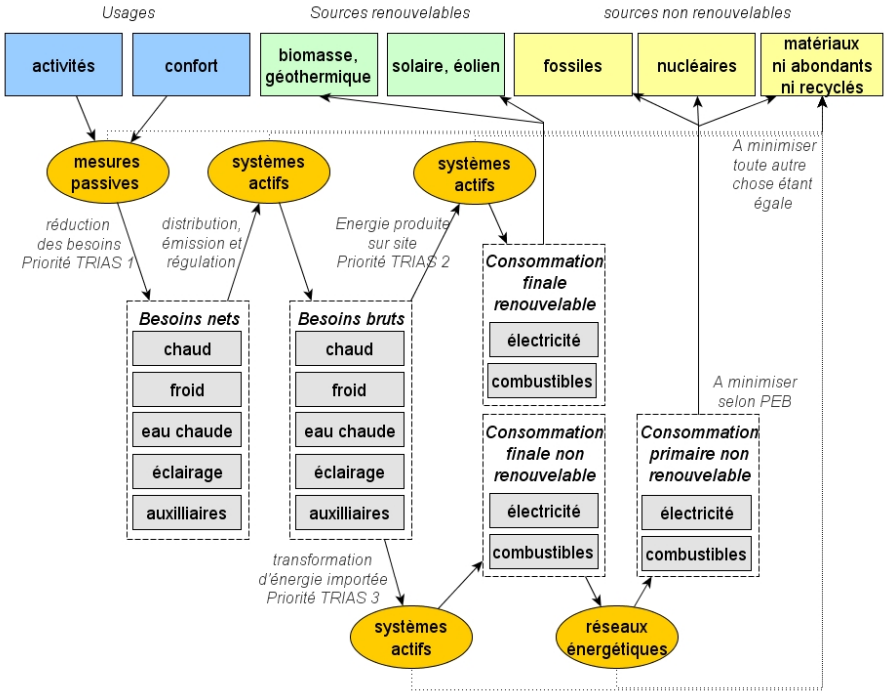


FIGURE 10.2 – Organigramme des sous-thématiques de l'énergie, sur base des décompositions usuelles

d'énergie pour un certain usage, il est incorrect de parler de consommation. Seule existe la transformation d'une quantité d'énergie disponible sous une forme inadéquate vers une forme adéquate au regard de l'usage qui lui est réservé, ou le transfert d'une quantité d'énergie disponible sous une forme déjà adéquate mais en un temps (stockage) ou lieu (transfert) différent.

Toute transformation ou transfert d'énergie est réalisé avec un équipement ou un processus imparfait. Nous pouvons dès lors utiliser le rendement pour caractériser la transformation de l'énergie, si nous le considérons d'une façon plus large que celle habituellement rencontrée. Le rendement est le rapport entre d'une part la quantité d'énergie transformée et utilisable et d'autre part la quantité totale d'énergie impliquée par la transformation. Nous illustrons cette notion par un exemple dans la figure 10.3 page 162.

Le rendement n'est cependant pas suffisant pour caractériser la relation entre énergie désirée et énergie utilisée, car il ne dit rien sur l'adéquation entre la nature de la source et la nature du besoin. La réalisation du bilan en énergie primaire ne répond que partiellement à cette carence. Elle permet en effet de différencier la nature de différentes sources d'énergie, mais pas la nature du besoin. Considérons l'exemple suivant : 1 kWh électrique (soit 2.5 kWh primaires en Belgique) peut être utilisé pour faire fonctionner une application électronique, avec un rendement de cette application proche de 100 %. Ce même kWh peut être utilisé pour réaliser le chauffage d'un local par effet joule, ici aussi avec un rendement proche de 100 %. Dans les deux cas, le rendement global en énergie primaire sera 1/2.5=40 %. Or, les deux applications sont différentes, et d'autres sources d'énergie auraient pu être trouvées pour le chauffage, dont le rendement primaire aurait été meilleur. En outre, l'énergie électrique utilisée pour l'application électronique s'y trouve transformée en chaleur. Elle répond dès lors potentiellement à un double usage.

Cette différence d'usage peut être prise en compte par la notion thermodynamique d'exergie. L'exergie est la quantité de travail mécanique total disponible au départ d'une quantité d'énergie. Au contraire de l'énergie totale qui est conservée lors d'une transformation, l'exergie est inévitablement réduite. Cette réduction tient pour les phénomènes thermiques à la réduction de la différence d'enthalpie entre la forme d'énergie et l'environnement : dans un environnement donné, l'exergie d'une quantité d'énergie sera nulle quand cette différence d'enthalpie sera nulle, et à l'augmentation d'entropie liée à la transformation.

Nous dédicaçons la section 10.3 à une analyse plus poussée de l'exergie. Retenons ici que cette notion permet de caractériser la valeur relative

d'une forme d'énergie, à savoir son potentiel d'utilisation au regard d'une application particulière. Rahman Saidur par exemple démontre sur base d'analyses exergétiques que l'utilisation thermique de l'énergie solaire est peu efficace comparativement à d'autres formes de production de chaleur (la géothermique par exemple) et à d'autres usages de l'énergie solaire (photovoltaïque par exemple), du fait d'une différence importante entre la qualité exergétique du rayonnement solaire, qui offre un grand potentiel d'applications et la basse qualité exergétique de l'eau chaude (Saidur *et al.*, 2012). L'intérêt de l'exergie pour les questions d'énergie dans le bâtiment nous semble être le fait que cette notion permet de valoriser des sources d'énergie locales et non transportables mise en avant au chapitre 4.2. De telles sources sont en effet *à basse exergie*.

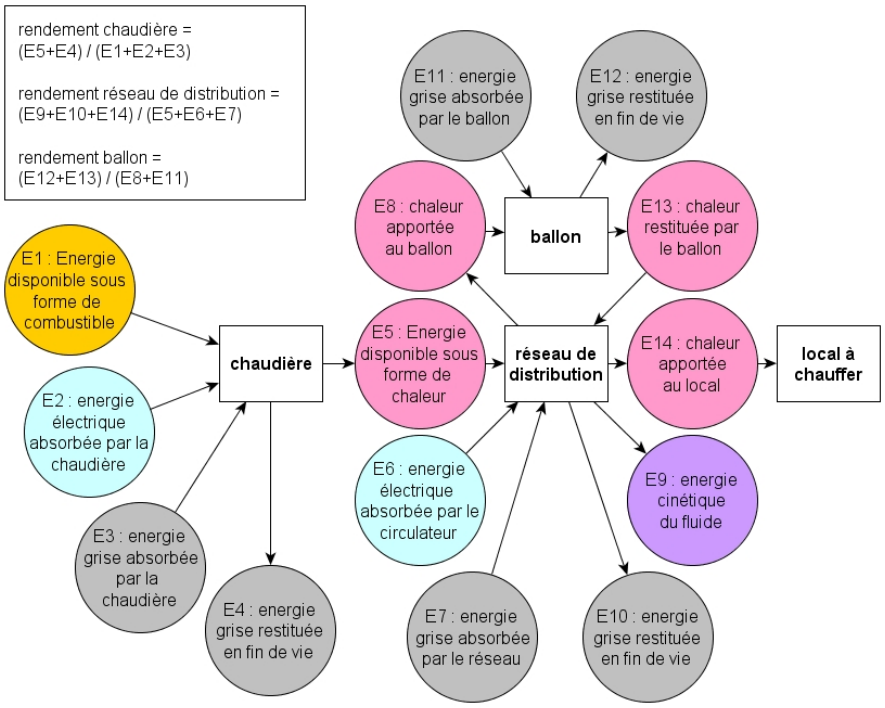


FIGURE 10.3 – Illustration de la notion de rendement étendue pour une application de chauffage

10.2.2 Des systèmes actifs et passifs aux dispositifs spatiaux et technologiques

La distinction entre systèmes actifs et passifs doit être remise en question une fois intégrée la notion d'énergie grise. Un grand nombre de mesures dites passives impliquent une mise en œuvre de matières (isolation, augmentation de la masse thermique, ajout d'une serre ou d'une protection solaire...). Elles nécessitent donc une utilisation d'énergie pour réaliser l'objectif souhaité. La prévalence de ces systèmes passifs sur les systèmes actifs ne vaut donc que si le bilan complet sur le cycle de vie des deux types de dispositifs est en faveur du passif. Ce type de réflexion a déjà donné lieu à des propositions méthodologiques, telles que le concept de life cycle zero energy building proposé par Patxi Hernandez *et al.* (Hernandez et Kenny, 2010). Si cette correction des évaluations énergétiques n'est sans doute pas de nature à changer fondamentalement les approches, elle mérite néanmoins d'être relevée au nom de la rigueur. Notons cependant qu'une évaluation réellement exhaustive des impacts énergétiques n'est pas encore à notre portée et qu'il est donc difficile de spéculer sur son impact potentiel (une évaluation exhaustive devrait intégrer les conséquences d'un projet en termes de mobilité ou d'occupation des sols, ou l'influence d'un bâtiment sur les comportements énergétiques des habitants par exemple).

Un autre constat possible au départ de l'intégration de la notion d'énergie grise est qu'il est théoriquement possible de calculer le rendement d'un certain nombre de systèmes passifs, sur base des équations 10.1 et 10.2. L'idée que des mesures *passives* et *actives* peuvent être numériquement comparées ne s'applique cependant pas à toutes les mesures passives. Le choix d'une orientation préférentielle pour les ouvertures, une organisation spatiale liée à la course solaire, la recherche de compacité ou l'organisation du logement autour d'un foyer unique par exemple sont mis en œuvre par un usage différent de la matière, sans nécessairement de modification des quantités. Ce type de mesure est avant tout lié à des questions proprement spatiales. Parmi toutes les mesures à notre disposition, il s'agit de celles le plus intimement liées à l'architecture. Généralement elles répondent également à une idée de *muti-usage* : dès lors qu'un choix n'est pas uniquement dicté par un objectif énergétique, le coût éventuel de sa traduction concrète n'entre plus dans l'équation de rendement énergétique. Citons l'exemple de la fenêtre. Une certaine surface vitrée et ouvrante est indispensable dans les locaux de vie pour des questions liées à la lumière, à la relation à l'extérieur et à l'hygiène via la capacité de ventilation intensive. Le coût d'énergie grise de cette fenêtre n'a donc pas à être justifié. Pour autant que le local présente diverses orientations, le choix spatial de la position de la fenêtre sur l'orientation qui minimise le besoin d'énergie pour

le maintien du confort thermique et visuel n'entraine aucun coût énergétique supplémentaire. Dans ce cas, il n'y a donc pas lieu de parler de rendement énergétique. Il en va autrement si l'on choisit d'augmenter la dimension d'une surface vitrée au-delà de celle justifiée par ailleurs, à la seule fin de maximiser la valorisation de l'énergie solaire. Il est dans ce cas nécessaire de réaliser un bilan complet prenant en compte ce bénéfice et l'éventuel coût énergétique liés à la conversion d'une surface de mur en fenêtre.

$$\eta_{systeme.actif} = \frac{E_{besoin}}{E_{operation} + E_{Gris}} \tag{10.1}$$

$$\eta_{systeme.passif} = \frac{E_{besoin}}{0 + E_{Gris}} \tag{10.2}$$

Sur cette base, il nous semble préférable d'abandonner la distinction entre mesures actives et passives pour identifier à leur place des mesures liées à la spatialité et au comportement et des mesures liées aux technologies de la construction. Ces dernières comptent les mesures liées aux modes constructifs et celles liées aux techniques de gestion et transformation volontaire de l'énergie. Mentionnons au passage que ces trois types de mesures ne doivent pas être abordés de façons distinctes. Comme abordé dans le chapitre 5, une optimisation dissociée ne permet d'atteindre que des solutions sous-optimales. A titre d'exemple, le choix d'un chauffage par un poêle dans un logement peu demandeur de chaleur devrait impliquer une réflexion simultanée sur la position spatiale de cet élément chauffant (idéalement au centre d'un large espace de vie ouvert), sur sa puissance et sur l'effusivité thermique des parois de l'espace l'entourant.

10.2.3 Du bon usage de l'énergie grise

Dans l'idée d'évaluer la performance des mesures constructives dites passives, nous relevons le cas particulier de la performance des parois. Lorsque cette évaluation intègre l'aspect énergie grise, elle le fait généralement par la comparaison d'alternatives constructives présentant des performances égales. C'est donc généralement un travail en deux temps, commençant par l'inventaire des performances thermiques et autres à remplir par la paroi, puis la comparaison de modes constructifs répondant à ces performances. La notion d'unité fonctionnelle est souvent utilisée dans ce cadre comme définition de l'unité de référence pour l'établissement d'une analyse de cycle de vie. Il nous semble cependant que cette démarche peut être discutée.

D'une part, l'équivalence de performance est souvent mesurée au travers d'un panel limité d'indicateurs (surface, durée de vie, résistance thermique et portance). De nombreuses dimensions sont négligées, allant du comportement au feu, au prix, à l'esthétique ou, pour se limiter aux aspects énergétiques, au comportement hydrique et inertiel. L'idée d'une comparaison de l'énergie grise d'unités fonctionnelles ne se différenciant que par leur constitution, *toute autre chose étant égale*, n'est donc pas strictement rencontrée.

D'autre part, cette façon de procéder ne permet pas *a priori* de déterminer le meilleur usage de la matière. Par exemple, une fois sélectionné un mode constructif permettant de répondre à un certain standard énergétique, rien ne garantit que l'ajout d'un centimètre d'isolant ne permet pas un meilleur bilan énergétique global. La succession des évaluations de standards de performance énergétique et de qualité environnementale ne garantit pas la définition d'un optimum. Pour s'assurer d'une performance optimale, il est nécessaire d'étudier simultanément l'énergie grise et l'énergie opérationnelle dans un cas particulier. Nous montrons un exemple d'une telle évaluation globale dans le paragraphe 10.4, qui prouve qu'il existe certains niveaux d'isolation optimaux des façades. Cette conclusion est renforcée si l'on réalise une évaluation plus large du caractère écologique des parois, sans se limiter à la consommation d'énergie, mais s'amoindrit si l'on considère une durée de vie en œuvre des matériaux plus importante. Ce dernier phénomène suggère que le choix du mode constructif mériterait une attention plus soutenue que les propriétés physiques et environnementale des matériaux, car ce choix conditionne la tenue dans le temps des matériaux et la possibilité de combiner adéquatement au sein de systèmes des matériaux dont la durée de vie intrinsèque est différente. Il s'agit là d'une inversion de priorité par rapport à l'approche traditionnelle qui pourrait faciliter la diffusion de ces questions parmi les architectes, car un discours centré sur les façons de construire et plus proche de l'architecture que les aspects physico-chimiques des propriétés des matériaux.

10.2.4 Nouvel organigramme

Suite à ces remarques, nous construisons la figure 10.4 page 167 qui positionne les éléments de la problématique énergétique et indique leurs relations. Il est construit comme un développement de la figure 5.3. Les adaptations sont les suivantes : la multiplicité des formes et usages de l'énergie est ajoutée, en relation respectivement avec le climat et l'habitant. Techniques actives et dispositifs passifs sont regroupés en un ensemble de moyens dont la conception et la sélection doivent suivre trois règles : participer à la minimisation des besoins, assurer l'adéquation de la forme d'énergie à l'usage (au travers par

exemple de la notion de rendement exergétique) et maximiser leur rendement propre en tenant compte de l'énergie grise. La décomposition en besoins nets, bruts, consommations finales et primaires proposée dans la figure 10.2 n'est pas conservée, car elle relève d'un cloisonnement entre types de systèmes dont nous pouvons faire l'économie si le choix des techniques se base sur l'analyse de systèmes complets et non d'équipements particuliers. Enfin, la distinction entre énergies renouvelables et non renouvelables de l'organigramme 10.2 est reflétée par l'énoncé de l'existence de sources de flux et de stocks et l'invitation des techniques et dispositifs à privilégier le recours aux énergies de flux. Cet organigramme est présenté comme une alternative à celui présenté en figure 10.2.

Nous pouvons également synthétiser ci-dessous les conclusions de cet exercice de décloisonnement, qui permettent d'ajouter à la question de performance énergétique celle de pertinence. Elles permettent également d'intégrer plus intrinsèquement les analyses de cycles de vie aux questions de qualité énergétique. Ces considérations s'ajoutent aux éléments acquis de la physique du bâtiment (importance de l'analyse de la relation homme climat, homme-technique, etc.), mais ont vocation à remplacer ou objectiver les *règles doctrinales* telles que la Trias Energica ou la priorité aux mesures dites passives :

1. L'évaluation de la qualité d'un dispositif doit se faire non seulement sur son rendement énergétique, mais également sur base de son bilan exergétique pour intégrer la qualité des sources et usages de l'énergie consommée. Un dispositif se jugera donc sur base des trois qualités suivantes : capacité à réduire le besoin, y compris par le biais des changements comportementaux, capacité à privilégier une source d'énergie renouvelable ou abondante et adéquate au regard de l'usage prévu, et performance intrinsèque selon une analyse de cycle de vie idéalement exhaustive quant aux impacts énergétiques directs et indirects considérés.
2. La qualité énergétique doit être évaluée tant pour les dispositifs technologiques dits *actifs* que pour ceux dits *passifs*. La distinction entre ces deux types de systèmes ou dispositifs ne tenant plus une fois intégrés les concepts d'énergie grise et d'analyse de cycle de vie.
3. La détermination des modes constructifs doit se faire sans définir de priorité entre la réalisation d'un niveau de performance en termes opérationnels ou en termes d'énergie grise, afin d'assurer un usage optimal de la matière.

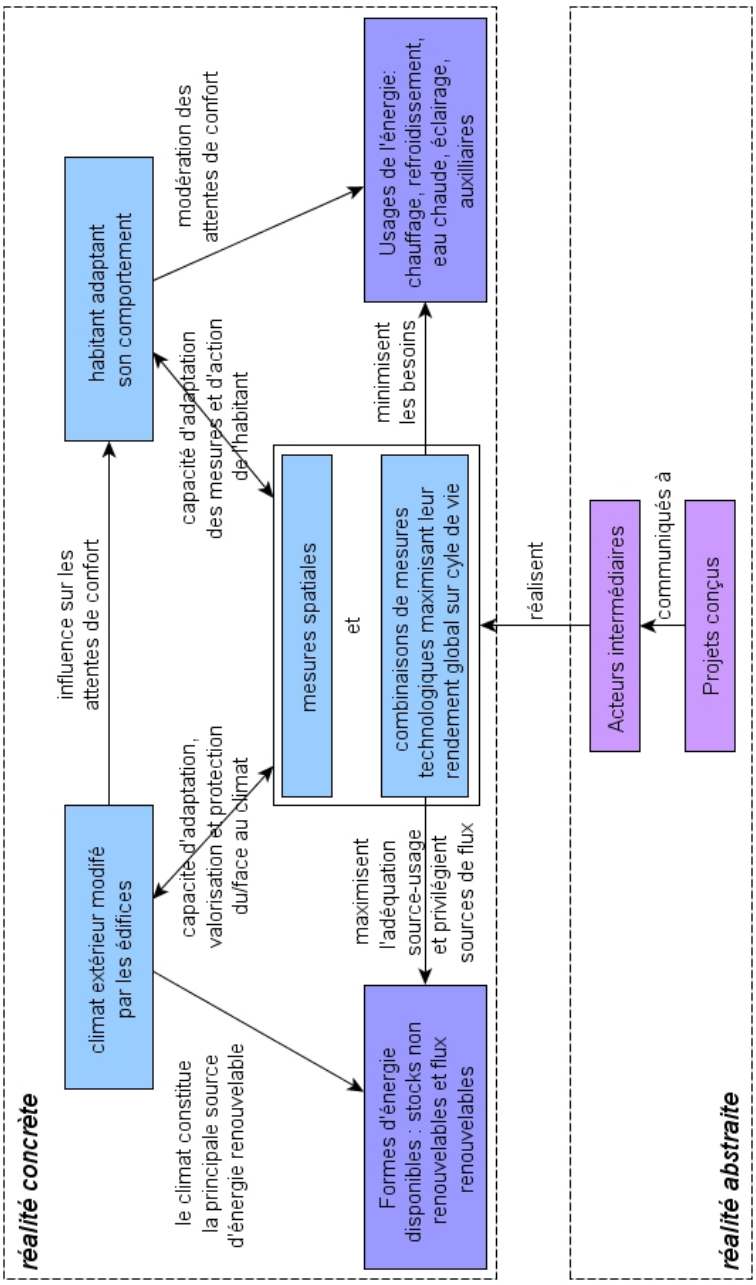


FIGURE 10.4 – Proposition d'un nouvel organigramme des sous-thématiques de l'énergie, intégrant les réflexions sur la complexité de cette thématique et corrigeant les imprécisions de l'organigramme basé sur les décompositions traditionnelles

10.3 Exergie

10.3.1 Définition exacte

Dans la théorie thermodynamique, l'exergie est introduite pour décrire le travail mécanique maximal pouvant être obtenu d'un flux d'énergie ou produit par un système. L'analyse exergétique donne un aperçu du niveau de qualité de l'énergie utilisée (par exemple une combustion à haute température) et demandée (par exemple un chauffage à basse température). Des sources énergétiques *à haute valeur* telles que l'électricité ou le travail mécanique constituent une source importante d'exergie, tandis que des formes d'énergie peu convertibles, telle qu'une source de chaleur à une température proche de l'ambiance, est une énergie à faible valeur exergétique. A la différence de l'énergie qui est conservée lors d'une transformation, l'exergie est toujours détruite du fait de la nature irréversible des processus de conversion. Dans cette section, nous présentons les éléments mathématiques de base nécessaires à l'utilisation de cette notion, au travers de l'établissement du niveau exergétique d'une ambiance thermique. Nous nous basons pour cela sur la thèse de doctorat de Poppong Sakulpipatsin, à laquelle le lecteur peut se référer pour obtenir des éléments plus détaillés (Sakulpipatsin, 2008).

L'exergie d'une substance est la somme d'une composante physique et d'une composante chimique. La composante physique est liée à la différence d'état physique en termes de température et pression entre cette substance et l'environnement de référence. L'exergie chimique par contre est liée à la différence de composition chimique de cette substance avec l'environnement, aux conditions de température et de pression de l'environnement. La différence d'exergie physique dEx_{ph} par rapport à un environnement de référence caractérisé par T_0 et p_0 est décrite par l'équation 10.3, où H est l'enthalpie, S l'entropie (théorème de Gouy-Stodola), KE l'énergie cinétique et PE l'énergie potentielle du processus étudié. Lorsque l'on considère les applications thermiques du bâtiment, KE et PE pourront généralement être négligés. L'équation 10.3 peut donc être simplifiée en l'équation 10.4. En exprimant dH et dS en dérivées partielles par rapport à la température et à la pression, et en considérant l'air comme un gaz parfait, on peut décrire l'exergie physique molaire dEx'_ph par l'équation 10.5 dont découle par intégration l'équation 10.6, avec R la constante des gaz parfaits = 8,314472 $JK^{-1}mol^{-1}$. L'exergie chimique $\Delta Ex'_{mix}$ est décrite par l'équation 10.7 dans laquelle x_i représente la fraction molaire de la i^e substance. Généralement on ne considèrera que deux substances, à savoir l'air sec et l'humidité, les autres composants tels que CO_2, N_2 etc. étant négligés. Néanmoins, Poppong Sakulpipatsin a démontré que la composante chimique de l'exergie liée à l'humidité de l'air était elle aussi

négligeable dans le cas du climat des Pays-Bas, ce qui n'est pas le cas dans les climats plus humides ou plus chauds (Sakulpipatsin, 2008). Nous pourrons donc également faire cette hypothèse et négliger la composante chimique de l'exergie.

$$dEx_{ph} = dH - T_0 dS + dKE + dPE \tag{10.3}$$

$$dEx_{ph} = dH - T_0 dS \tag{10.4}$$

$$dEx'_{ph} = c_p dT - \frac{c_p T_0}{T} dT + \frac{RT_0}{P} dP \tag{10.5}$$

$$Ex'_{ph} = c_p((T - T_0) - T_0 ln(\frac{T}{T_0}) + RT_0 ln(\frac{P}{P_0}) \tag{10.6}$$

$$\Delta Ex'_{mix} = RT_0 \sum_{i=1}^{n} x_i ln(x_i) \tag{10.7}$$

Enfin, en convertissant l'équation 10.6 en valeurs par kilogramme plutôt que par môle, en considérant une chaleur massique moyenne de l'air sec $c_{p,dryair}$ de 1.0017 kJK^{-1}kg^{-1}, et en considérant que les différences de pression atmosphérique entre l'intérieur et l'extérieur des bâtiments sont négligeables, Poppong Sakulpipatsin propose l'équation 10.8 pour caractériser le niveau d'exergie de l'ambiance d'un local, par rapport à une référence extérieure.

$$Ex'_{ph} = c_{p,dryair}((T - T_0) - T_0 ln(\frac{T}{T_0})) \tag{10.8}$$

10.3.2 Applications traditionnelles

L'exergie est traditionnellement utilisée pour deux types d'évaluations : l'analyse d'un système ou flux d'énergie en vue d'optimisation et la comparaison de systèmes réalisant le même service, en vue de sélection. Un inventaire récent des analyses exergétiques d'applications de chauffage a été publié par Arif Hepbasli (Hepbasli, 2012). Un travail équivalent sur les installations de climatisation a été publié par Herena Torio *et al.* (Torio *et al.*, 2009). Sans entrer ici dans la confrontation de techniques particulières, nous allons présenter les équations nécessaires à l'analyse exergétique des systèmes HVAC et en interpréter la forme.

L'analyse exergétique se fait souvent par l'évaluation de facteurs de qualités que l'on associe aux flux d'énergie. Partant de l'équation 10.5, on voit que la variation d'exergie d'une masse d'air associée à un changement de température à pression constante est donnée par l'équation 10.10. Cette équation fait

apparaître la variation du contenu énergétique de cette masse d'air et le facteur de qualité (facteur de Carnot) liant variation d'énergie et variation d'exergie (équation 10.10). La forme de ce facteur de qualité montre qu'au plus la température caractéristique de la transformation T est proche de la température de l'environnement T_0, au moins la perte d'exergie sera importante, et qu'il faut chercher à maximiser le facteur de qualité tel que défini. Un tel facteur de qualité peut être utilisé par exemple pour mettre en évidence l'impact exergétique du choix de la température d'un émetteur de chauffage. Entre un radiateur à température moyenne de 50°C ou 75°C par exemple, pour chauffer une ambiance à 20°C (température que nous prenons comme référence après transformation en kelvins), et pour un flux d'énergie équivalent, le facteur de qualité passe de 0.09 à 0.15, à l'avantage de l'émetteur basse température. Dit autrement, la fourniture d'un kWh énergétique par ces radiateurs implique à basse température la dissipation irréversible de 0.09 kWh d'exergie contre 0.15 kWh à haute température.

$$\Delta Ex = c_p \Delta T (1 - \frac{T_0}{T}) Masse \tag{10.9}$$

$$\Delta Ex = \Delta En (1 - \frac{T_0}{T}) \tag{10.10}$$

On voit donc que pour les applications purement thermiques, c'est uniquement la différence de température entre l'application particulière et l'environnement de référence qui détermine la qualité exergétique. Il en va autrement pour les transformations d'énergie non thermiques. Ainsi, pour les applications électriques ou de génération d'énergie au départ d'une source fossile, le bilan sera réalisé au moyen de facteurs de conversion en énergie primaire et de facteurs de qualités associés à chaque type de source primaire (gaz, fuel...) (équation 10.11). Cette approche est valide tant que l'on intègre les rendements des différentes transformations d'énergie, par exemple au niveau de la chaudière (rendement sur PCS) et des applications électriques. Pour ces dernières on suppose une conservation totale de l'exergie (rendement de 100 %). D'avantage d'information sur les facteurs de qualité peut être trouvés dans les publications de l'Annex 49 de l'ECBCS (Torio et Schmidt, 2011). On voit donc apparaître ici la ressemblance entre les notions d'exergie et énergie primaire. Lorsqu'il s'agit de faire le choix d'un vecteur énergétique pour fournir un besoin déterminé, ces deux notions sont proches pour les applications dans le bâtiment. En effet, si l'on considère une production électrique au départ du gaz et un chauffage au gaz naturel, le facteur de qualité sera identique et seul le facteur de conversion en énergie primaire différenciera un chauffage électrique d'un chauffage gaz. L'analyse exergétique ne bouleversera donc pas les choix que

nous faisons aujourd'hui entre géothermie, électricité, gaz, fioul ou biomasse. L'intérêt de l'exergie dans un bilan global apparaitra donc essentiellement dans sa capacité à prendre en compte la qualité de l'usage qui est fait de l'énergie une fois celle-ci importée dans le bâtiment. Il s'agit donc d'une analyse située entre l'évaluation des besoins nets et celle des besoins bruts. Elle permet une meilleure compréhension du fonctionnement des systèmes par l'analyse de la manière dont l'énergie est dégradée au sein du système (Mahlia *et al.*, 2011)

$$\Delta Ex = \sum_{source} \Delta EnF_{prim,source} F_{qual,source} \tag{10.11}$$

Mais à côté de l'analyse d'installations HVAC, d'autres applications de l'exergie ont été imaginées. Certains l'ont par exemple utilisée pour analyser le bilan thermodynamique du corps humain et faire un lien entre destruction d'exergie par le corps et sensation de confort (Prek et Butala, 2010). D'autres analysent les bilans énergétiques des bâtiments pour en interpréter le comportement (Sakulpipatsin, 2008), réinterpréter les modes de calculs développés pour les bilans énergétiques (par exemple la définition de degrés-jours exergétiques (Martinaitis *et al.*, 2010)) ou proposer des indicateurs de performance tels que des bilans annuels net zéro-exergie, sur le modèle des approches net-ZEB décrites au chapitre 7 (Kilkis, 2012). Cette dernière proposition est intéressante car elle répond à certaines des critiques formulées contre la démarche net-ZEB, notamment la sommation au sein d'un indicateur unique de formes d'énergies différentes (la prise en compte de l'énergie primaire n'est qu'une réponse partielle à cette critique car elle ne reflète qu'un impact quantitatif et non qualitatif des modifications de forme d'énergie).

Une des applications les plus parlantes nous semble celle des différents postes de consommation d'un bâtiment faite par Pedro Gonçalves *et al.* Elle illustre la capacité d'une analyse exergétique à produire des résultats différents d'une analyse en énergie primaire par la prise en compte de la destination de l'énergie importée (Goncalves *et al.*, 2012). Cette analyse est basée sur la définition d'un rendement en énergie primaire (PER) et d'un rendement exergétique (EXR) pour chaque poste de consommation dans le bâtiment. Ces rendements sont définis dans les équations 10.12 et 10.13 respectivement. L'équation 10.13 fait apparaitre un facteur de qualité $F_{q,source}$. Pedro Gonçalvez considère que la production électrique est faite uniquement au départ de gaz et que pour cette forme d'énergie $F_{q,source} = 1.004$. Les valeurs des facteurs de qualité $F_{q,poste}$ nécessaires pour résoudre l'équation 10.13 sont calculées sur base de l'équation 10.10 avec comme référence la température extérieure et comme températures caractéristiques 20°C pour le chauffage, 25°C pour la

climatisation, 150°C pour la cuisson et 60°C pour l'eau chaude sanitaire. La figure 10.5 reprend les résultats sous la forme d'une confrontation de l'efficacité en énergie primaire et de l'efficacité exergétique des différents postes de consommation. Nous y ajoutons une analyse de la maison Pléiade (valeurs du monitoring de l'année 1996-97) (De Herde *et al.*, 1998) que nous menons sur base de cette même méthodologie. Vu la définition des indicateurs utilisés, une approche de performance énergétique et exergétique cherchera à maximiser les deux rendements. On constate sans surprise que dans la maison Pléiade le chauffage et la préparation d'eau chaude au gaz ont un rendement primaire meilleur que les applications électriques (le résultat de 60 % vient de ce que nous simplifions l'évaluation en considérant une production électrique par turbine gaz-vapeur). La seule application électrique à montrer un bon rendement primaire est la climatisation, grâce au coefficient de performance élevé des machines frigorifiques. Par contre l'analyse exergétique montre que les postes valorisant le mieux l'énergie sont précisément les applications électriques (lumière, auxiliaires). Leur rendement exergétique est bien meilleur que celui de la climatisation et celui des applications thermiques directement alimentées au gaz. L'utilisation directe d'électricité pour des applications thermiques (chauffage électrique de la maison Pléiade) a par contre le pire rendement exergétique observé.

$$PER = \frac{E_{demande}}{E_{conso,prim}} = \frac{\sum_{poste} E_{demande}}{\sum_{source} E_{conso,finale} F_{prim,source}} \tag{10.12}$$

$$EXR = \frac{Ex_{desire}}{Ex_{requise}} = \frac{\sum_{poste} E_{demande} F_{q,poste}}{\sum_{source} E_{conso,finale} F_{prim} F_{q,source}} \tag{10.13}$$

L'analyse exergétique est donc capable d'objectiver les usages de l'énergie et d'analyser plus finement par exemple les usages faits de l'énergie électrique. Elle plaide également pour le développement des applications basse température. Si ces idées ne sont pas neuves, l'identification de l'exergie pour les analyser est assez récente. Ce type d'analyse est appelé à se généraliser. Le Canton de Genève intègre d'ores et déjà l'exigence d'une analyse exergétique dans les demandes de permis de bâtir relatif à des grands projets (Favrat *et al.*, 2008).

10.3.3 Applications liées à la soutenabilité

Nous ne prétendons pas dans cette thèse apporter un savoir nouveau aux développements physiques et mathématiques de la notion d'exergie. Nous pointons par contre son intérêt intrinsèque dans une approche soutenable. Certains auteurs ont déjà proposé la définition d'indicateurs de soutenabilité (SI) d'une

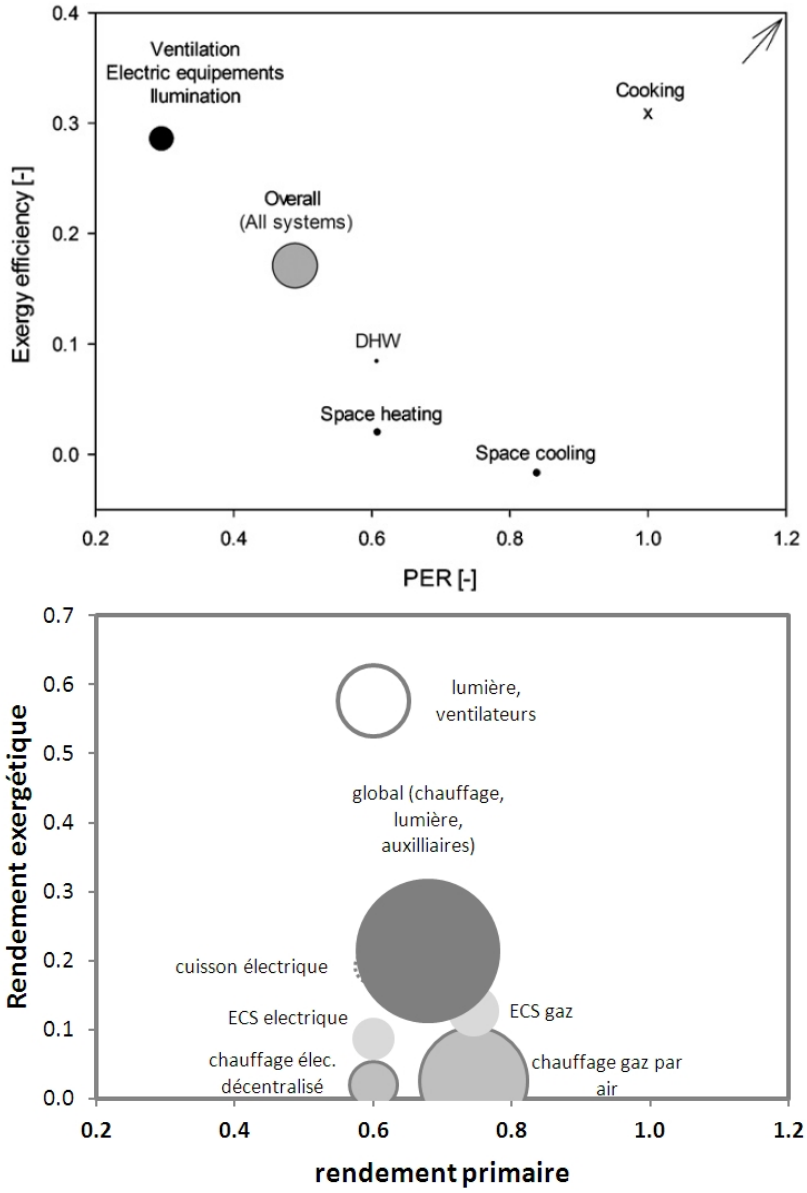


FIGURE 10.5 – Rendements primaires et exergétiques des principaux postes de consommations dans un hôtel (en haut, figure reprise de (Goncalves *et al.*, 2012)) et la maison Pléiade (en bas)

ressource énergétique sur base de la notion d'exergie au travers de l'équation 10.14 où Ex_{in} représente l'input d'exergie dans un processus et Ex_D la destruction d'exergie (Rosen *et al.*, 2008). Il s'agit donc d'une mesure directe du bon usage d'une ressource.

$$SI = \frac{Ex_{in}}{Ex_D} \tag{10.14}$$

Nous proposons ici une autre façon d'utiliser l'énergie dans le cadre de la construction de bâtiment. Nous savons que la réponse aux enjeux climatiques impose de recourir préférentiellement aux formes d'énergie renouvelables peu émettrices de gaz à effet de serre. Nous avons également développé au chapitre 4 l'idée qu'il est nécessaire pour faire face au problème de raréfaction des ressources énergétiques de privilégier les formes d'énergies disponibles localement et non délocalisables. Ceci revient donc à privilégier l'électricité photovoltaïque produite sur site à celle acheminée par le réseau, la chaleur solaire et géothermique à celle produite par combustion, la pression du vent et la poussée d'Archimède aux ventilateurs électriques.

Or, à part pour l'électricité photovoltaïque dont l'origine n'a pas d'impact sur la qualité de l'énergie fournie, ces formes d'énergie à privilégier présentent des valeurs exergétiques moindres que leur équivalent *insoutenable*. Considérons les formes d'énergie utilisées pour des applications thermiques :

– Combustibles
  La valeur exergétique maximale théorique d'un kWh produit par combustion est déterminée dans le cas d'une combustion stœchiométrique, c'est à dire lorsque tant le combustible que l'air comburant et les fumées sont en équilibre avec le milieu ambiant (température et pression équivalentes). Cette valeur est donnée par l'équation 10.15 où PCS représente le pouvoir calorifique supérieur du mélange combustible, T_a la température ambiante et ΔS_{12} l'augmentation d'entropie lors de la combustion. Le terme entropique, qui représente la différence d'entropie entre l'ensemble air-combustible et les fumées est souvent négligé, ce qui revient à assimiler l'exergie d'un combustible à son pouvoir calorifique supérieur (Lallemand, 2007). Si nous reprenons l'équation 10.10, cette affirmation revient à considérer que le facteur de Carnot vaut 1 pour la combustion proprement dite. Dit autrement, la température caractéristique de la source d'énergie est infinie pour l'analyse exergétique de la combustion, ce qui montre la très grande qualité de ces sources d'énergie. Par contre, si l'on envisage la possibilité d'utilisation de l'énergie

libérée par la combustion, nous devons nous référer à la température maximale théorique à laquelle cette énergie est disponible. La température de la flamme peut être calculée théoriquement en condition adiabatique, et est de l'ordre de 2000 à 3500 K selon le combustible (Paillard, 2004)). Le régime de température auquel le fluide caloporteur sera porté est néanmoins encore moindre, et dépendra du fluide caloporteur : maximum 200°C pour de la vapeur, 90°C pour de l'eau et 55°C pour de l'air, pour des raisons de maintenance et de confort. Ajoutons que dans le cas d'une chaudière à condensation, le régime d'eau influencera la performance de la condensation. C'est cependant essentiellement la température de retour de l'eau qui détermine la qualité de la condensation, laquelle dépend autant du dimensionnement des émetteurs. Considérons cependant comme bonne pratique dans le cas de chaudières à condensation une température de départ d'eau de maximum 60°C. C'est sur base de ces températures que nous calculons dans le tableau 10.1 les facteurs de Carnot qui correspondent à une température de référence de 9°C (moyenne extérieure à Uccle sur l'année). L'écart de température entre la flamme et les fluides caloporteurs montrent l'importante dégradation de l'énergie, non du fait de la combustion elle-même, mais de la valorisation de cette combustion dans la chaudière.

$$Ex_{melangecombustible} = PCS + T_a \Delta S_{12} \tag{10.15}$$

– Environnement extérieur
Au travers de pompes à chaleur, le milieu extérieur peut être valorisé comme source de chaleur. Une pompe à chaleur idéale étant caractérisée par un cycle de Carnot, son coefficient de performance est donnée par l'expression 10.16 où T_2 est l'isotherme chaude et T_1 l'isotherme froide. Dans la pratique cependant, les coefficients de performance rencontrés sont bien moindres. Sur base des relevés de performance réalisés par Ivar Ertesvag, nous observons un COP réel 62.9 % inférieur à la théorie (Ertesvag, 2011). Considérons en outre que le recours à une pompe à chaleur n'a de sens énergétiquement que si le COP obtenu est supérieur au coefficient de conversion en énergie primaire de l'électricité qu'elle consomme. Cette valeur est traditionnellement estimée à 2.5 pour le parc électrique belge moyen. Pour extraire de notre analyse la question du nucléaire, nous allons considérer ici une production électrique en centrale TGV avec un rendement de 60 %. La température pivot de pertinence d'une pompe à chaleur sera alors celle correspondant à un COP réel de 1/0.6=1.667, soit un COP théorique de 1.667/(1-0.629)=4.493. Prenons une température d'environnement de 6.7°C (moyenne du climat d'Uccle en période de chauffe) qui entraine une température d'évaporation de

-1.3°C pour un pincement de 8°C. La température maximale de condensation à envisager avec une pompe à chaleur est alors 76.5°C, ce qui permet d'envisager une température de fluide de distribution à 68.5°C. Le facteur de Carnot correspondant est donné dans le tableau 10.1. Nous retenons ces valeurs pour une application de type géothermique. Si l'air extérieur est utilisé comme source de chaleur, nous considérons la plage -10°C à 15°C comme représentative de la période de chauffe. Considérant les mêmes pincements, la température disponible au fluide de distribution sera alors dans la fourchette 47°C à 79°C.

$$COP_{max,theorique} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} \tag{10.16}$$

– Rayonnement solaire
La valeur exergétique de la chaleur solaire est traditionnellement calculée en prenant comme température de référence la température du soleil, soit 6000 K (Saidur *et al.*, 2012). Tout comme pour la combustion, nous allons ici considérer non pas la qualité intrinsèque de la source d'énergie, mais celle de l'énergie pouvant être importée dans le bâtiment. Si l'on considère une application solaire thermique standard, la température obtenue à la sortie du capteur, sur base d'une simulation dynamique, est représentée par la figure 10.6 pour l'année climatique type de Uccle. Nous en retenons les valeurs 40 et 100°C comme maxima saisonniers. Une fois encore, le facteur de Carnot correspondant est donné dans le tableau 10.1.

Les valeurs répertoriées dans le tableau 10.1 reflètent la plus grande pertinence dans une recherche de soutenabilité des formes d'énergies à basse exergie. Il est dès lors possible d'utiliser la notion d'exergie pour caractériser la capacité d'un bâtiment à recourir préférentiellement à ces sources d'énergie. L'idée est de s'assurer par une analyse exergétique que les installations de stockage, distribution et émissions n'occasionnent pas une destruction d'exergie telle qu'une source préférentielle d'énergie ne devienne inaccessible. Il faut pour cela que ces destructions soient inférieures à la différence d'exergie disponible entre l'application visée et la source disponible présentant la plus basse exergie. Par exemple, la forme d'énergie à plus basse exergie disponible est l'air extérieur au travers d'une pompe à chaleur, dont le coefficient de Carnot est 0.118. Le coefficient de Carnot d'une application chauffage elle-même est 0.034. La quantité maximale d'exergie pouvant être dissipée lors des distributions, émissions et stockage d'énergie est dès lors $0.118 - 0.034 kWh_{ex}/kWh_{en}$. Ceci peut être exprimé sous la forme d'une exigence de qualité d'une installation de chauffage, soit un rendement exergétique de ce

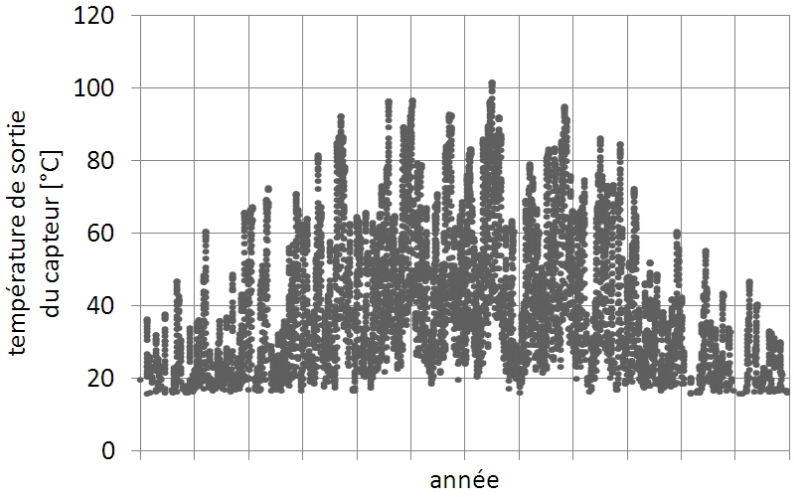


FIGURE 10.6 – Température du fluide à la sortie d'un capteur solaire à Uccle

TABLE 10.1 – Qualité exergétique de différentes applications thermiques

Application	Température caractéristique	Facteur de Carnot	Caractère soutenable
Effet Joule	inf	1	
Combustion	2273.15 K	0.876	
Chauffage central à vapeur	473,15 K	0.404	
Chauffage central à eau chaude	363,15 K	0.223	
Combustion avec condensation	333,15 K	0.153	Valorisation optimale de la combustion pour une application thermique domestique
Chauffage central à air chaud	328,15 K	0.140	Distribution à basse température limitant les pertes énergétiques
Rayonnement solaire	313 à 373 K	0.099 à 0.244	Ressource locale non/peu délocalisable
Géothermie via PAC	341.7 K	0.174	Ressource locale non/peu délocalisable
Air extérieur via PAC	320 à 352 K	0.118 à 0.198	Ressource locale non/peu délocalisable
Usage d'eau chaude sanitaire	333.15 K	0.15	-
Refroidissement d'un local	299.15 K	0.057	-
Chauffage d'un local	293.15 K	0.034	-

système obligatoirement supérieur à $0.034/0.118 = 29\%$. De même, le rendement exergétique de l'installation de stockage et distribution d'eau chaude devrait être supérieure à $0.15/0.174 = 86\%$ si l'on souhaite valoriser la chaleur du sol. Si pour une raison particulière l'énergie géothermique n'est pas accessible, la référence à considérer serait la source solaire, et cette exigence de rendement sur l'installation de distribution d'eau chaude deviendraient en hiver $0.15/0.099 = 152\%$ (valeur inaccessible) et $0.15/0.244 = 61.5\%$ en été.

10.4 Bilan énergétique global des parois

10.4.1 Méthode et hypothèses

Cette section vise à illustrer deux manquements relevés plus haut dans l'approche actuelle des questions énergétiques, à savoir l'absence d'évaluation de rendement pour les mesures passives et l'utilisation des notions d'énergie grise comme critère de sélection d'un mode constructif seulement après avoir fixé la performance thermique à atteindre.

Pour discuter ces deux aspects, nous proposons ici à titre d'exemple une analyse énergétique de quelques modes constructifs décrits dans le tableau 10.2. Le bilan en énergie grise de ces parois est établi sur base des valeurs répertoriées dans le tableau 10.3 page 180 (Trachte et De Herde, 2010). Ces parois sont ensuite injectées dans le bilan thermique PHPP de trois variantes d'une maison 3 façades (figure 10.7 page 182). Ces trois niveaux correspondent à des pratiques constructives différentes symbolisées par les termes *PEB* (pas de récupération de chaleur, 1 renouvellement d'air par heure (ach) de ventilation hygiénique et un n50 de 6), *TBE* pour *très basse énergie* (récupération de chaleur à 50 %, 0.5 ach de ventilation hygiénique et un n50 de 3) et *Passivhaus* (récupération de chaleur à 82 %, 0.3 ach de ventilation hygiénique et un n50 de 0.6). Les parois de la maison sont identiques dans tous les cas, sauf le vitrage qui passe d'un triple 0.6 W/(m^{2}K) dans le cas *Passivhaus* à un double 1.1 W/(m^{2}K) dans les deux autres cas, pour un même facteur solaire.

Nous analysons ensuite le bilan énergétique des différentes parois étudiées sur base des matériaux les constituant, mais en intégrant également l'impact de ces parois sur les consommations de chauffage. Ces consommations sont déterminées sur base du bilan PHPP, d'un rendement de chauffage global moyen sur PCI de 85 % et d'un facteur de conversion primaire de 1, valeurs représentatives d'une installation de chauffage au gaz.

TABLE 10.2 – Modes constructifs considérés dans l'évaluation du bilan énergétique global de parois

type de paroi	composition	épaisseur couche isolante	résistance thermique (m^2K)/W
ossature bois "lelaxe 40 cm"	panneau plâtre 13mm + contre-lattage technique de 30mm ou contre-lattage isolée par un matelas de cellulose de 60mm à 120mm + pare-vapeur + cellulose entre chevrons 38 espacés de 40cm + OSB 15mm	90mm à 216+120mm, fraction bois de 9.5%	3.13 à 6.93
ossature bois "lelaxe 60 cm"	panneau plâtre 13mm + contre-lattage technique 30mm à 60mm, parfois isolé de laine de verre + pare-vapeur + cellulose entre chevrons 38 espacés de 60cm + OSB 15mm	90mm à 216mm, fraction bois de 6.3%	3.20 à 6.63
bois massif + laine de bois "lelaxe 40 cm"	madriers bois empilés 60mm + fibre de bois entre chevrons 38 espacés de 40cm + membrane pare-pluie	90mm à 216mm, fraction bois de 9.5%	2.93 à 5.62
bois massif + laine de bois "lelaxe 60 cm"	madriers bois empilés 60mm + fibre de bois entre chevrons 38 espacés de 60cm + membrane pare-pluie	90mm à 216mm, fraction bois de 6.3%	3.01 à 5.84
bloc TC + enduit sur EPS	plafonnage 15mm + bloc creux TC 140mm + polystyrène expansé + enduit synthétique	60mm à 220mm	2.442 à 7.014
mur creux + PUR	plafonnage 15mm + bloc creux TC 140mm + polyuréthane + brique TC	60mm à 200mm	3.13 à 8.73

TABLE 10.3 – Matériaux considérés dans l'évaluation du bilan énergétique global de parois selon (Trachte et De Herde, 2010)

matériaux	densité (kg/m^3)	lambda (W/(m^{2}K))	durée de vie (années)	énergie primaire (production + élimination) MJ/kg	énergie non renouvelable (production) MJ/kg	global warming potential (production + élimination) kg$_{CO2_{eq}}$/kg	acidification kg$_{SO2_{eq}}$/kg
panneau plâtre armé	1150	0.036	30	4.86+0.292	4.72	0.27+ 0.0261	0.27
plafonnage	1200	0.57	30	1.72+0.116	1.51	0.08+ 0.0048	0.00023
bois massif	600	0.12	50	24.6+0.109	3.2	-1.36+ 0.0075	0.00082
panneau particules	600	0.14	50	41+0.164	13.19	-0.09+ 0.113	0.00198
pare-vapeur mu variable	850	2.4	30	92.6+0.394	89.5	2.66+ 2.82	0.0269
bloc terre cuite creux	650	0.310	50	2.85+0.188	2.58	0.238+ 0.0087	0.00064
cellulose	50	0.04	30	9.72+0.294	7.08	0.27+ 0.024	0.00264
matelas de laine de bois	75	0.04	30	25.62+0	4.62	-1.33+ 0	0.00206
matelas de cellulose	70	0.04	30	21.2+0	15.4	1.61+ 0	0.0123
polystyrène expansé	30	0.035	30	106+0.27	105	4.01+ 3.15	0.02216
polyuréthane	40	0.025	30	103+1.38	100	4.21+2.47	0.0668
panneau OSB	500	0.14	30	36.4+0.165	13.8	-1.25+ 0.114	0.00338
membrane pare-pluie	850	2.4	30	92.6+0.394	89.5	2.66+ 2.82	0.0269
enduit résine synthétique	1200	1.2	20	8.33+0.19	7.89	0.29+ 0.0050	0.00233
brique terre cuite	1000	1.08	50	2.85+0.188	2.58	0.238+ 0.0090	0.00064

Outre le bilan énergétique, nous réalisons un bilan environnemental sur base de l'indicateur OI3 défini par l'Austrian Institute for Healthy and Ecological Building (IBO, 2011). Cet indicateur agrège les impacts suivants : énergie primaire non renouvelable, effet de serre et acidification. Un nombre de points est associé à chaque enjeu sur base des relations 10.17 à 10.19. Ces relations expriment la différence d'importance des différents enjeux. Ces trois valeurs en points sont ensuite moyennées avec un poids égal. En dérogation à la méthode proposée par IBO, nous intégrons dans les quantités d'énergie primaire, de CO_2 et de SO_2 les émissions liées à la combustion du gaz, sur base des ratios 0.235 kg_{CO2}/kWh_{PCI} et 0.000111 kg_{SO2}/kWh_{PCI}.

$$0I_{PEC} = \frac{1}{10}(MJ - 500) \tag{10.17}$$

$$0I_{GWP} = \frac{1}{2}(kgCO2eq + 50) \tag{10.18}$$

$$0I_{AP} = \frac{100}{0.25}(kgSO2eq - 0.21) \tag{10.19}$$

10.4.2 Résultats

La figure 10.8 présente les résultats en termes d'énergie primaire (grise + opérationnelle) pour les trois variantes du bâtiment. Les valeurs sont annualisées et ramenées au m^2 de façade. La figure 10.9 se focalise sur la consommation d'énergie primaire totale et le rendement énergétique de l'isolation défini par l'équation 10.2 pour le mode constructif dit *PEB*, cas *TBE* et cas *ossature bois "|e|axe 40 cm"*. Les figures 10.10 et 10.11 présentent, pour les mêmes cas, les résultats selon l'indicateur OI3 sur une période de 30 ans. Ces résultats montrent que :

- Si d'un point de vue énergétique uniquement, l'augmentation de la résistance thermique des parois est presque toujours profitable dans la gamme de valeurs étudiées, ce n'est pas le cas d'un point de vue environnemental.
- Au niveau énergétique, un seul cas d'augmentation de la consommation d'énergie primaire est lié à une augmentation de l'isolation. Il s'agit, pour le bâtiment *Passivhaus*, du cas du remplissage de l'espace technique côté intérieur d'une ossature bois déjà pourvue de 21.6 cm de cellulose insufflée. La figure 10.9 montre pour ce cas un rendement entre 90 et 100 % pour l'ajout d'isolation thermique sous forme de matelas de cellulose.
- Le paramètre durée de vie des matériaux est important. Si l'on reprend le cas *ossature bois "|e|axe 40 cm"* et que l'on porte la durée de vie de

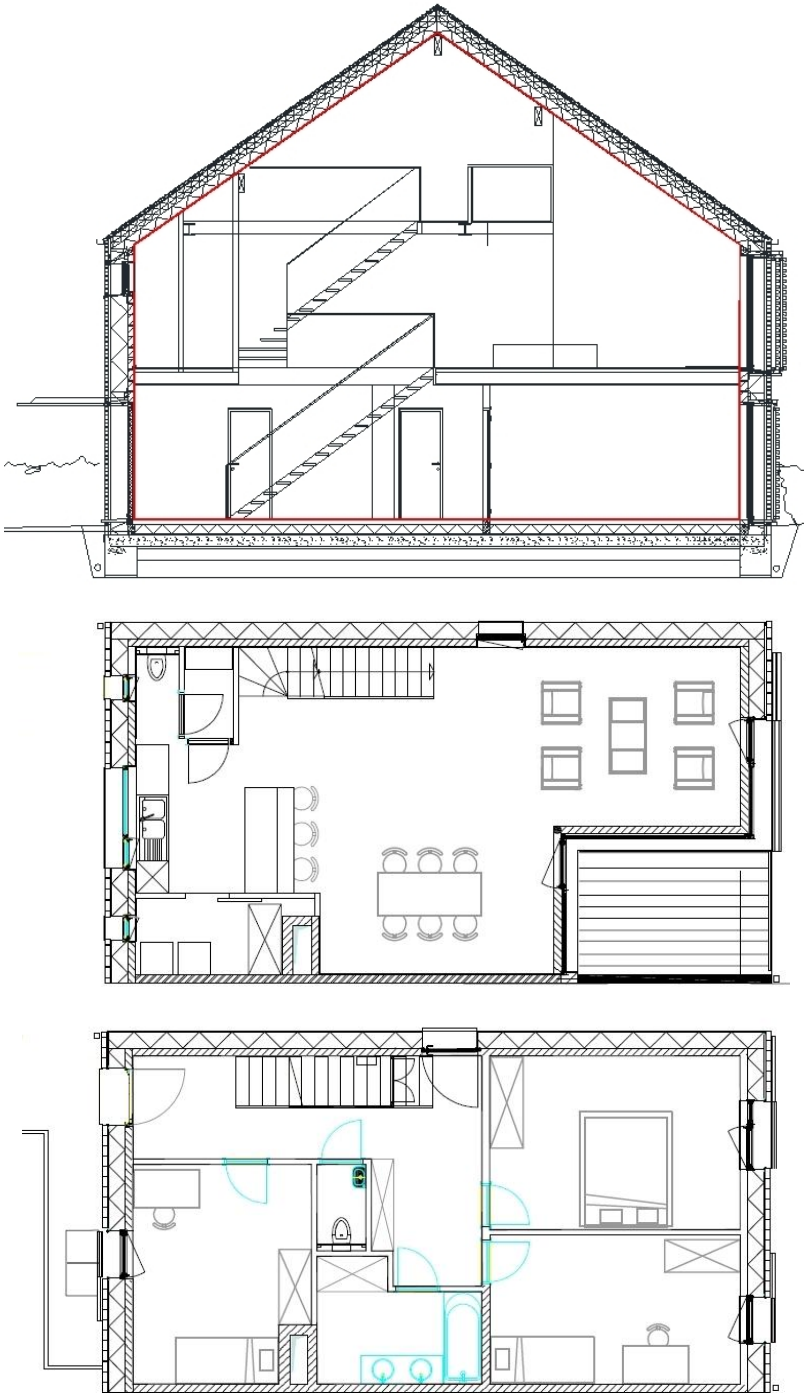


FIGURE 10.7 – Projet de logement individuel 3 façades dessiné par le bureau A2M à Avin utilisé comme base de travail pour cette étude. Plans ©A2M.

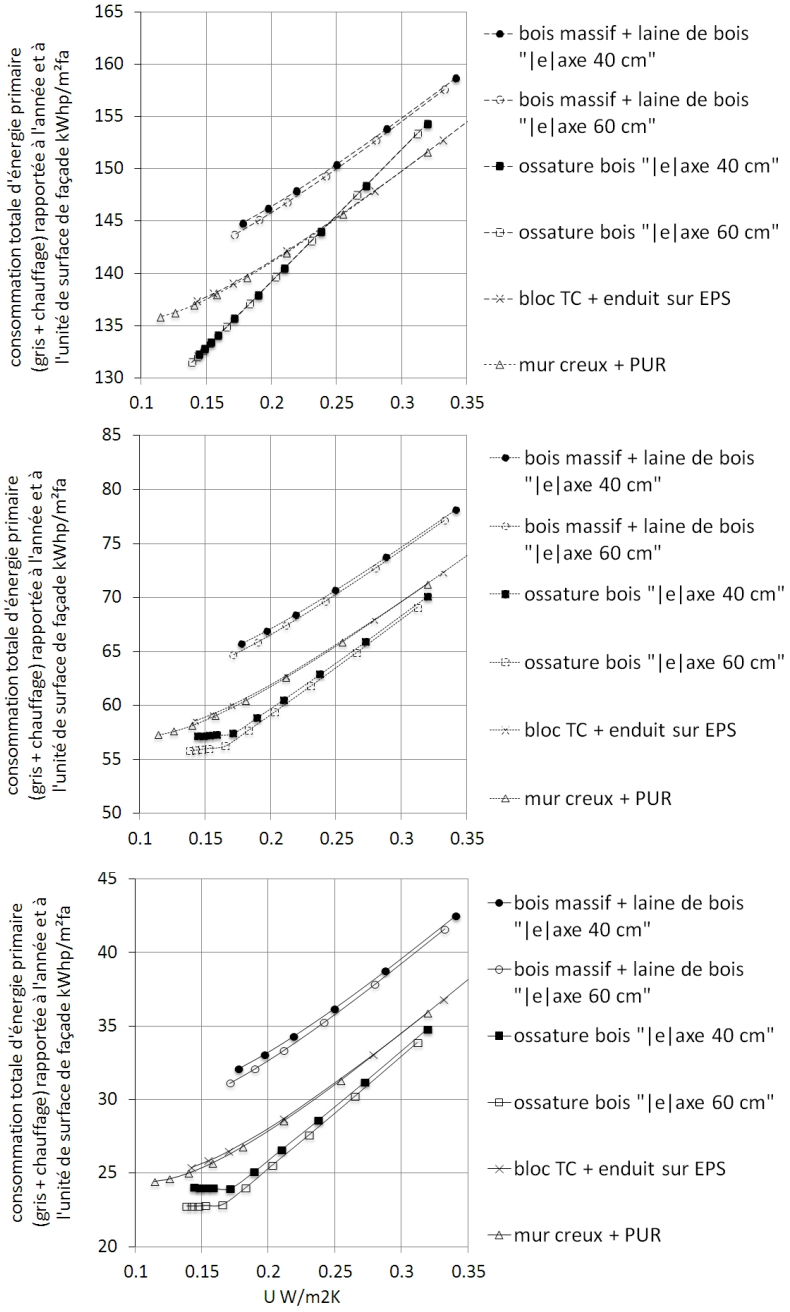


FIGURE 10.8 – Impact du niveau U de la paroi sur le bilan énergétique primaire global sur 30 ans (chauffage + énergie grise) selon le mode constructif. De haut en bas, cas *PEB*, cas *TBE* et cas *Passivhaus*.

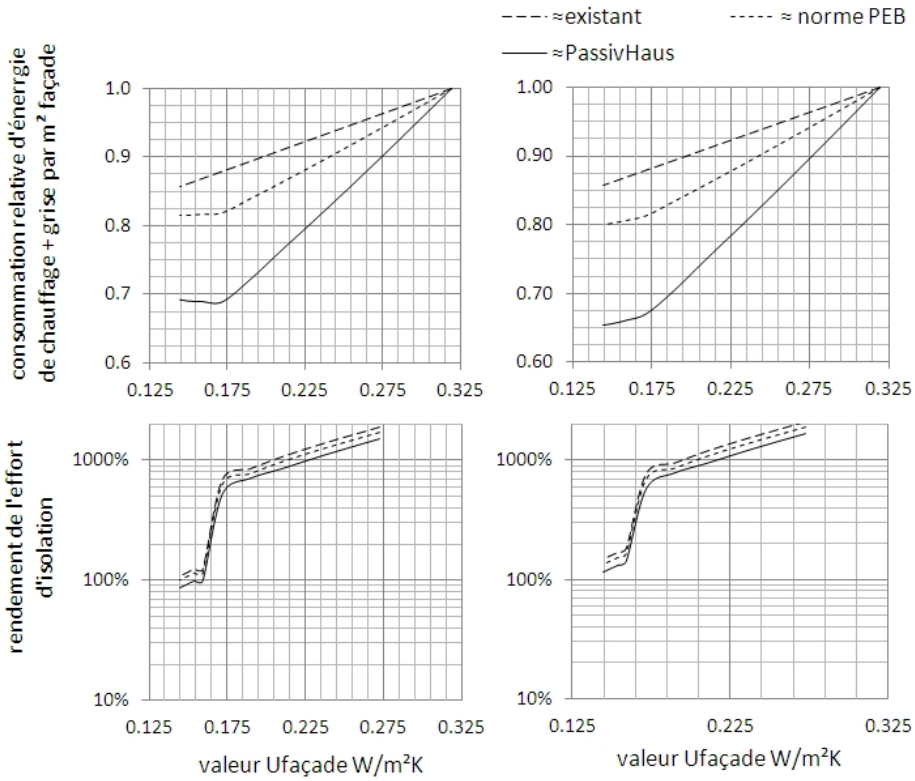


FIGURE 10.9 – Impact du niveau U de la paroi sur le bilan énergétique primaire global sur 30 ans - cas *ossature bois "|e|axe 40 cm"*. Valeurs relatives et rendement énergétique, pour les durées de vie reprise au tableau 10.3 (à gauche) ou uniformisées à 50 ans (à droite).

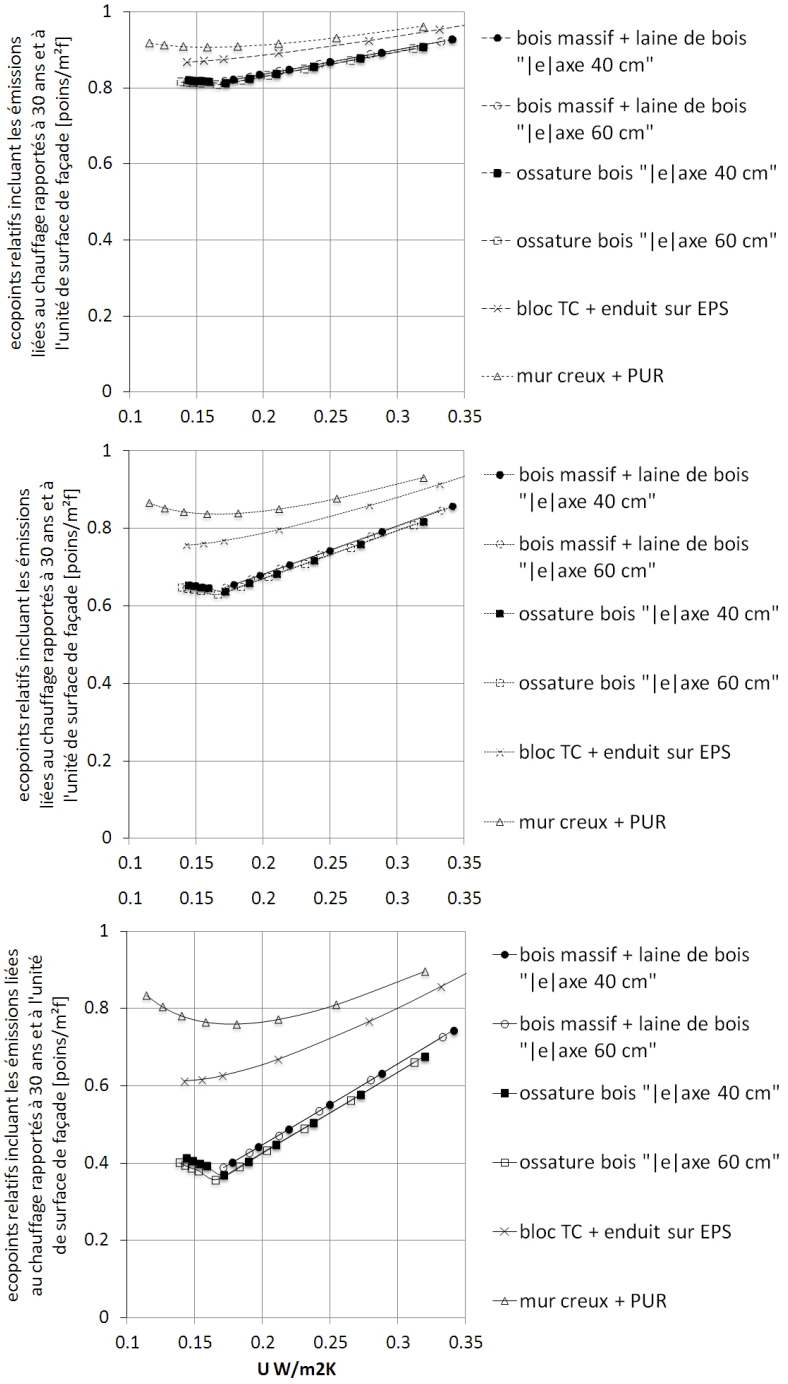


FIGURE 10.10 – Impact du niveau U de la paroi sur le bilan environnemental sur 30 ans selon le mode constructif. Valeurs exprimées relativement à la valeur maximale rencontrée. De haut en bas, cas *PEB*, cas *TBE* et cas *Passivhaus*.

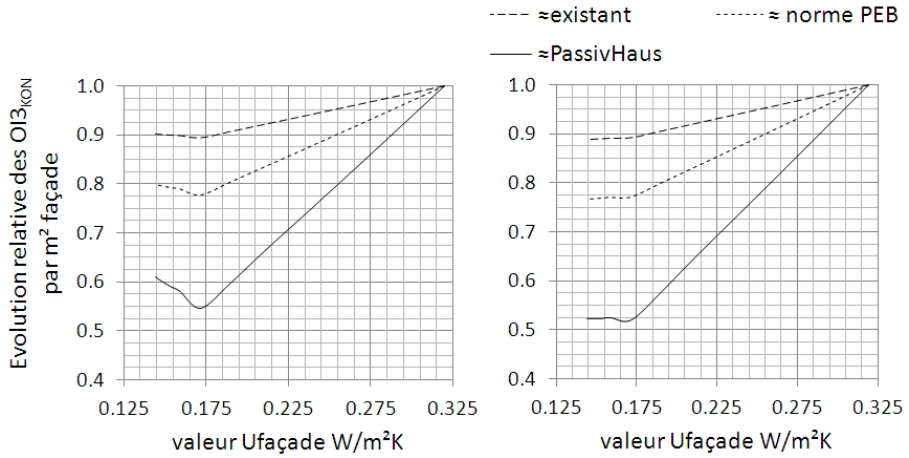


FIGURE 10.11 – Impact du niveau U de la paroi sur le bilan environnemental sur 30 ans - cas *ossature bois "lelaxe 40 cm"*. Valeurs relatives, pour les durées de vie reprise au tableau 10.3 (à gauche) ou uniformisées à 50 ans (à droite).

l'isolant à 50 ans, l'optimum indiqué n'existe plus dans la gamme de valeurs considérée. L'ajout d'isolant est alors toujours bénéficiaire.

– Toujours au niveau énergétique, la figure 10.8 montre que la résistance thermique joue un plus grand rôle que le choix constructif dans la réduction de la consommation globale d'énergie. Il est néanmoins évident qu'un choix de mode constructif *à haute énergie grise* pénalise la performance globale de façon importante. Ces résultats corroborent ceux de Sophie Trachte *et al.* sur la nécessité de considérer l'énergie grise lorsque l'on vise un niveau de performance élevé (Trachte et Massart, 2011).
– L'analyse environnementale plus large montre que l'augmentation de la résistance thermique peut entraîner pour certains modes constructifs une augmentation de l'impact écologique mesuré par l'indicateur OI3, au delà d'une valeur optimale. Au-delà de cette valeur, le poids écologique de l'ajout d'isolant n'est pas compensé par la réduction des consommations.
– Ces optimums écologiques se rencontrent pour les modes constructifs de type ossature bois et mur creux avec polyuréthane. Un tel optimum a déjà été pointé au niveau énergétique pour l'ossature. L'analyse écologique ne fait que renforcer ce phénomène. Cet optimum est par contre nouveau pour le cas du mur creux. Le niveau de cet optimum est proche de U=0.17 W/(m^{2}K) pour l'ossature et varie entre U=0.15 W/(m^{2}K) et U=0.20 W/(m^{2}K) pour le mur creux, soit des niveaux moins ambitieux que la recommandation du standard *Passivhaus*.

- Contrairement à l'analyse énergétique, dans l'analyse environnementale le choix de mode constructif a autant sinon plus d'impact sur la performance globale que la résistance thermique : la marge de progression entre le mur creux et l'ossature est en effet aussi grande que l'influence propre du niveau U de ces parois, et la meilleure performance obtenue avec l'un est moindre que la pire obtenue avec l'autre.
- Notre exemple démontre en outre que le résultat de ce type d'évaluation est dépendant du cas d'étude : l'existence et la position des optimums variant selon la variante du bâtiment étudié. Il est donc impossible de généraliser des valeurs précises de niveaux d'isolation thermique optimaux. Sur cette base, il apparait qu'une recherche de minimisation de l'impact environnemental d'une construction nécessite une analyse au cas par cas pour identifier l'existence possible d'optimum.

Nous voyons principalement trois choses à retenir de cet exemple. La première est que ni au niveau énergétique, ni au niveau écologique, une recommandation générale de performance thermique optimale valable pour tous les modes constructifs ne peut être identifiée. Les optimums n'existent que pour certains modes constructifs, et leurs valeurs, bien que proches, sont variables selon les cas. Il n'est donc pas possible aujourd'hui d'indiquer une recommandation claire et absolue sur le niveau U à atteindre en se basant uniquement sur le bilan environnemental de la paroi. La deuxième chose est que lorsqu'un optimum existe dans la gamme de valeur considérée, il correspond à une performance thermique moins ambitieuse que la recommandation du standard *Passivhaus* (0.15 W/(m^{2}K)). Il est donc pertinent, pour certains modes constructifs, de remettre cette recommandation en cause, ou de l'argumenter autrement que par un bénéfice environnemental. La troisième chose est que le choix de mode constructif a, dans le cas des bâtiments à haute performance énergétique, plus de poids sur le bilan environnemental que la performance thermique. La physique du bâtiment ne peut donc plus considérer les matériaux uniquement sous leur forme abstraite de résistance thermique, même en y ajoutant la notion d'énergie grise. Il apparait nécessaire de considérer la durabilité (dans le sens de la durée de vie) et la capacité d'entretien des matériaux comme des mesures de qualité énergétique ou environnementale en tant que telles.

10.5 Conclusion - éléments d'une approche soutenable

Nous avons dans ce chapitre énoncé les différentes sous-thématiques de l'énergie dans le bâtiment et discuté leur pertinence. Ceci nous a permis d'identifier les règles méthodologiques suivantes :

1. L'évaluation de la qualité énergétique d'un dispositif doit être à la fois qualitative et quantitative. Une approche quantitative doit mesurer l'impact énergétique immédiat et différé dans le temps d'une décision. Les notions de rendement et de coefficient de performance permettent cette analyse. L'évaluation qualitative doit mesurer l'adéquation entre la forme d'énergie utilisée et l'usage envisagé. Cette évaluation doit se faire dans l'optique d'une raréfaction des ressources énergétiques nécessitant à la fois leur économie et leur valorisation maximale. La notion d'exergie est utile pour réaliser ce type d'évaluation. Nous proposons une formulation d'un indicateur de qualité exergétique des modes de transformation de l'énergie dans un bâtiment. La forme de cet indicateur privilégie l'utilisation de ressources énergétiques à basse exergie, soit *a priori* les ressources locales et non délocalisables, telles que la chaleur de l'environnement ou le rayonnement solaire.

2. L'intégration de la notion d'énergie grise implique que la qualité énergétique doit être évaluée tant pour les systèmes dits *actifs* que pour ceux dits *passifs*. Il est désormais possible et nécessaire de parler du rendement énergétique d'un système passif. Une approche linéaire de sélection d'une résistance thermique puis de choix de mode constructif ne peut méthodologiquement mener qu'à des solutions sous-optimales. Nous avons dans ce chapitre présenté un exemple d'application de cette idée à la notion d'isolation thermique. Cet exemple montre que les niveaux de performance actuellement visés sont, sauf exception, en-deçà des optimums énergétiques. Par contre ils dépassent bien, pour certains modes constructifs, les optimums environnementaux mesurés selon l'indicateur OI3. Dans une approche énergétique globale, performance thermique et mode constructif doivent être envisagés simultanément. Il faut alors que les recommandations génériques réglementaires ou volontaires (tels que le 0,15 W/m^{2}K du standard *Passivhaus*) soient interprétées comme des bases de travail à remettre en cause, éventuellement à la baisse, à chaque projet. Enfin, cette section illustre le poids sur le bilan énergétique de paramètres tels que le mode constructif et la durée de vie des matériaux et composants. Nous sommes donc en mesure d'affirmer que la recherche de performance énergétique maximale d'une paroi n'est plus aujourd'hui seulement une question de résistance thermique, mais d'abord une question de choix de matériaux, de modes d'assemblages et d'entretien. Ce faisant, la performance énergétique d'une paroi devient une question constructive avant d'être une question de physique du bâtiment.

3. Dans la suite de l'énoncé précédent, nous démontrons que la distinction actif-passif n'a plus lieu d'être. Nous proposons à sa place une dis-

tinction entre dispositifs spatiaux et technologiques. Seuls les premiers peuvent éventuellement prétendre à une absence de coût énergétique, de par l'absence de matière mise en œuvre ou sur base du principe d'usage multiple de la matière. Il en découle la nécessité de mettre la priorité sur les mesures spatiales dans une approche d'économie globale d'énergie. En seconde priorité vient l'optimisation conjointe des mesures technologiques (constructives ou liées aux systèmes F&E) dans les espaces conçus et en tenant compte d'une capacité d'adaptation des/aux habitants et aux variations contextuelles.

Sur base des développements de ce chapitre nous avons pu proposer un nouvel organigramme de la qualité énergétique d'un projet d'architecture (figure 10.4). Cet organigramme synthétise les apports historiques de la physique du bâtiment (importance de l'analyse de la relation homme-climat, homme-technique, etc. décrits dans le chapitre 5), la reconnaissance de la complexité de cette question et les éléments listés ci-dessus. Face à cette complexité, il est nécessaire aujourd'hui d'identifier des principes méthodologiques permettant au chercheur et au concepteur de gérer cette complexité. Vu les rapides évolutions que connait le domaine de l'énergie dans le bâtiment, il est nécessaire que ces principes se limitent à des règles de conduites claires. Il est trop tôt aujourd'hui pour proposer des méthodes d'évaluation infaillibles. Ces règles doivent faciliter la prise d'une décision en intégrant la multiplicité de ces conséquences et se poser en alternatives à des principes de conception doctrinaux tels que la Trias Energica. Nous pensons que l'organigramme et les principes répétés ci-dessus constituent de telles règles, à la fois simples dans leur énoncé et ouvrant à de nouveaux questionnements sur leur implémentation pratique.

Chapitre 11

L'énergie parmi les autres dimensions de l'architecture

Comme suite à l'exercice de décloisonnement interne de la question de l'énergie dans le bâtiment proposé au chapitre 10, nous proposons ici un balayage des relations entre le thème de l'énergie et d'autres dimensions de l'architecture. Cet exercice répond explicitement au principe d'intégration des composantes. Les relations considérées sont représentées par la figure 11.1. Nous décrivons ces relations successivement et indépendamment dans les sections 11.1 à 11.5. Ces descriptions sont brèves, mais nous revenons sur deux questions particulières au travers d'études originales plus pointues : la liaison entre la notion de confort et celle de salubrité dans la section 11.6 et l'impact énergétique de la flexibilité des aménagements spatiaux dans la section 11.7.

11.1 Dimensions environnementales

11.1.1 Energie et matière

Une relation évidente entre les thèmes énergie et matière existe au travers de la notion d'énergie grise des matériaux. Cette relation a été développée au point 10.4 au travers de l'exemple de l'isolation thermique. Nous y appliquons, avec certaines nuances originales, la démarche aujourd'hui traditionnelle d'assimilation d'un matériau à une quantité d'énergie primaire, pour mettre en balance son coût environnemental et le bénéfice qu'il est censé permettre. Nous y avons rappelé que l'énergie grise ne couvre qu'une partie de l'impact environnemental d'un matériau. Par le recours à l'indicateur OI3 (IBO, 2011), nous y démontrons qu'une évaluation limitée à l'énergie grise et opérationnelle est insuffisante pour identifier les modes constructifs optimaux d'un point de vue environnemental.

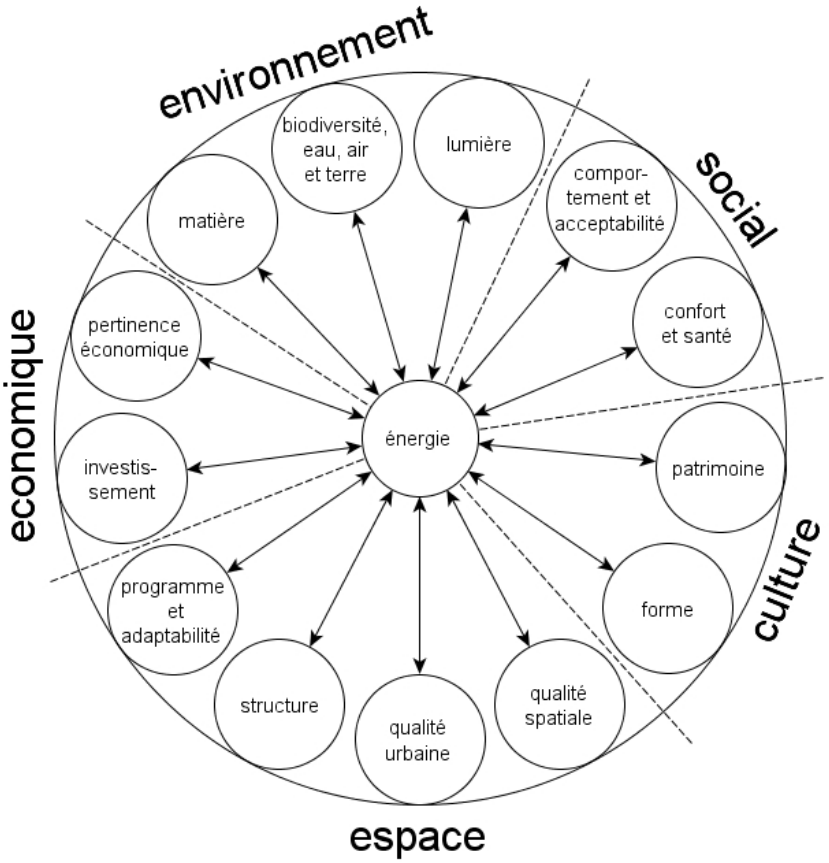


FIGURE 11.1 – Interaction entre l'énergie et les autres dimensions du projet d'architecture

Cependant, l'objectif étant la simultanéité d'une pertinence environnementale, sociale, culturelle et économique, un indicateur partiel n'est pas en mesure de nous éclairer globalement et le résultat de son évaluation est à prendre avec précaution. Or, il nous semble qu'est illusoire la définition d'un système de pondération objective entre la multiplicité des dimensions impliquées dans le choix d'un matériau. Une telle évaluation ne serait faisable qu'à deux conditions : que tous les paramètres considérés soient quantifiables et que cette quantification puisse se faire pour tous les aspects dans une unité commune. Mais comment quantifier la qualité esthétique ou symbolique d'un matériau ou sa capacité à valoriser un savoir-faire local et à se faire vecteur de développement ? Et quelle unité pourrait de façon pertinente rassembler des mesures d'impacts environnementaux et sociaux ou culturels. Diverses tentatives existent, passant par la quantification de risques ou bénéfices strictement environnementaux (logique des éco-points) ou la monétarisation d'impacts sanitaires et environnementaux. Mais ces tentatives impliquent à la fois une difficulté d'évaluation objective et des prises de positions d'ordre éthique (quelle est la valeur d'une année de vie humaine perdue suite à une pollution ?). Ces deux biais génèrent à la fois une incertitude sur les valeurs obtenues et une difficulté d'adhésion à ces méthodes.

Se recentrant sur les seuls impacts énergétiques et environnementaux, est-il envisageable de prendre un contre-pied par rapport à ces démarches d'évaluation quantitative d'impacts ? Une alternative semble possible si l'on se place dans une perspective telle que proposée par l'approche *craddle to craddle* (Brauntgart, 2002). Si le matériau est vu comme un élément matériel *emprunté* pour une durée donnée en vue d'un usage particulier dans une construction, et en supposant que ce matériau puisse être rendu à la fin de cet emprunt dans un état équivalent à celui initial, il n'y a plus lieu de considérer un impact environnemental autre que l'effort de manutention lié à cet emprunt. L'impact intrinsèque de la matière pourrait alors, à la limite, ne plus être pris en compte. Cette idée rencontre deux difficultés. D'une part tout matériau est soumis à une usure, laquelle peut parfois être compensée par un entretien. Cette usure ou entretien devra toujours être considéré dans l'évaluation environnementale. D'autre part, la limitation du stock de matière disponible force à déterminer des usages préférentiels pour les matériaux, la construction pouvant être vue comme concurrente avec d'autres secteurs d'activité. La question du choix du matériau se rapproche ici de celui du vecteur énergétique. Pour toute utilisation de matière dans le bâtiment impliquant soustraction d'une utilisation potentielle dans un autre secteur d'activité, il y aurait donc lieu de calculer un *coût de remplacement*. Ceci fait qu'une évaluation quantitative et qualitative des matières mises en œuvre restera nécessaire dans une approche circulaire de l'usage des matériaux. Il reste néanmoins évident qu'une telle approche pré-

sente un intérêt environnemental évident par rapport à l'exploitation directe des matières premières sans possibilité de réemploi. Ceci renforce notre conclusion du chapitre précédent énonçant que la qualité énergétique et environnementale d'un projet est d'abord liée à des propriétés des matériaux et systèmes : durabilité, disponibilité, possibilité d'entretien, multiplicité d'usages possibles, préservation des propriétés en fin d'usage dans le bâtiment, etc. Les propriétés strictement physiques de la matière (énergie grise, émissions polluantes, résistance thermique, etc.) n'apparaissent que dans un deuxième temps pour déterminer des optimums propres à chaque mode constructif et à chaque projet particulier. Nous sommes cependant aujourd'hui peu outillés pour ce qui relève de l'analyse de ces aspects *non physiques*.

11.1.2 Energie et lumière

Tout comme la relation énergie-matière, la liaison énergie-lumière est évidente. Elle se manifeste au travers de la performance des équipements d'éclairage artificiel et de la valorisation de la lumière naturelle. *A priori*, nous dirions que la performance énergétique demande en hiver l'absence de protection solaire (maximiser les gains énergétiques et la lumière naturelle), tandis qu'en été il faut trouver un compromis entre gains solaires limités et confort lumineux, les uns cherchant la minimisation et les autres la maximisation de l'ouverture de la façade.

Les choses ne sont cependant pas si simples, car le confort lumineux n'est pas lié uniquement à un seuil minimum d'éclairement ou de luminance, mais également à des valeurs maximales et à d'autres éléments tels que la vision vers l'extérieur (Reiter et De Herde, 2004). Olivier Dartevele *et al.* ont étudié l'impact de différents modes de gestion de stores extérieurs dans le cas d'un bâtiment de bureaux passifs (Dartevelle *et al.*, 2011). Bien que de l'avis des auteurs certaines limitations méthodologiques sont à garder à l'esprit (hypothèse d'un store parfaitement diffusant, difficulté à modéliser la complexité du confort lumineux), nous réinterprétons leurs résultats dans la figure 11.2. Cette figure montre que la stratégie de gestion qui minimise les besoins d'énergie thermique (il s'agit de la gestion des stores en fonction de la température intérieure uniquement) est bien celle qui maximise le temps de fermeture des stores - fermeture à peu près tout l'été), tant dans des locaux nord que sud, et qui en conséquence maximise le besoin d'éclairage artificiel et la consommation énergétique globale.

Plus surprenant, cette stratégie présente des *Usefull Daylight Illuminances* (UDI) légèrement plus élevés que les autres, ce qui indique un plus grand

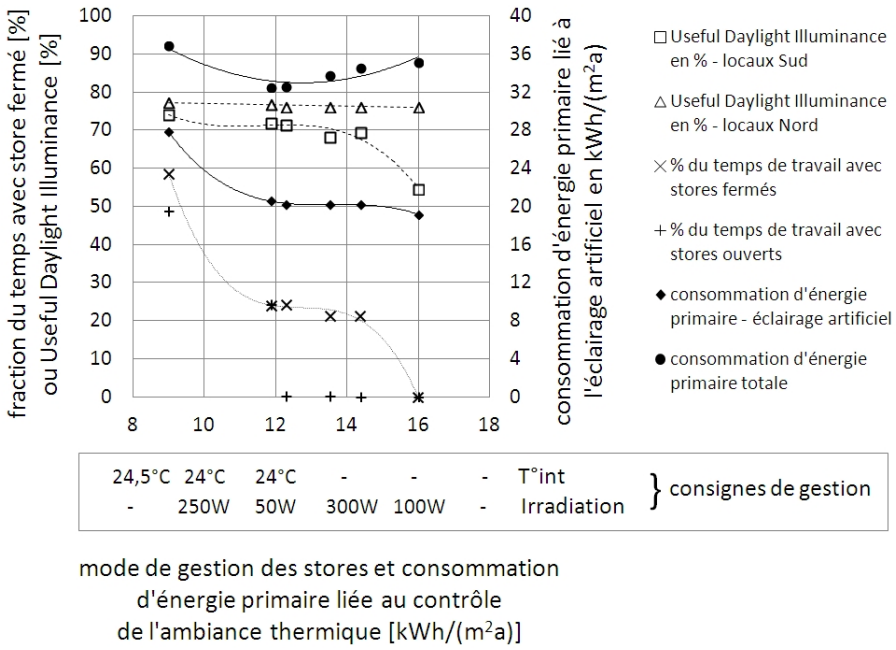


FIGURE 11.2 – Relation entre consommation d'énergie thermique, consommation d'énergie pour l'éclairage artificiel et confort lumineux. Figure reconstruite sur base des résultats de (Dartevelle *et al.*, 2011). A chaque abscisse correspond une stratégie de gestion des stores.

confort en considérant simultanément la quantité de lumière et l'éblouissement. Ceci est dû à la réduction importante des sur-éclairements naturels en été, malgré une augmentation des périodes de sous-éclairement naturel durant la même période, du fait de la fermeture des stores.

Un ensemble de stratégies combinant une gestion sur base de l'ensoleillement ou de l'ensoleillement et la température extérieure montre des consommations d'énergie thermique entre 12 et 15 kWh primaire pour des consommations d'éclairage artificiel autour de 20 kWh primaire et des temps de fermeture des stores supérieurs à 20 % dans les locaux sud. L'absence de stores montre la consommation d'énergie primaire globale autours de 35 kWh pour une part thermique de 17 kWh. Il est à noter que dans ce cas les UDI sont les plus faibles observés, particulièrement au sud. L'absence de store n'est donc pas synonyme de confort lumineux. Le détail de leurs résultats montre que ces locaux sont pendant 30 % de la période d'occupation avec des UDI trop élevés (contre 17 à 20 % pour les stratégies intégrant l'ensoleillement dans la gestion des stores), ce qui traduit un risque important d'éblouissement.

Ces résultats permettent de dire que la minimisation de la consommation d'énergie primaire globale est bien le résultat d'un compromis entre réduction des consommations thermiques et d'éclairage artificiel, et non la minimisation de chacune ; que les consommations primaires d'éclairage artificiel sont significativement plus élevées que celles liées à l'énergie thermique (1 à 3 fois plus élevées pour le bâtiment *Passivhaus* étudié) ; et que la maximisation du confort visuel n'est pas liée de façon évidente avec la minimisation de la consommation d'éclairage artificiel : au contraire, les UDI augmentent avec cette consommation, bien que les durées de fermeture des stores fassent de même.

Ceci illustre la complexité de la notion de confort visuel, qui a été trop simplement associée à la disponibilité de lumière naturelle. L'évolution des concepts théoriques et des outils d'analyse de ce confort semblent nécessaires pour pouvoir avancer dans l'étude de ces relations. En tout état de cause, nous faisons le constat suivant : les besoins énergétiques liés à l'éclairage artificiel des bureaux dépassent aujourd'hui ceux liés à l'ambiance thermique. Ces besoins dépendent essentiellement de la volumétrie du bâtiment (pénétration de la lumière), du dessin de la façade et de la gestion des protections solaires. Les besoins thermiques dépendent de ces mêmes paramètres ainsi que d'autres éléments (constructifs, technologiques ou de gestion). En conséquence, si c'est un optimum global qui doit être recherché, il est néanmoins logique de mettre l'accent sur la disponibilité de la lumière naturelle et le confort visuel lors de la définition des volumétries, façades et protections solaires.

11.1.3 Energie et eau, biodiversité, air et terre

Les thématiques énergie et eau sont essentiellement disjointes. Notons néanmoins qu'elles se croisent lorsque l'eau devient une source d'énergie, notamment au travers de techniques de geocooling, de refroidissement adiabatique ou de valorisation par pompes à chaleur. Dans ces cas, l'approche énergétique peut être consommatrice d'eau, modifier des écoulements ou créer des modifications qualitatives de l'eau utilisée (variation de température, risque de pollution). Il est évident que toute utilisation de l'eau dans les techniques de production d'énergie sous forme thermique devrait se faire sans perte de qualité de cette eau.

Les thèmes énergie et biodiversité sont assez éloignés à l'échelle du bâtiment. Tout au plus identifie-t-on une concurrence entre des dispositifs tels que les capteurs solaire et des mesures de maximisation de la biodiversité comme les toitures végétalisées. A une échelle plus large par contre les deux enjeux se croisent beaucoup plus fortement : puisque le choix de combustibles végétaux augmente la pression sur les ressources forestières et agricoles, l'approche énergétique se profile comme un facteur de stress possible pour le maintien et le développement de la biodiversité. La question de la capacité des ressources forestières et agricoles à répondre aux demandes énergétiques est abordée dans le chapitre 4.

La liaison avec l'air et la terre pose la question des pollutions engendrées par l'utilisation d'énergie, selon la source d'énergie utilisée. Nous présentons dans le tableau 11.1 un inventaire de ces émissions. Pour la validité de la comparaison, nous ne reprenons les valeurs que d'une source (Oeko Institute, 2009). Ces valeurs représentent un cycle complet (l'extraction, le transport, le conditionnement en plus de la combustion). Il y apparaît l'intérêt évident du bois en termes d'émissions de CO_2, mais le comportement moins intéressant de ce combustible pour les autres émissions. Le gaz apparait systématiquement plus propre que le fioul et l'électricité, mais c'est sans compter les techniques de pompe à chaleur. Mais les émissions reprises dans ce tableau ne sont cependant pas exhaustives. N'y apparaissent pas la production de déchets radioactifs par exemple, ou une série de pollutions lies à la combustion du bois (acroléine, formaldéhyde, CO, COV, dioxines et furanes (Pieret, 2009)) et partiellement liées à son caractère solide qui diminue la qualité de la combustion, ou encore les émissions liées au traitement des fluides frigorigènes des pompes à chaleur, etc. Il n'est en outre pas aisé de proposer une pondération entre ces différentes pollutions, pour les raisons évoquées à propos de la relation énergie-matière. Il semble donc difficile à ce jour d'établir clairement une hiérarchie des combustibles sur base de leurs émissions. Nous présentons par contre dans la section

4.2 une discussion sur les différentes ressources énergétiques en fonction de leur disponibilité. La notion d'exergie utilisée dans la section 10.3 permet également d'établir une hiérarchie thermodynamique entre les formes d'énergie disponibles pour un usage particulier.

TABLE 11.1 – Pollutions émises par les différentes sources d'énergie (Oeko Institute, 2009)

source d'énergie	émission de CO_2 [g/kWh$_{PCI}$]	émission de NO_x [mg/kWh$_{PCI}$]	émission de SO_2 [mg/kWh$_{PCI}$]	émission de poussières [mg/kWh$_{PCI}$]
électricité réseau belge	247	459	392	15.4
gaz naturel	235	140 (chaudière modulante)	111	4.8
fioul domestique	327	244 (chaudière non low NO_x)	600	27
bois pellets	46.7	344	472	132
bois bûches	22.4	235	320	
bois plaquettes				189

11.2 Dimensions sociales

11.2.1 Energie, confort et santé

Le souhait de confort est la raison première de la consommation énergétique des bâtiments. La définition de cette notion est donc cruciale. Ces aspects physiologiques ont fait l'objet de nombreuses études avant d'être complétés par une contextualisation psychologique et comportementale au travers de la notion de confort adaptatif. Nous y faisons écho au chapitre 5. Il est évident qu'une approche de performance énergétique doit être basée sur la meilleure compréhension possible de la notion de confort thermique, pour éviter toute utilisation superflue d'énergie. La dimension comportementale du confort thermique suggère une réflexion possible sur le rôle de l'occupant dans la conduite des dispositifs énergétiques actifs ou passifs.

Nous identifions trois axes de réflexion pour questionner aujourd'hui la notion de confort. Le premier est l'intégration du confort thermique dans une notion plus large de confort d'habiter, à savoir la satisfaction globale d'un individu au regard de ses lieux de vie. Il n'est pas dit que cette satisfaction implique le maintien à tout moment du confort thermique tel qu'envisagé traditionnel-

lement de façon isolée. Nous ne développerons cependant pas cette idée plus avant dans cette thèse, si ce n'est en écho dans le chapitre traitant de la notion de relation Homme-Monde (chapitre 12).

Le deuxième axe de réflexion est celui de la différence existant entre les notions de confort et de salubrité. Jusqu'ici, la liaison entre l'énergie et la santé a été abordée à deux niveaux. D'abord, les cas de sick building syndrom ont mis en évidence les risques sanitaires liés aux mauvaises conceptions et/ou entretiens des installations de contrôle climatique (Wargocki *et al.*, 2002). De telles dérives sont inacceptables dans une architecture soutenable. Elles plaident pour une mesure du risque et une politique d'accompagnement notamment face à la généralisation des installations de ventilation mécanique domestiques. Ensuite, énergie et santé ont été liées au travers de la notion de précarité énergétique que nous abordons par ailleurs (voir chapitre 4). Nous pensons qu'entre le maintien de conditions de confort thermique telles que comprises aujourd'hui et le seuil de précarité énergétique il existe un espace, qui est celui de la remise en cause de la notion de confort thermique, ou du partage de responsabilité face à la consommation d'énergie liée au franchissement de cet espace. Nous proposons dans la section 11.6 une mesure de cet espace et démontrons la faisabilité du maintien, dans certaines conditions, de conditions intérieures salubres en hiver sans utilisations d'énergie pour le chauffage. Il en découle une proposition de partage de responsabilités entre concepteurs et occupants face à un objectif de minimisation des consommations énergétiques.

Le troisième axe de réflexion est de considérer la situation de précarité énergétique comme point de départ dans la conception de projets d'architecture. Cette prise de position traduit le principe de précaution : Nous ne sommes pas en mesure de prévoir ce que seront les conditions économiques dans un horizon de temps correspondant à la vie d'un bâtiment, aussi devons nous considérer les avenirs possibles et agir en fonction. On retrouve cette idée dans l'intervention de Giancarlo Mazzanti lors de la remise des Global Award 2010 : "Ce que l'on conçoit doit être au service des besoins quotidiens des gens humbles. S'il y a adéquation avec les matériaux qu'ils utilisent, avec leur environnement et leurs tâches journalières, alors ce ne peut être que beau" (Contal et Revedin, 2011). Considérer aujourd'hui que l'habitant futur risque d'être en situation de précarité lors de son occupation du bâtiment implique de prendre en compte différents aspects :

- la nécessité de minimiser le report dans le temps de l'investissement (charge d'emprunt). Cet aspect est discuté plus bas dans la section 11.5 traitant de la dimension économique.
- l'*a priori* d'une incapacité de l'habitant à assumer l'ensemble de ses be-

soins en énergie, et l'établissement par ce dernier de priorités dans les usages de l'énergie (cuisiner avant se chauffer, etc.). Nous renvoyons à la littérature spécialisée pour identifier quelles peuvent être ces priorités, en pointant que leur anticipation n'est pas évidente car liée à de multiples paramètres culturels et sociaux et que les stratégies d'adaptation purement spatiales semblent à ce jour peu documentées. En tout état de cause, on peut supposer que le chauffage permanent de l'ensemble des locaux figurera rarement parmi les priorités. En conséquences, il faut concevoir des logements qui permettent, outre une limitation drastique des déperditions énergétiques, une différenciation des ambiances entre locaux (possibilité de constituer des locaux refuges, de réduire temporairement la surface habitée), une gestion par l'habitant de son apport de chaleur, une valorisation maximale (par collecte et temporisation) des formes d'énergies gratuites telles que les gains solaires.

– étendue à une échelle collective, l'idée de précarité pourrait se traduire par le risque d'interruption d'alimentation électrique. Dans cette optique, certaines technologiques pourraient être à considérer, telle que des capacités de ventilation naturelle temporaire, des formes de chauffage d'appoint et de production d'eau chaude ne nécessitant pas d'électricité (poêles biomasse), voir des capacités de stockage à court terme d'énergie photovoltaïque.

11.2.2 Energie, acceptabilité et comportement

La performance théorique d'un choix ou dispositif n'entraine pas de facto son acceptation ou celle de ses conséquences. Ceci risque de pénaliser fortement les performances réelles des dispositifs et les choix retenus. Il y a donc un lien à étudier entre l'énergie et l'acceptabilité des dispositifs. Cela a des conséquences en termes de méthodologie de sélection des dispositifs et au niveau de leur conception même, qui doit faciliter cette acceptation et éviter les effets rebonds. Ces aspects sont abordés au chapitre 13 traitant de questions de méthodologie.

Outre l'acceptabilité et le bon usage des dispositifs mis en place, les expériences récentes de comparaison à grande échelle des performances énergétiques théoriques et réelles des bâtiments montrent que la liaison entre celles-ci est faible (figure 11.3) (Itard *et al.*, 2012). Outre les questions que ce constat soulève quant à la justesse des hypothèses faites pour l'évaluation théorique, ces résultats suggèrent l'existence de phénomènes échappant à la physique du bâtiment et relevant du comportement. Non seulement un effet rebond existe dans les bâtiments supposés très performants, mais des comportements adap-

tatifs sont présents dans les bâtiments les moins performants. L'ampleur de ces comportements est telle que l'impact réel des stratégies de performance énergétique peut être remise en cause. Se pose notamment la question de la mesure correcte de l'intérêt économique et environnemental effectif de ces mesures. Il est indispensable aujourd'hui de s'intéresser en profondeur aux aspects comportementaux face à l'énergie et à la liaison architecture-comportement, pour atteindre une performance énergétique réelle des bâtiments habités.

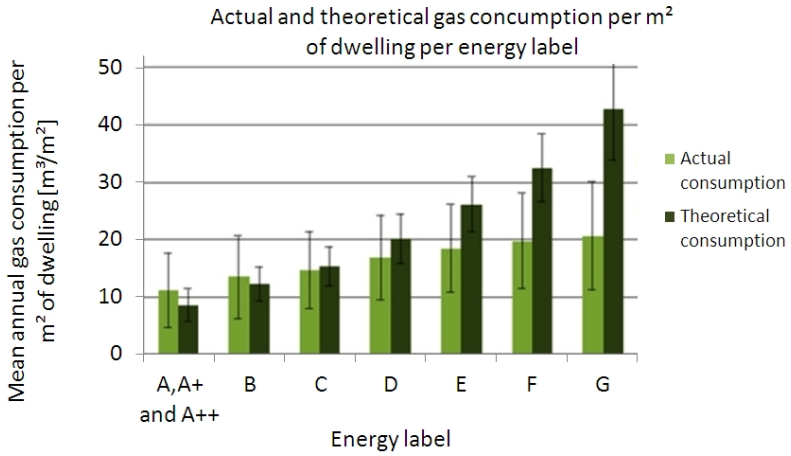


FIGURE 11.3 – Comparaison des performance énergétiques théoriques et réelles d'un échantillon de presque 200000 logements aux Pays-Bas (Itard *et al.*, 2012)

11.3 Dimension culturelle

11.3.1 Energie et forme architecturale

La recherche d'une pertinence culturelle fonde la dimension non technique de l'architecture. Si l'on considère que les enjeux environnementaux relèvent d'une révolution paradigmatique (Morin, 2007), un projet ne sera pertinent que pour autant qu'il assume une position relativement à ces enjeux. Nous avions déjà évoqué cette idée dans le développement du principe de pertinence de Jean-Louis Le Moigne (chapitre 9).

Il nous semble cependant difficile de trouver des axes pour penser la dimension énergétique au départ de cette liaison à la dimension culturelle. La performance énergétique et environnementale doit devenir une qualité fondamentale de l'architecture indépendante des styles architecturaux. En d'autre terme, elle doit permettre l'heuristique d'une multiplicité de langages. Nous

considérons que l'intégration des questions énergétiques et environnementales ne doit pas mener à un déterminisme de la conception architecturale. A ce titre, l'appel de James Wines au développement d'une iconographie environnementale ne nous semble pas devoir être suivi sur le long terme (Wines, 2002).

Mais si les questions énergétiques ne doivent pas figer les formes possibles de l'architecture, il est tout autant vrai que la qualité énergétique prise comme élément d'architecture a un impact formel. Nous invitons donc les auteurs de projet à s'interroger avec recul sur les questions énergétiques et à développer un langage cohérent avec les dispositifs et enjeux que cette question suggère. Les bâtiments intégrant ces questions en profondeur auront donc *a priori* des caractéristiques particulière, reflets des principes fondamentaux de la qualité énergétique. Citant le professeur Yannas nous pouvons, sur base de l'expérience acquise notamment par l'architecture bioclimatique, pointer la réponse dynamique des formes aux rythmes climatiques comme un principe fondamental de la qualité énergétique des bâtiments (Yannas, 2011). Ce principe est à l'évidence générateur d'une multiplicité de langages.

11.3.2 Energie et patrimoine

Un autre pan de la relation entre énergie et pertinence culturelle est lié aux questions de patrimoine. Il est délicat de parler d'intervention sur l'existant sans réaliser de réels projets d'architecture. Or, il n'est pas dans notre intention de développer dans cette thèse des exemples concrets. Nous nous limiterons donc ici à mettre en évidence l'idée que la rénovation énergétique pourrait être associée aux enjeux de précarité énergétique et de remise en cause du mode de vie de la façon décrite ci-dessous.

Nous pointons au chapitre 4 l'ampleur de la question de précarité énergétique. Il est évident qu'une partie de la réponse à cet enjeu social passe par la rénovation du bâti. De même, une réduction globale des consommations d'énergie implique une action massive et très ambitieuse sur le parc de bâtiment existant. La logique économique et fonctionnelle veut que les rénovations de bâtiment soient entreprises de façon globale (les interventions partielles provoquant des risques de désordre tels que le manque de ventilation ou la présence de ponts thermiques) et ambitieuse (c'est dès la première rénovation qu'il faut viser un niveau de performance *juste*) (Sidler, 2013). Mais la rénovation des logements concentrent plusieurs difficultés notamment économiques (abordées plus loin) et sociales, particulièrement pour les logements des populations précarisées. Il semble évident que les opérations de rénovations doivent viser une ambition très grande tout en étant pensées en fonction des besoins et

des modes de vie des habitants. L'intégration des habitants au processus décisionnel semble donc indispensable, de même qu'une approche pragmatique en termes de solutions techniques privilégiées, de capacités d'auto-construction, de phasage et de stratégies d'adaptations comportementales.

D'autre part, de nombreux conflits existent entre conservation d'un patrimoine et performance énergétique. Quelques exemples de questions posées sont : Comment intégrer des techniques actuelles dans un patrimoine ancien ? Comment juger de la valeur de ce patrimoine ? Quelle valeur patrimoniale accorder aux conditions d'ambiance que proposaient ces bâtiments, et au mode de vie auxquels ils correspondaient ? Cette dernière question nous semble particulièrement importante. Elle peut s'étudier dans le sens d'un archéologie des ambiances, mais également dans un sens plus prospectif de discussion sur le mode de vie actuel et futur. Nous pensons qu'une part des questions posées par la rénovation énergétique de bâtiments patrimoniaux vient du souhait plus ou moins explicite de bénéficier dans ces bâtiments de conditions thermiques correspondant à la définition actuelle du confort. Une façon de faire avancer ces thèmes pourrait alors être d'intégrer les ambiances et modes de vie comme des variables et non comme des données définies *a priori*. Nous indiquons par exemple dans la section 11.2 que la conception architecturale pourrait remettre en cause l'uniformité des ambiances intérieures pour répondre aux situations de précarité énergétique. Cette position peut suggérer une architecture de *boite dans la boite* qui change radicalement la question de l'intervention sur du bâti existant, en particulier le besoin d'intervention sur la façade.

11.4 Dimensions spatiales

11.4.1 Energie, structure et qualité spatiale

L'énergie et la structure nous semblent entretenir un parallélisme assez fort dans la mesure où ces deux questions se matérialisent entre autre par des systèmes de transferts (d'énergie et de fluide d'un côté, de charges et de matière de l'autre) et recourent aux notions de continuités verticales et horizontales (nappes et trémies face à portées et reprises de charge). Si la structure portante est un élément générateur d'architecture reconnu depuis toujours, la conception énergétique et particulièrement celle des techniques de transfert de fluides et d'énergie l'est beaucoup moins. Or, le développement par exemple des ventilations mécaniques dans les logements ouvre la porte à une prise en compte plus poussée des réseaux comme élément de conception. Mettons ici en évidence le travail de Reyner Banham qui démontre par l'exemple et l'analyse historique la force de la liaison entre techniques et espaces (Banham, 1984), et

la thèse de Philippe Gruloos qui aborde la question de la liaison des techniques F&E et de la conception architecturale sous un angle systémique (Gruloos, 1996). Cette thèse met en évidence la place de ces systèmes dans l'agencement général des éléments d'un bâtiment et analyse différents exemples présentant une intégration forte de ces systèmes dans la logique générale du projet. Ce faisant, elle démontre la capacité des systèmes F&E à participer à la constitution d'un projet d'architecture.

Outre les systèmes et leur capacité à suggérer une organisation spatiale, les questions énergétiques se manifestent par des sensations thermiques constitutives d'ambiances. La création de ces ambiances participe à la définition de l'identité des lieux et donc à la qualité des espaces. Les notions d'espaces de transition ou de locaux-refuges sont des traductions de cette relation ambiance thermique-espace qui a peut-être été un peu oubliée face au développement des techniques de chauffage central et de climatisation. Les concepteurs n'ont probablement aujourd'hui que peu le réflexe de définir les ambiances thermiques des différents espaces de leurs projets, au-delà de la référence peu subtile aux températures de dimensionnement proposées par les normes de confort. Cet oubli dans la conception des qualités pouvant être portées par les ambiances thermiques nous semble regrettable dans la mesure où elles pourraient participer à un effort de redéfinition de la relation entre l'homme et son milieu physique. Or une telle redéfinition nous semble nécessaire au développement d'une société soutenable. Nous revenons sur ces points dans le chapitre 12.

11.4.2 Energie et qualité urbaine

La question de l'échelle spatiale est importante pour les aspects énergétiques, ne serait-ce que parce qu'elle modifie le panel de technologies disponibles (par exemple pour le renouvelable : photovoltaïque à l'échelle d'une parcelle, réseaux de chaleur géothermique à l'échelle collective, parc éoliens à l'échelle publique). La question d'échelle et d'articulation d'échelles est bien évidemment tout autant présente en architecture. Nous voyons différentes façons dont les échelles de l'énergie pourraient avoir un impact sur l'architecture :

- Par la question de la multiplicité des échelles.
  L'échelle de réflexion pour les économies d'énergie dans le bâtiment était traditionnellement celle de l'immeuble (niveau K, orientation, compacité). Aujourd'hui, suite à l'implémentation des directives européennes sur la performance énergétique, l'immeuble est décomposé en unités fonctionnelles (valeur E par logement). A l'avenir, nous plaidons au

travers de la notion d'identité climatique pour une granulométrie encore plus fine de la réflexion énergétique, qui se ferait espace par espace (voir section 12.2.1). A l'inverse, les questions de climatologie urbaine et de transformation des ambiances extérieures par les bâtiments sont devenues un objet d'étude important, tout comme l'échelle encore plus large des réseaux, par leurs aspects technologiques et de gestion (*smart grids*). La réflexion énergétique fait donc face à une multiplication des échelles de travail et à une difficulté d'intégration des influences de chaque échelle sur les autres : comment le bâtiment producteur d'énergie s'inscrit-il dans un réseau ? Quelle influence du microclimat sur le climat intérieur et vice-versa, quel rôle de délestage du réseau énergétique pour les bâtiments en cas de pic de production, quelle performance thermique d'une enveloppe pour maximiser la rentabilité d'un investissement en production renouvelable ? Entre des influences plus larges et un redécoupage interne, il semble que l'échelle de la réflexion énergétique ne soit plus nécessairement celle du bâtiment. Il est par ailleurs possible qu'il ne faille plus penser l'énergie à une certaine échelle, mais en termes de relations entre des lieux individuels et des réseaux ou climats. Explicitons cela par l'exemple suivant : jusqu'ici, un immeuble est considéré comme une unité, délimitée par une enveloppe isolante, soumise à des variations climatiques dont elle souffre ou profite selon les cas. Les dérives de climat intérieur liées à ces variations sont compensées par l'utilisation d'une quantité d'énergie qui, quelle que soit sa source (citerne de fuel de grande capacité, réseau de gaz, réseau électrique, etc.), est supposée disponible à tout moment. Cette vision laisse peu de place à des gradients temporels ou spatiaux de conditions d'ambiance dans le bâtiment. Une vision plus en phase avec la réalité à venir est celle d'un bâtiment constitué d'un ensemble d'espaces soumis de différentes façons à un climat variable et ne disposant d'accès à des formes d'énergies qu'à mesure de leur production sur le site ou à proximité, compte tenu de capacités de stockage limitées. Entre ces deux dynamiques (le climat et l'approvisionnement limité en énergie), chaque espace voit ses conditions d'ambiance évoluer dans le temps en fonction de paramètres constructifs et d'occupation propres et des priorités des habitants en terme d'allocation de l'énergie disponible. Ceci crée nécessairement une multiplicité d'ambiances intérieures. De nouveaux outils méthodologiques pourraient découler de cette vision, centrés sur l'évaluation de la synchronisation dans le temps et l'espace entre des ressources et des besoins. Cette idée est différente de celle de l'intégration des variables climatiques prônée depuis quelques décennies, car d'une part elle élargit l'aspect dynamique aux ressources autres (électricité, chaleur, etc.) en ne supposant pas la disponibilité constante d'un

combustible, et d'autre part elle intègre l'idée de modulation des besoins en fonction des ressources.

– Par la question de l'action collective.
  Cette action peut être vue de deux façons, comme opportunité d'élargissement de la capacité d'action, ou comme mesure de compensation d'une diminution de cette capacité. L'échelle de l'îlot ou du quartier est pertinente pour des stratégies de partage de moyens de production d'énergie, notamment géothermique ou de cogénération. Cette mise en commun peut être conçue dans une approche uniquement technologique, mais pourrait également être le support de la constitution d'un lien social. Les exemples d'habitats groupés constitués au départ de questions énergétiques illustrent également en quoi cette préoccupation peut faire germer des nouvelles formes de collectivités. Il est évident que l'architecture peut être utilisée comme amplificateur de ces démarches. Les questions de la qualité des espaces collectifs et de la gestion de la transition entre public, collectif et privé sont fondamentales en architecture et pourrait être alimentées par cet aspect énergétique. L'autre façon de voir l'action collective vient de l'idée d'une possible précarisation croissante d'une partie de la population. Les éléments avancés au chapitre 4 sur les questions de précarité énergétique et de raréfaction des ressources justifient cette idée. Une mesure d'adaptation probable face à cette précarisation est la réduction des surfaces par personne (soit par cohabitation, soit par condamnation de locaux, soit par construction de logements plus petits). Notons que la modification des formes d'habitat, allant à contre courant de l'étalement urbain et de l'isolement des personnes pour revaloriser la densité et l'échelle collective est une piste majeure de réponse non seulement à la précarité énergétique, mais aussi à la nécessaire réduction des émissions de CO_2. Une enquête statistique menée en France montre qu'une personne isolée émet en moyenne 10685 kg_{CO_2}/an contre seulement 4612 pour un membre d'un ménage de quatre personnes (Mercier *et al.*, 2011). Pour accompagner cette réduction des surfaces par habitant et cette revalorisation de la cohabitation, le développement d'espaces collectifs de qualité sera nécessaire. Cette idée peut être illustrée par les espaces collectifs accompagnant la densité importante de l'unité d'habitation de Marseille.

11.4.3 Energie, programme et adaptabilité

Les questions programmatiques et d'énergie sont liées de deux façons. D'une part le programme peut ne pas être adéquat car stéréotypé, ce qui pose des difficultés d'appropriation et donc de bonne gestion, notamment énergétique. Ceci nous ramène une nouvelle fois aux questions d'appropriation, de

comportement et donc d'intégration de l'occupant dans la conception. Ce dernier aspect est développé dans le chapitre 13 traitant des méthodes de travail. D'autre part le programme est en soi une question d'énergie au travers de la notion d'adaptabilité. Cette notion d'adaptabilité, que nous utilisons dans un sens plus large que la seule question programmatique, renvoie au principe de précaution et d'incertitude scientifique. Ce principe invite à intégrer l'incertitude face à des avenirs hypothétiques, ce qui peut se traduire de deux façons. D'une part, on peut réaliser des espaces qui de par leur conception spatiale et constructive permettront relativement aisément des interventions ultérieures. Nous parlerons alors de flexibilité des espaces. D'autre part, on peut réaliser des espaces qui offrent dès leur conception des conditions favorables à diverses occupations et qui, sans ou avec peu d'interventions, conserverons cette capacité dans des contextes nouveaux. Nous parlerons alors de résilience des espaces.

Nous pensons qu'il n'y a pas lieu d'opposer ces deux approches. Leur pertinence relative peut varier selon les contextes, et leur combinaison est nécessaire pour construire une analyse rigoureuse de l'adaptabilité des espaces et modes constructifs. Par contre, l'idée de concevoir un bâtiment comme un objet statique optimisé pour un contexte présent nous semble incompatible avec le respect du principe de précaution.

La flexibilité est une réponse au principe de précaution qui suppose deux choses : une incapacité à anticiper aujourd'hui le sens des évolutions à venir et la perpétuation dans le temps d'une capacité d'intervention. En ce sens, c'est un non-engagement basé sur une capacité absolue de retour en arrière et un report vers l'avenir de la responsabilité d'adaptation. Cette capacité est néanmoins facilitée aujourd'hui par l'intégration de dispositifs allégeant le poids futur de cette responsabilité.

A l'inverse, la résilience implique l'établissement d'hypothèses quant aux évolutions des contextes et la mise en place aujourd'hui des dispositifs d'atténuation des effets de ces évolutions. Cette prise de responsabilité aujourd'hui ne postpose pas de responsabilité d'action mais est tributaire de la qualité des hypothèses d'évolutions des contextes. A titre d'exemple, face à une hypothèse d'augmentation des risques d'inconfort estival dans les bâtiments, une mesure en flexibilité sera de prévoir lors du dessin d'une menuiserie l'emplacement du caisson d'une toile solaire extérieure, tout en postposant l'installation de cette toile, dont le besoin impérieux ne se fera peut-être sentir que quelques années plus tard. Face à la même situation, une mesure de résilience sera de déterminer une combinaison ouverture solaire-inertie thermique assurant le confort à la fois aujourd'hui et dans une hypothèse de climat modifié.

Une autre illustration de cette question peut être trouvée dans l'opposition souvent avancée entre les dispositifs dits passifs et actifs. Les solutions passives, bien que souvent plus lourdes à l'investissement sont présentées comme préférables car, entre autre, non soumises à des pannes ou contraintes d'entretien, ce qui est une garantie de conservation de performance. Ces mesures relèvent d'une approche basée sur la résilience. Cette pérennité est-elle effectivement constatée ? L'entretien réduit n'empêche-t-il pas la détection de dégradation lentes mais inexorables ? Et si c'est le cas, est-il alors encore possible d'intervenir ? Prenons l'exemple du mur creux dont l'isolation dans la coulisse, supposée pérenne, peut se dégrader dans le temps sans possibilité de contrôle ni d'intervention aisée. A l'opposé, les solutions dites actives nécessitent généralement un entretien régulier, sont soumises à des pannes et usures, et semblent donc moins fiables. Mais leur flexibilité permettant des remplacements réguliers n'est elle pas aussi garantes du maintien des performances, voire de leur possible amélioration si une technique plus performante apparait ? La souplesse des techniques actives peut dans certain cas générer un avantage à terme.

Les notions de flexibilité et de résilience, et leur lien avec la dimension énergétique, peuvent donner lieu à de nombreux développements. Ceux-ci vont de la définition d'indicateurs de flexibilité et de résilience face aux variations climatiques, technologiques ou comportementales à la mesure de l'incertitude des qualités attendues d'un projet (voir à ce sujet la section 13.1.4) ou à la validation de modes de conception et de construction appliquant ces concepts. Ces développements débordent du cadre de cette thèse. Nous nous intéressons par contre dans la section 11.7 à la notion de flexibilité programmatique et à son impact énergétique. Nous y montrons que l'idée d'une flexibilité totale des espaces de bureau, telle que parfois rencontrée dans les opérations de promotion immobilière, génère des surconsommations d'énergie. Nous montrons par comparaison l'avantage notamment énergétique qu'il y a à viser une *flexibilité raisonnée*.

11.5 Dimensions économiques

11.5.1 Temps de retour et analyse du coût du cycle de vie

A ce jour, il est presque systématiquement demandé de justifier la pertinence économique d'un investissement permettant une économie d'énergie. Il convient de différencier pertinence économique et rentabilité. La première vise à s'assurer du bien fondé d'un choix, la seconde à mesurer un bénéfice

économique. Il s'agit de deux questions différentes. La rentabilité a trait à des paramètres techniques (investissements initiaux et différés, évolution dans le temps des économies, y compris les frais d'entretien), mais également à des paramètres commerciaux (argument commercial et d'image, sensibilité du public d'acheteur, etc.), et s'évalue au regard d'une échéance propre au décideur. La pertinence économique est plus intrinsèquement liée au dispositif étudié. Il sera jugé pertinent si le bénéfice cumulé qu'il a permis au terme de son cycle de vie est jugé satisfaisant au regard de l'investissement initial consenti. Les méthodes dites d'analyse de coût du cycle de vie (LCC pour *Life Cycle Cost*) développées aujourd'hui peuvent être utilisées pour identifier un choix maximisant la rentabilité d'un investissement (Davis *et al.*, 2005). Mais il nous semble que leur capacité à prendre en compte l'entièreté d'un cycle de vie les lie plus naturellement à la notion de pertinence économique.

Quel que soit l'objectif de l'évaluation, les résultats de ces méthodes d'analyse économique souffrent néanmoins d'une grande incertitude liée à la nécessité de poser des hypothèses délicates (taux d'actualisation et évolution du coût de l'énergie notamment). En outre, elles n'internalisent pas entièrement les conséquences sociales et environnementales que les crises liées à l'énergie vont induire, sauf à supposer que ces coûts soient entièrement reflétés par l'évolution du coût de l'énergie. Enfin, ces méthodes supposent la continuation de tendances régulières, notamment le maintien dans le temps des prestations fournies et n'intègrent pas de crises, telles que la rupture d'approvisionnement d'une forme d'énergie, ou une perte de revenu de l'occupant par exemple. Ceci nous amène à considérer les analyses LCC comme un outil affinant l'évaluation économique par rapport au simple *temps de retour sur investissement* mais dont les limitations doivent être reconnues.

Une autre critique de ces analyses économiques est qu'elles visent se limitent à confronter un investissement et un coût de fonctionnement pour un service jugé équivalent. Ces analyses se résument donc à la réduction et à la distribution optimale dans le temps d'un coût total (équation 11.1). Cette approche néglige la liaison entre performance énergétique et comportement, rappelée par l'équation 11.2. Cette liaison est généralement négligée, d'une part parce que difficilement quantifiable, d'autre part parce que le confort est supposé devoir être atteint indépendamment de la technologie étudiée. Cette omission est battue en brèche par le phénomène connu d'effet rebond, et par l'existence de stratégies adaptatives dont l'existence est suggérée par la figure 11.3. En outre, si nous partons de l'idée que l'énergie relativement bon marché disparaîtra à court terme, c'est à dire durant la durée de vie des bâtiments conçus aujourd'hui, la relation entre coût énergétique et niveau de service demandé va se renforcer. Dans une certaine mesure, les formes d'énergie les

plus onéreuses et les technologies les moins performantes induiront une pression plus importante sur les comportements qui atténuera l'augmentation des charges. Il est donc méthodologiquement délicat aujourd'hui de réaliser des études économiques à long terme sans intégrer ces relations peu documentées. Il semble donc important de lancer des recherches approfondies sur les motivations des investisseurs et habitants par rapport aux dispositifs énergétiques.

$$cout = invest. + \int_{vie} (energie + entretien) \quad (11.1)$$

$$cout_{corrige} = invest. + \int_{vie} (energie(confort) + entretien) \quad (11.2)$$

Nous pouvons faire l'exercice de renoncer à réaliser ce type de calculs, et prendre l'hypothèse que les contraintes économiques futures seront telles que les habitants vont de facto, quand ils le peuvent, renoncer à l'usage d'énergie. La question devient alors celle du niveau d'investissement nécessaire aujourd'hui pour assurer des conditions de vie raisonnables à l'avenir dans un tel contexte. Or, la nécessité d'un investissement important freine la diffusion de technologies permettant l'économie d'énergie, particulièrement auprès des publics fragilisés. Deux pistes sont alors envisageables : la réduction de l'investissement ou sa dispersion dans le temps.

La réduction de l'investissement (piste 1) implique de chercher à développer des solutions à faible coût ou permettant des économies d'investissement par ailleurs. La distinction entre dispositifs spatiaux et technologiques faite à la section 10.2.2 peut être revue à la lumière de cette question. Tout dispositif technologique (actif ou passif) est susceptible d'être évalué en termes de performance économique, tout comme il peut l'être en termes énergétiques. Les dispositifs spatiaux peuvent par contre être considérés gratuits, s'ils n'impliquent pas d'augmentation de la quantité de matière à mettre en œuvre. Se pose cependant la question de l'évaluation de la pertinence de ces dispositifs, tant pour la guidance lors de la conception que pour leur valorisation économique. Les méthodes de modélisation du comportement physique des bâtiments sont aujourd'hui suffisamment poussées que pour réaliser de telles évaluation, soit par la comparaison d'alternatives spatiales clairement identifiées (évaluées à niveau d'occupation et pour des modes constructifs équivalents), soit par comparaison à des valeurs moyennes par typologie qui à ce jour font défaut, mais pourraient dans une certaine mesure être déduits des procédures de certification PEB des bâtiments neufs et existants. Pour les dispositifs technologiques, une réduction de l'investissement passe inévitablement par un transfert de coûts entre les postes liés à la performance énergétique, ou entre

ceux-ci et ceux liés à d'autres dimensions (type de matériau, surface habitable, etc). La remise en cause du chauffage central par exemple, au bénéfice d'une production de chaleur localisée à un nombre très réduit de locaux offre une piste de réduction de l'investissement évidente au prix d'une perte de confort relative dans les locaux non directement chauffés. Le standard *Passivhaus* a approché cette idée dans sa gestation, mais l'expérience des maisons conformes au standard *Passivhaus* en Wallonie et à Bruxelles suggère que les habitants et concepteurs n'ont pas pleinement intégré les conséquences possibles de cette idée. En effet ces maisons disposent souvent d'un apport de chaleur par la ventilation ou un réseau hydraulique dans les séjours et les chambres, ainsi que d'un appoint dans la salle de bain. Elles restent dès lors proches de l'idée du chauffage central. Élargissant la réflexion à d'autres aspects de la conception, le transfert d'investissement passe en promotion par la redéfinition des priorités dans l'esprit des concepteurs et de la possibilité de valoriser ces priorités auprès des acheteurs. Les choses sont plus complexes dans les projets individuels, généralement soumis à des contraintes budgétaires fortes ne permettant pas toujours de transferts d'investissements sans renoncement important à une forme de confort (spatial, visuel, d'usage…).

La dispersion de l'investissement dans le temps (piste 2) prend généralement la forme d'un emprunt. Or, les charges de l'emprunt à intégrer dans l'analyse de coût sur le cycle de vie diminuent la pertinence économique des investissements. Un autre désavantage de l'emprunt par rapport au maintien de charges énergétiques élevées est que l'emprunteur est lié à un organisme de crédit sans réelle possibilité de souplesse en cas de difficulté économique. A contrario, le particulier qui fait face à des charges énergétiques trop élevées dispose d'une possibilité de souplesse par des mesures adaptatives et un renoncement à son niveau de confort. Cet argument de souplesse ne doit pas être négligé dans un contexte économique incertain. Celui qui se lie par un emprunt n'est plus maître de ses charges pendant parfois plusieurs décennies, tandis que celui qui n'investit pas dispose toujours d'une porte de sortie par un changement de comportement. Aussi, d'autres formes de dispersion de l'investissement n'impliquant pas d'emprunt devraient être envisagées. Nous identifions la dispersion entre acteurs, et la dispersion dans le temps sans relation d'emprunteur.

La dispersion entre acteurs est basée sur la mise en commun des ressources à un moment particulier. Cette approche se retrouve lors de la création d'habitats groupés ou à une échelle plus large lors de la conception d'éco-quartiers. Les habitats groupés (quelques familles) permettent des économies d'échelle au niveau des frais administratifs et d'études, le partage d'équipements (buanderie, véhicule…) et éventuellement une plus grande mise en concurrence

d'entreprises lors de la construction. Outre ces avantages, les éco-quartiers permettent l'accès à des technologies spécifiques à des échelles plus larges, telles que la valorisation énergétique des déchets ou à l'avenir une gestion énergétique optimisée de type *smart-grid*.

L'idée d'une dispersion d'un investissement dans le temps sans emprunt peut de façon évidente se réaliser par un phasage des travaux. A ce titre, une analyse de l'expérience des régions du Sud, où les capacités d'investissement et les accès au crédit sont limitées pourrait être porteuse. Nous relevons le cas de la rénovation de la favella d'Iquique par le bureau Elemental qui propose la livraison de noyaux minimaux d'habitation destinés à être complétés progressivement par les habitants eux-même, au rythme de leurs besoins et de leurs ressources.

Le phasage peut prendre diverses formes, avec plus ou moins d'impact architectural. A un extrême se trouve une construction au temps t d'un noyau minimal auquel s'ajoutent progressivement des espaces de confort. La maison Latapie, d'Anne Lacaton et Jean-Philippe Vassal peut être présentée comme exemple d'aboutissement d'une telle démarche, même si dans ce cas particulier la constitution de l'habitat minimal et des espaces attenants ne vient pas d'un découpage temporel. D'autres exemples peuvent être trouvés autours des concepts de maisons modulaires. A l'autre extrême se trouve la construction au temps t de l'ensemble des espaces mais le décalage dans le temps de la constitution des différentes performances demandées à ceux-ci. De façon limitée, les performances esthétiques, visuelles et acoustiques données par les finitions intérieures peuvent aisément être reportées et faire l'objet d'une autoconstruction dans les mois ou années qui suivent la construction. De façon plus importante, les performances thermiques de l'enveloppe ou des systèmes pourraient n'être que partiellement réalisées lors de la construction, sous réserve de l'acceptation d'un inconfort et du maintien d'une capacité d'intervention ultérieure simple et non génératrice de déchets. En rénovation, cela signifiera par exemple intervenir sur la performance des parois mais postposer le remplacement de l'installation de chauffage, ou réaliser une isolation minimale par l'intérieur en postposant une intervention plus lourde par l'extérieur, les conséquences hygrothermiques de celle-ci étant, elles, anticipées lors de la première intervention. Dans tous les cas, ces pistes impliquent une réflexion précoce sur l'état ultime souhaité pour le projet de construction ou de rénovation, à la lumière des enjeux énergétiques, sociaux et environnementaux, la nature des interventions et leur phasage devant se définir par rapport à cet objectif. Des principes tels que la concentration des efforts sur un nombre limité de postes, et la définition de niveaux de confort minimaux *de transition* en cas d'absence de chauffage pourraient aider à la définition de ce plan d'intervention.

Une autre traduction de l'idée de dispersion dans le temps s'inscrit dans la théorie de la fonctionnalité telle que définie notamment par le Club Economie de la Fonctionnalité et Développement Durable(Gaglio *et al.*, 2011). L'idée centrale de l'économie de la fonctionnalité est le basculement d'une économie basée sur la vente d'un produit à celle basée sur la vente d'un service, lequel intègre éventuellement la mise à disposition de produit. L'exemple de la mobilité est assez parlant. Il s'agit de passer de la vente de véhicules et d'abonnements aux transports en commun par des opérateurs différents à la mise à disposition par un opérateur unique d'un ensemble de moyens de mobilité (véhicule partagé, transport en commun, etc.) éventuellement variable dans le temps et l'espace, contre un payement sous forme d'abonnement et/ou d'une tarification à l'usage. Outre une forme de dématérialisation de l'économie, cette approche a l'avantage de réduire le besoin d'investissement individuel pour le reporter sur le fournisseur de service. Appliqué à la question de l'énergie dans le bâtiment, il s'agit de passer de la livraison d'un bâtiment énergétiquement performant à celui d'un service qui pourrait être un niveau de confort thermique standard. Plus concrètement, un opérateur énergétique pourrait prendre à se charge tout ou partie des investissements économiseurs d'énergie et en reporter le coût sur la tarification de l'énergie qu'il fournirait à l'habitant. Ce dernier conserve alors sa capacité d'ajustement de ses charges par un ajustement de son confort à la baisse par rapport au niveau standard, tandis que l'opérateur assure sa viabilité sur des comportements moyens. Il nous semble que de tels modèles mériteraient d'être étudiés plus en détails, notamment en vue d'une application sous forme de tiers-investisseur pour la rénovation des immeubles partagés en copropriétés. La structure de codécision de ces immeubles y rend en effet difficile tout investissement important. Or une part importante du parc d'appartements construits durant le XX^{e} siècle arrive à la fin de sa première vie. Sa rénovation constitue pour les années à venir un enjeu énergétique important.

11.6 Climats intérieurs et risque sanitaire

11.6.1 Limites de salubrité

La relation entre conditions climatiques intérieures et risques sanitaires est étroite. Bien que les études les plus récentes insistent sur la complexité de cette relation (Bluyssen, 2010), nous nous limiterons ici à isoler le rôle indépendant des conditions de température et d'humidité. Ces conditions sont en effet d'un intérêt immédiat pour les questions énergétiques dans la mesure où elles sont les caractéristiques les plus importantes de l'ambiance thermiques. Gardons cependant à l'esprit qu'elles ne permettent pas à elles seules de caractériser la qualité sanitaire d'un bâtiment.

En hiver, des pathologies directement liées au froid telle que l'hypothermie peuvent être constatées, mais avec une moindre occurrence que les affections circulatoires ou respiratoires (Boardman, 2000). Le docteur Ken Collins a prouvé que la surmortalité hivernale est plus due à des maladies respiratoires que circulatoires. Or, les affections respiratoires sont principalement liées à de basses températures intérieures, tandis que les affections circulatoires sont plus liées à de basses températures extérieures (Collins, 2000). Selon d'autres auteurs, de basses températures intérieures sont responsables de la "plus grande partie des morts hivernales excédentaires" (Wilkinson *et al.*, 2000). D'autres citent ce paramètre à égalité avec un habillement inadéquat à l'extérieur (Keatinge et Donaldson, 2000). Néanmoins, si de basses températures intérieures impactent clairement le système respiratoire, il n'y a pas de preuve expérimentale d'une corrélation directe entre le froid et un abaissement de la résistance du corps (Collins, 2000). D'autres facteurs sont donc probablement à l'œuvre, tel qu'une propagation plus rapide des virus due à la plus grande promiscuité en hiver et à la combinaison du froid et de l'humidité dans les bâtiments.

Nous indiquons dans la figure 11.4 les limites indicatives d'une zone de salubrité des conditions intérieures. Il est très délicat de proposer de telles limites, du fait de la limitation de la connaissance médicale sur le sujet et de l'impact négligé de paramètres tels que la pollution atmosphérique (Payling Wright et Payling Wright, 1945), la sensibilité individuelle, et le mode de vie (Collins, 2000). En outre, une telle représentation est incapable de tenir compte de phénomènes dynamiques tels que la résistance ou la sensibilité à des variations plus ou moins rapides des conditions hygrothermiques. De telles variations étant particulièrement importantes en été, nous avons choisi de ne pas indiquer de limite de température maximale. Les limites de température et d'humidité proposées sont exprimées comme des conditions intérieures moyennes et ne sont donc pas représentatives de conditions locales telles que rencontrées par exemple au droit de ponts thermiques ou de surfaces froides. Les hauts niveaux d'isolation et la résolution des ponts thermiques proposés par les démarches de construction basse énergie ont néanmoins tendance à amoindrir ces différences. Les limites de salubrité proposées sont les suivantes :

1. Humidité maximale : Une humidité excessive est le paramètre principal de l'apparition de champignons et d'acariens. Des mesures en laboratoire ont démontré que la moisissure se développe systématiquement sur une parois dès que son humidité relative excède 80 % pendant plusieurs semaines, mais que certaines moisissures se développent dès 70 % (Oreszczyn *et al.*, 2006). C'est la limite d'humidité relative de 70 % qui est généralement admise comme limite au développement de moisissures (Adan *et al.*, 1988; Collins, 2000). Pour éviter le développement

d'acariens, il est recommandé de maintenir une humidité intérieure inférieure à 50 % en permanence. Cette limite doit se comprendre comme une moyenne journalière, avec des périodes de dépassement autorisées de maximum 2 à 8 heures par jour (Arlian *et al.*, 1999; Arlian *et al.*, 2001). Il a aussi été prouvé que quasiment aucun acarien ne survit à une humidité relative inférieure à 45 % pour une température de 20-22 °C. Au-dessus de cette limite, leur développement est très rapide (Andersen et Korsgaard, 1986). L'Organisation Mondiale de la Santé exprime ses recommandations en humidité absolue et situe le point pivot pour le développement des colonies d'acariens à 7 g/kg (Howieson et Lawson, 2000). En-dessous de cette valeur, ils meurent par dessiccation et du fait de la déshydratation des déchets de peau dont ils se nourrissent. Cette limite de 7 gr/kg est cohérente avec la recommandation de 50 % d'humidité relative pour des températures entre 18 et 21°C, mais plus stricte pour des températures plus élevées. Nous estimons que les humidités maximales déterminées sur base des développements de moisissures et d'acariens n'ont pas la même force. Les acariens ne présentent en effet de problèmes que pour les personnes allergiques tandis que les risques liés à la présence de champignons sont partagés par tous.

2. Humidité minimale : Des conditions intérieures trop sèches provoquent le développement de symptômes d'irritation des yeux et des voies respiratoires supérieures. Des études montrent la différence de sensation à ces deux niveaux entre des taux d'humidité relative de 30 et 40 % (Wolkoff et Kjargaard, 2007). Il a aussi été démontré que l'occurrence des cas d'infection des voies respiratoires supérieures augmentent quand l'humidité relative intérieure est inférieure à 30 % (Collins, 2000).

3. Température minimale : Il est difficile d'établir exactement la liaison entre température intérieure et morbidité, faute de données sur les conditions réelles dans les habitations. Les études sont souvent réduites à chercher des liaisons indirectes, basées sur des relevés des caractéristiques des habitations et des modes de vie (Rudge et Gilchrist, 2007). Les quelques valeurs que nous avons pu identifier doivent donc être considérées avec prudence. Il semble qu'en-dessous de 18°C en moyenne journalière, les risques d'effets néfastes augmentent (infections respiratoires, bronchites, attaques cardiaques, congestions). Ces risques s'accroissent avec la chute de température. Sous 10°C, le risque d'hypothermie devient important, particulièrement pour les personnes âgées (Wilkinson *et al.*, 2000). D'autres études montrent qu'un seuil existe autours de 15°C pour ce qui concerne les effets sur la pression sanguine chez les personnes âgées (Goodwinn, 2000). Nous retiendrons ici la valeur seuil de 18°C.

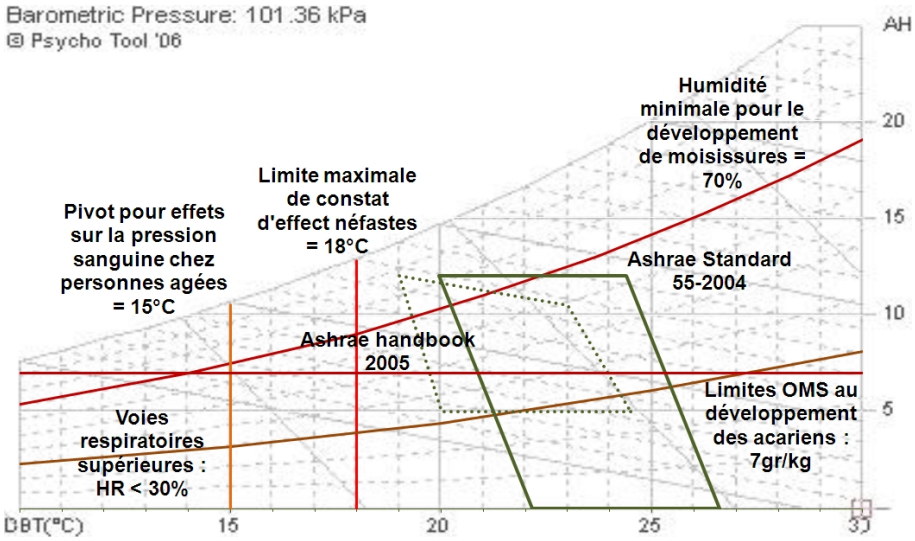


FIGURE 11.4 – Limites de confort et de salubrité des conditions intérieures. Les limites sanitaires sont indicatives uniquement.

La figure 11.4 indique aussi deux zones de confort, à titre de comparaison. La première est la plage de température jugée acceptable par l'approche *Predicted Mean Vote* (PMV) selon l'ASHRAE Standard 55-2004 (ASHRAE, 2004). La seconde, qui inclut une valeur d'humidité minimale, est extraite de l'ASHRAE handbook 2005 (ASHRAE, 2005). Ces deux zones de confort sont normalement exprimées en termes de température opérative. Nous faisons néanmoins l'hypothèse simplificatrice que, dans les bâtiments à haute performance énergétique, températures ambiantes et opératives sont équivalentes. Ceci est nécessaire pour confronter plages de confort et de salubrité, lesquelles sont exprimées en température ambiante. Notons que cette hypothèse simplificatrice a gommé l'impact rafraichissant des parois en hivers, et donc sous-évalue les températures ambiantes nécessaires pour assurer le confort. Cette hypothèse minimise donc l'écart entre zones de confort et de salubrité.

Relativement aux périodes estivales, les vagues de chaleur ont été associées à des pics de mortalités dus à des difficultés cardiovasculaires et respiratoires (Ballester *et al.*, 2003). Il semble que ces décès surviennent principalement pendant les premiers jours des périodes de chaleur, suite à quoi une acclimatation est constatée (Diaz *et al.*, 2002). Cette concentration des décès lors des premiers jours ne se rencontre pas aussi nettement en hiver, où les morts relativement rapides liées aux problèmes cardiovasculaires sont suivies sur une plus longue période (quelques semaines) par celles liées aux affections respiratoires (Conlon *et al.*, 2011). Cette différence de comportement justifie que

nous ne proposions pas de limite de température maximale dans la figure 11.4. Tout comme pour l'hiver, nous ne disposons pas de beaucoup de mesures de température intérieure permettent d'établir une liaison claire entre conditions climatiques intérieures et risques sanitaires. Suite à la vague de chaleur qui a frappé la France en 2003, une analyse rétrospective a pu être menée. Elle a montré que le principal facteur de risque était le manque d'isolation thermique et la position sous toiture. Cette étude montre également que le risque de mortalité est réduit si l'on dispose de plusieurs locaux (possibilité de ventilation traversante), mais augmente avec la surface vitrée. L'orientation, l'ouverture des fenêtres, la température extérieure de surface et la végétation jouent également un rôle (Riberon *et al.*, 2006).

Ce parcours de la littérature médicale nous permet de pointer les éléments suivants, relativement aux ambiances intérieures :

- Les limites généralement considérées par les plages de confort en termes d'humidité relative sont proches de celles suggérées par les analyses de développement des champignons, et par l'observation des effets de la sécheresse sur l'organisme. Une plage de confort et de salubrité se rencontre entre 30 à 70% d'humidité relative. La limitation des acariens demanderait une humidité plus basse qui semble pratiquement impossible à maintenir naturellement sous notre climat (50%) sans équipement de climatisation.
- Les températures identifiées comme minimales en termes sanitaires sont plus basses que celles proposées par les standards de confort. Il semble donc exister une zone tampon entre le confort et le risque sanitaire avéré, qui pourrait être exploitée dans le cadre d'une stratégie de minimisation de la consommation d'énergie des bâtiments.
- Si les températures trop élevées et trop basses provoquent toutes deux des affections cardiovasculaires et respiratoires, la distribution temporelle de ces risques est différente. En été, c'est d'abord la variation soudaine de températures qui est source de mortalité, tandis qu'en hiver la mortalité est plus étalée dans le temps. Sous réserve d'une analyse plus pointée, ce constat suggère des approches différentes pour ces deux saisons. Tandis qu'en été ce sont des mesures favorisant la temporisation des variations de températures qui doivent être favorisée (valorisation de l'inertie thermique et maîtrise des gains), quitte à accepter une dérive progressive, en hiver c'est le maintien d'un seuil minimal, ou la capacité à revenir à ce seuil après une chute de température qui devra être maintenu (conservation de la chaleur et puissance de relance de chauffage).

11.6.2 Maintien de la salubrité en hiver sans installation chauffage ?

Nous cherchons dans ce paragraphe à évaluer la possibilité d'utiliser la différence entre la température minimale présentée ci-dessus comme saine et la température de confort pour franchir le pas séparant le standard *Passivhaus* (simplification des émetteurs de chaleur) de l'absence totale de production active de chaleur dans un logement. Pour ce faire, nous considérons le cas de l'appartement décrit par la figure 11.5 et le tableau 11.2. Deux niveaux de performance sont considérés, l'un correspondant aux recommandations du standard *Passivhaus*, l'autre aux meilleures pratiques actuellement accessibles. Cette évaluation a fait l'objet d'une publication lors de la conférence Plea2011 (van Moeseke, 2011c).

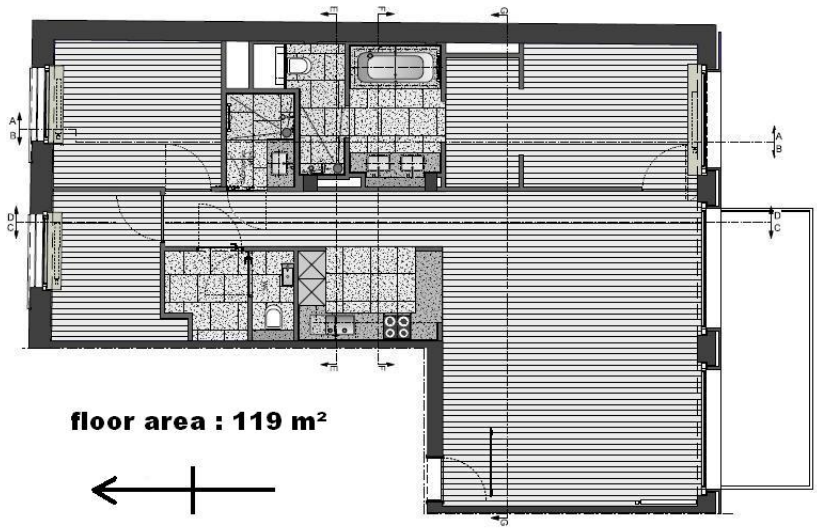


FIGURE 11.5 – Plan de l'appartement considéré pour l'étude de la salubrité hygrothermique : 2 chambres nord, 1 chambre sud, un séjour sud et des espaces techniques centraux. Plan ©Herpain-urbis.

Un modèle thermique dynamique de 11 zones est construit dans Trnsys17. Des gains internes correspondant à une famille de 4 personnes sont modélisés selon un profil temporel typique (figure 11.6). Les gains métaboliques cumulés représentent 1.8 MWh/an, ce qui est équivalent à une charge uniformément répartie de 1.7 W/m^2 (surface plancher brut). Les consommations électriques relatives à l'éclairage et autres usages représentent 1.8 MWh/an, ce qui est une valeur basse comparativement à la moyenne wallonne par ménage de 4 personnes de 2.5 MWh/an (ICEDD, 2004). Les gains internes totaux cumulés (y compris les gains métaboliques) représentent 3.55 MWh/an, ce qui est équivalent à une charge uniformément répartie de 3.4 W/m^2 relativement à

TABLE 11.2 – Description technique de l'appartement étudié

	Cas 1 *Passivhaus*	Cas 2 *Best practice*
Type de construction	Béton massif avec isolation extérieure	Béton massif avec isolation extérieure
Vitrage	0.7 W/(m^{2}K) + espaceur. g=0.5	0.52 W/(m^{2}K) g=0.59
Châssis	0.87 W/(m^{2}K)	0.87 W/(m^{2}K)
Ventilation hygiénique	Pulsion et extraction mécanique	Pulsion et extraction mécanique
Débit d'air	144 kg/h soit 0.43 ach	144 kg/h soit 0.43 ach
Récupération de chaleur	Echangeur à plaque, Rendement constant à 76%	Roue hygroscopique, Rendement constant à 80%
Etanchéité à l'air des façades Q50	4.3 m^3/(h.m^2)	2 m^3/(h.m^2)
Conditions frontières mitoyennes	Adiabatiques	Adiabatiques

la surface plancher brut. Cette valeur est plus élevée que celle proposée pour l'évaluation du standard *Passivhaus* pour des maisons (2.1 W/m^2 surface plancher net) (Feist *et al.*, 2002) mais correspond mieux à une occupation d'appartement. Une production d'humidité de 65 gr/h/personne est considérée. En cumulant cette production avec celles spécifiques des salles de bain/douche et de la cuisine, nous considérons une production d'humidité moyenne de 6.3 l/jour (0.053 l/jour/m^2). Le *capacitance humidity model* de Trnsys est utilisé avec un *humidity capacitance ratio* de 4 dans toutes les zones.

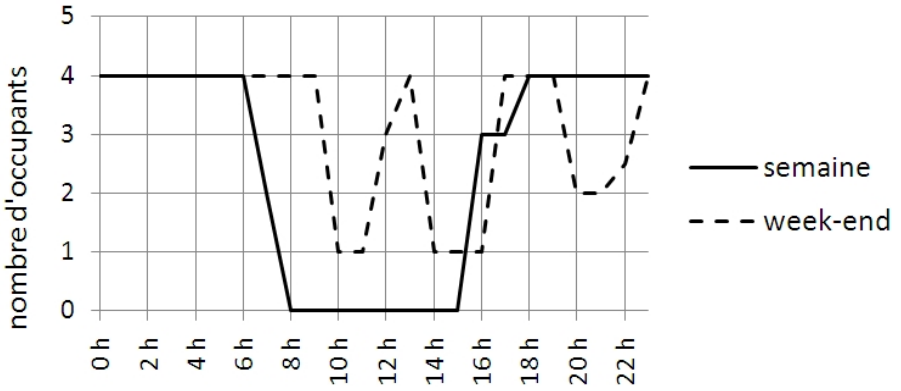


FIGURE 11.6 – Profils d'occupation journaliers considérés pour l'étude de la salubrité hygrothermique

Les simulations dynamiques sont réalisées pour les périodes décrites par la figure 11.7. Les valeurs caractéristiques de ces périodes sont reprises dans la table 11.3. Il s'agit de :

– Le mois le plus froid de l'année climatique moyenne d'Uccle, reprise de la base de données météorologiques METEONORM. Il s'agit d'une année théorique construite sur base de relevés des trente dernières années. C'est néanmoins une année relativement froide au regard des dernières années, comme en atteste la confrontation des degrés-jours (Figure 11.8).
– Une période d'un mois intégrant quinze jours particulièrement froids, sur base de températures relevées en janvier 1997 à Louvain-la-Neuve. Cette période permet de tester les comportements des bâtiments lors de périodes extrêmes d'hiver. Il est fait l'hypothèse que les jours les plus froids sont des jours à faible nébulosité, ce qui autorise un rayonnement solaire diffus non négligeable, supposé équivalent à celui des jours les plus froids de l'année moyenne (Figure 11.9).

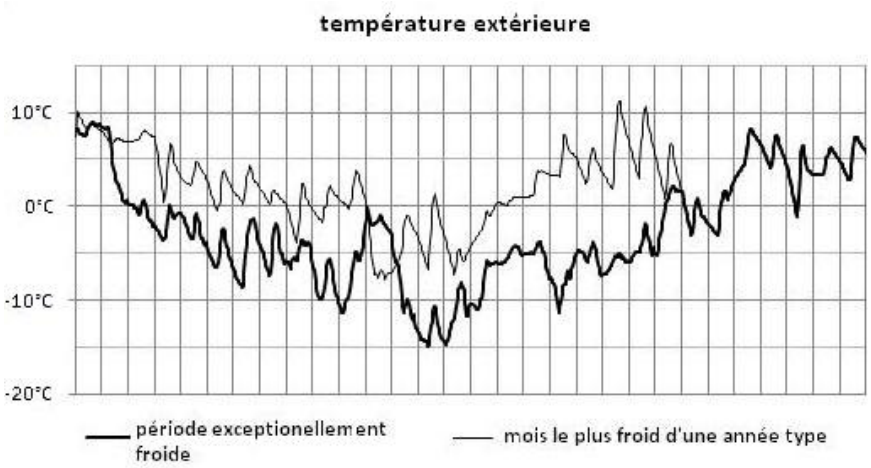


FIGURE 11.7 – Profil de température pour le mois extrême et le mois le plus froid d'une année moyenne à Uccle

TABLE 11.3 – Valeurs météorologiques typiques et extrêmes pour Uccle

	Mois froid typique	Mois extrême
Température moyenne °C	2.5	-2.4
Température maximale °C	11.3	11.1
Température minimale °C	-7.9	-14.9
Rayonnement global horizontal kJ/m^2/mois	72306	76223

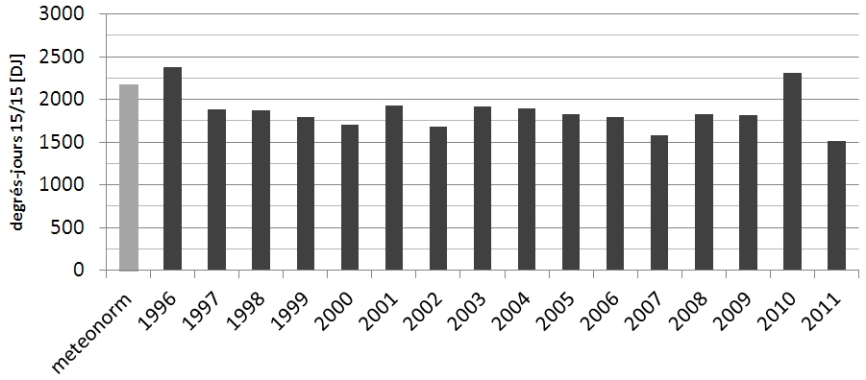


FIGURE 11.8 – Degrés-jours 15/15 pour l'année de référence à Uccle confrontés aux relevés de 1996 à 2011 (Cech *et al.*, 2010)

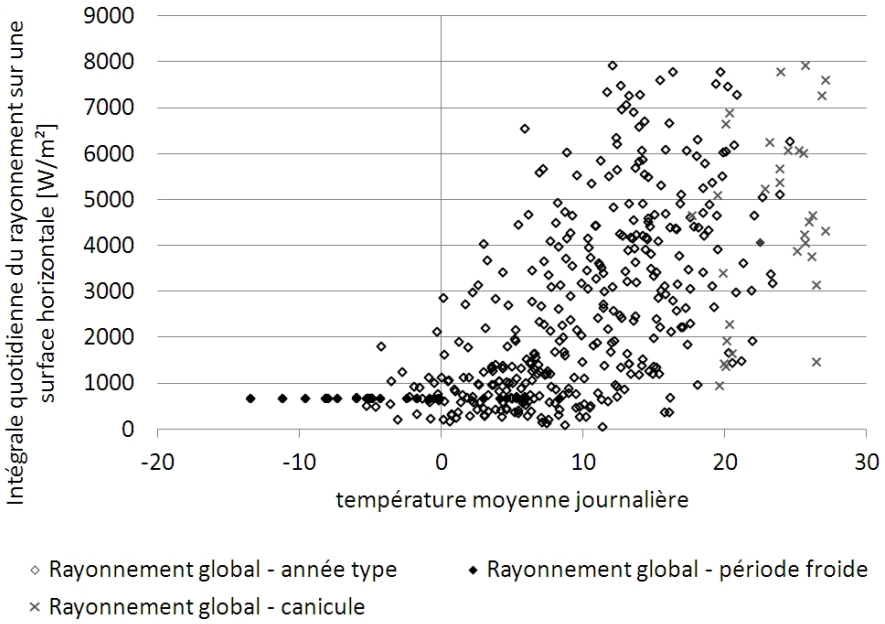


FIGURE 11.9 – Relation entre l'ensoleillement et la température pour l'année moyenne, la canicule et la vague de froid à Uccle

Les simulations sont précédées d'une période d'initialisation de 6 mois et réalisées avec un pas de temps de 0,5 heure. Dans les deux cas, aucun élément de chauffage actif n'est considéré, les conditions intérieures étant donc flottantes. Les résultats des simulations sont reproduits dans les figures 11.10, 11.11 et 11.12. Pour la clarté des figures, nous n'indiquons que les conditions dans les locaux suggérant une occupation de longue durée. La figure 11.10 montre que le cas *Passivhaus* est incapable de maintenir les conditions intérieures dans les limites de confort ou de salubrité sans appoint de chauffage. Les améliorations proposées dans le cas *Best practice* permettent de respecter, en moyenne journalière, les conditions de salubrité pour le mois froid typique, mais pas pour le mois extrême. La figure 11.12 propose des données plus détaillées (horaires) pour le living durant le mois typique, pour les deux cas considérés. Les variations journalières de température constatées sont de 2 à 3.5°C, et restent à tout moment dans la zone de salubrité pour le mois froid typique. L'humidité absolue est stable, ce qui indique la justesse des débits de ventilation choisis, à tout le moins au regard de la production d'humidité considérée.

Ces résultats sont fortement liés à l'hypothèse de continuité d'occupation. Nous n'avons considéré ni période de vacances, ni même de soirée sans occupation du logement. De telles réductions des gains internes résulteraient en une chute des températures, vu la part relative importante de ces gains. Pour le mois froid typique et le cas *Passivehaus*, si nous cherchions à maintenir une température constante de 21°C, ces gains internes représenteraient 47 % de la demande de chaleur, contre 15 % seulement pour les gains solaires, le solde devant être couvert par une installation de chauffage (Figure 11.13).

Ces résultats démontrent qu'il n'est pas insensé de réfléchir à l'absence d'installation de chauffage, pour autant que l'on vise l'établissement de conditions de salubrité plutôt que de confort. Pour un tel niveau de performance, le rôle d'une installation de chauffage se limite donc à combler la différence entre salubrité et confort, à maintenir le climat intérieur lors de périodes exceptionnelles et à assurer une relance suite à des réductions temporaires des gains internes et solaires. C'est un changement assez radical dans l'image que l'on a des installations de chauffage dans notre climat, dans la mesure où elles ont toujours été vues comme indispensables.

L'idée que dans des conditions typiques la présence de l'installation de chauffage ne se justifie que par une volonté de confort et non de salubrité place l'ensemble de la consommation d'énergie sous la responsabilité de celui qui définit le niveau de confort à atteindre, soit généralement l'occupant. Les résultats proposés ici permettent donc de proposer un partage de la responsabi-

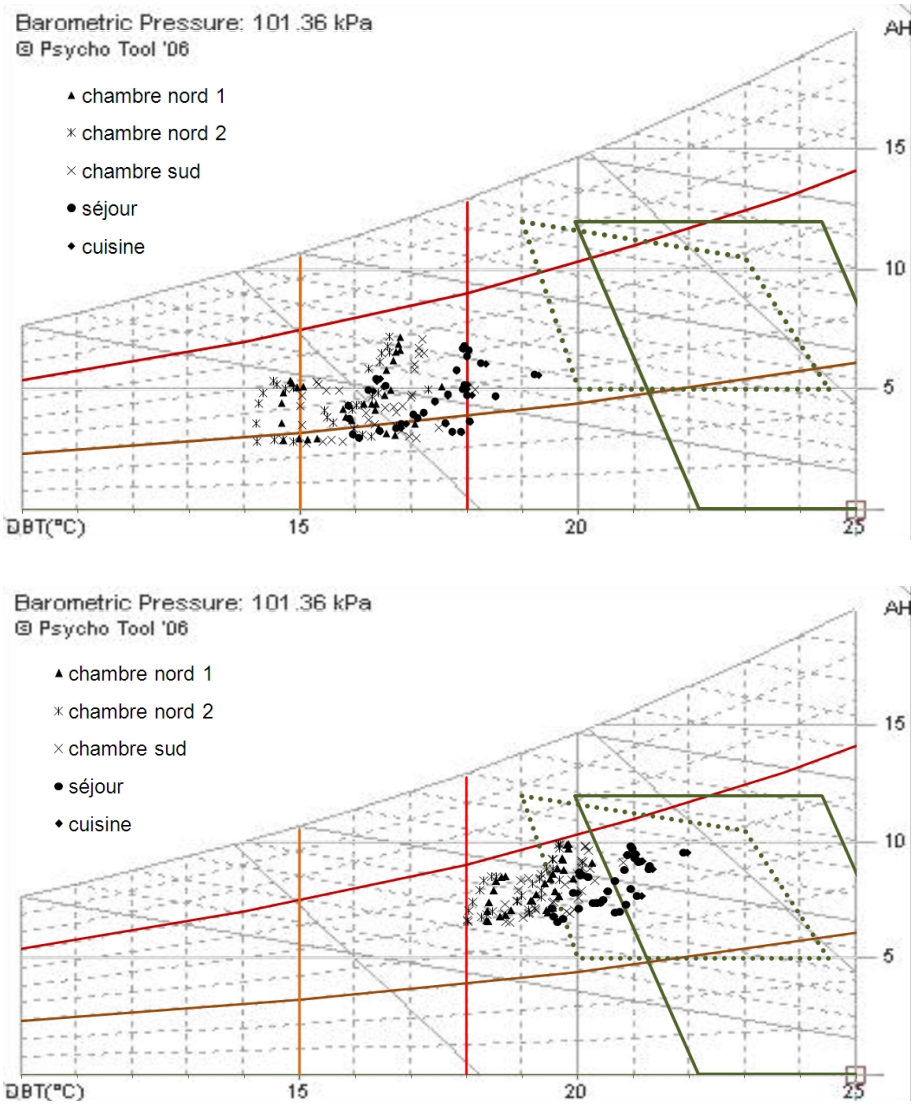


FIGURE 11.10 – Conditions intérieures dans le living et les chambres - moyennes journalières pour le mois froid typique. En haut, pour le cas *Passivhaus*, en bas pour le cas *Best practices*.

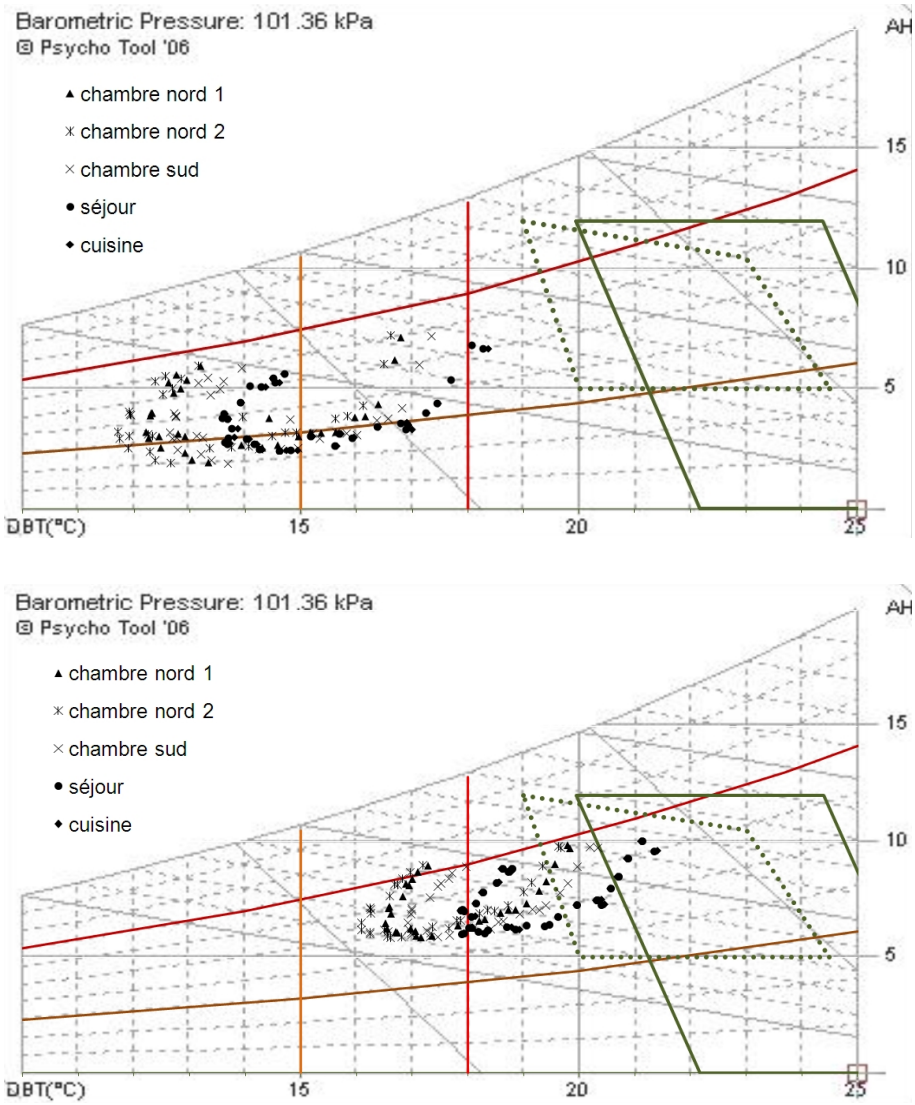


FIGURE 11.11 – Conditions intérieures dans le living et les chambres - moyennes journalières pour le mois froid extrême. En haut, pour le cas *Passivehaus*, en bas pour le cas *Best practices*.

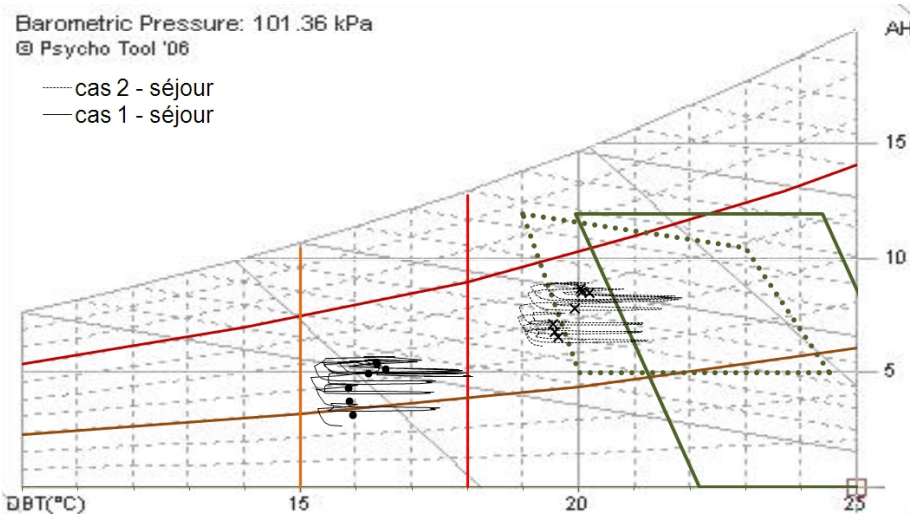


FIGURE 11.12 – Conditions intérieures dans le living pour les cas 1 *Passivhaus* et 2 *Best practice*, pour la semaine la plus froid du mois typique - valeurs horaires et moyennes journalières, pour l'appartement considéré à Uccle.

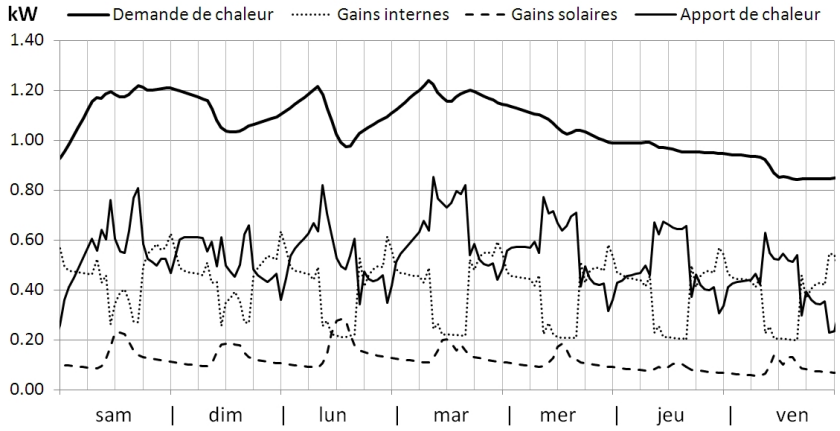


FIGURE 11.13 – Part des gains internes et solaires dans la demande de chaleur pour le cas *Passivhaus* durant la semaine la plus froide d'une année typique, pour l'appartement considéré à Uccle

lité entre les concepteurs et l'occupant, pour ce qui a trait aux consommations d'énergie liées au chauffage : les concepteurs sont responsables de tendre vers des bâtiments assurant dans ces conditions typiques la salubrité des ambiances intérieures sans consommation d'énergie (responsabilité de moyen), tandis que l'habitant est responsable de la consommation d'énergie induite par son mode de vie est ses attentes de confort (responsabilité de résultats). Nous pensons que l'idée de l'absence de besoin d'énergie de chauffage pour maintenir des conditions intérieures saines est une piste de réponse à la question de la précarité énergétique. Notons également que pour permettre à l'habitant de maîtriser ses consommations d'énergie au-delà des conditions sanitaires, les concepteurs sont responsables de lui fournir un mode de chauffage permettant une gestion adéquate et des performances élevées.

11.7 Impact énergétique de la flexibilité

Cette section a fait l'objet d'une publication en conférence, dans le cadre de PLEA2009 (van Moeseke et Goetghebuer, 2009). L'idée développée ici est que le niveau d'exigence des maîtres d'ouvrage tertiaires en termes de flexibilité des espaces intérieures au stade de conception a un impact sur la faisabilité de bâtiments basse énergie. La flexibilité considérée ici est la capacité à diviser une surface dédiée aux bureaux en un ensemble d'espaces plus petits de dimensions variées.

Dans le cas de bâtiments de bureaux, le futur occupant est généralement inconnu. Le niveau de flexibilité à prévoir est donc déterminé par le promoteur. Celui-ci exprime souvent le souhait d'une flexibilité maximale, afin de limiter les freins éventuels à la valorisation des espaces construits. Nous examinons ici l'impact de ce choix en termes de conception de la façade, d'éclairage naturel et artificiel et de techniques énergétiques. Nous utilisons pour cela l'exemple d'un plateau de bureau construit sur une grille de 1.2 m pour une profondeur de 5.4 m. Nous réalisons ensuite la même évaluation pour un niveau de flexibilité que nous considérons *raisonné*.

11.7.1 Flexibilité maximale

Techniquement, une flexibilité maximale implique que chaque axe de la grille structurelle et architecturale peut ou non accueillir une cloison de séparation. Le choix de l'occupant de réaliser ou non une cloison sur un axe particulier ne doit pas avoir de conséquence sur le confort thermique et visuel

des espaces ainsi séparés. Une configuration aléatoire de locaux de dimensions variables mais tous suffisamment confortables doit donc être possible. Exprimé autrement, la plus petite unité possible sur cette grille (un local de 2 modules de 1.2 m) doit pouvoir être placée partout dans le plan sans réduire le confort dans les autres parties du plan. Une autre implication de la flexibilité maximale est que des modifications régulières du cloisonnement doivent être possibles sans interventions coûteuses sur les techniques énergétiques et d'éclairage artificiel. Ces techniques installées lors de la construction doivent donc être conçues d'une façon qui permette aisément les modifications consécutives aux adaptations de l'aménagement spatial.

Impact sur le dessin de la façade

Il est évident qu'avec une façade vitrée sur toute sa longueur, toute configuration de bureaux est envisageable. La figure 11.14 montre un exemple de division irrégulière du plan type considéré en bureaux larges de 2, 3 ou 4 modules et un *open space*. Trois rythmes de façade partiellement opaques sont testés : une variante entièrement vitrée et 2 variantes basées sur un dessin de fenêtres régulières (soit une petite fenêtre de 1 module tous les 2 modules, soit une plus grande fenêtre de 1.5 module tous les 2 modules). L'idée de ces configurations est de tenter de réduire la surface vitrée (bénéfice énergétique) tout en conservant une bonne capacité d'éclairement des locaux. C'est pourquoi le rythme 1-1 propose de fenêtres centrées sur les axes. Une fenêtre latérale dans un bureau de 2.4 m de large est en effet incapable d'assurer un éclairement adéquat du local. Mais on voit sur cette figure que les variantes basées sur un rythme de fenêtres mènent localement à des espaces moins confortables (pas de fenêtre) et à des difficultés techniques (cloison au droit d'une fenêtre). Nous en déduisons que l'exigence d'une flexibilité maximale implique naturellement une ouverture continue de la façade, de type bandeau ou façade vitrée.

Impact sur la lumière naturelle

Vu la conclusion du paragraphe précédent sur la nécessité d'un bandeau vitré, il n'est pas nécessaire de réaliser des évaluations particulières relativement à la lumière naturelle. Dans une telle configuration, la qualité lumineuse des espaces dépendra du type de vitrage, de sa position en coupe, de la proportion des espaces, des revêtements de parois et des dispositifs de contrôle de la lumière naturelle. Ces éléments ne sont pas liés à la question examinée ici de flexibilité en plan.

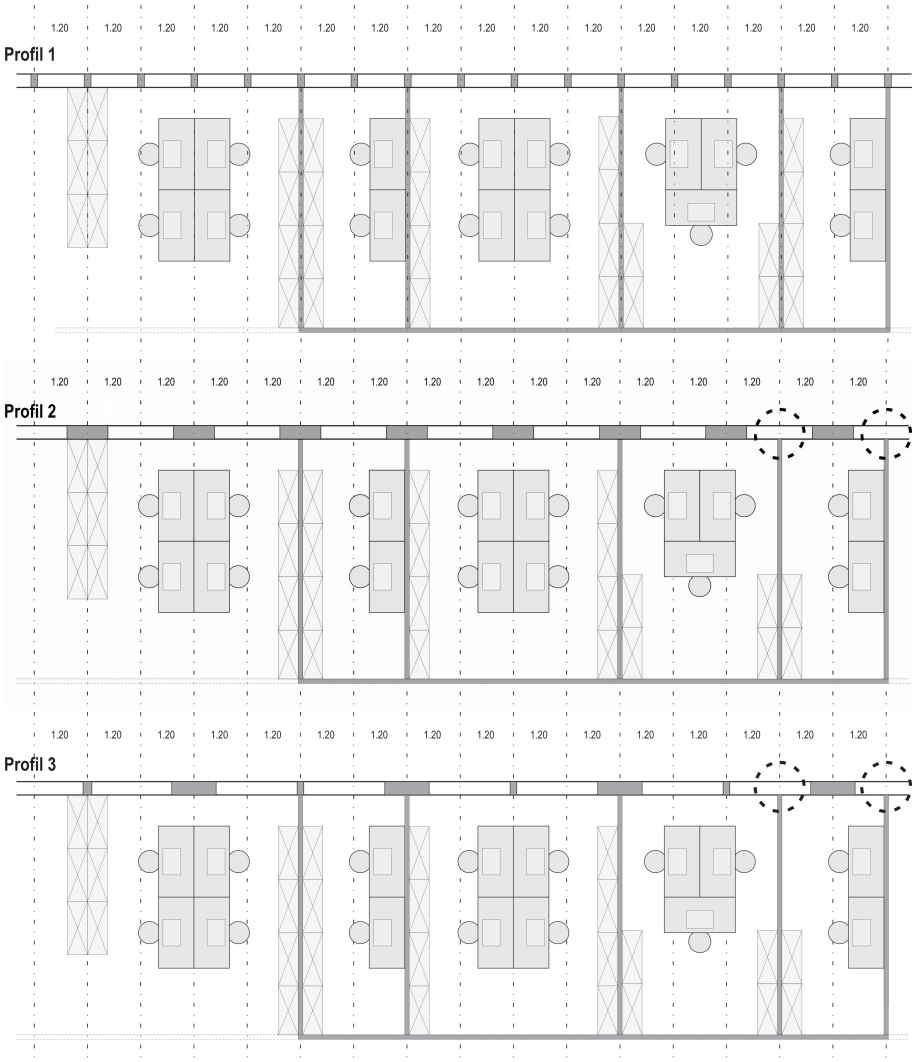


FIGURE 11.14 – Confrontation d'une division irrégulière d'un plan type et de 3 principes de façade : un bandeau continu, un rythme de fenêtres 1-1, et un rythme de fenêtres 1.5-0.5. Les cercles en trait tillé indiquent des inconfort ou difficultés techniques locales. Dessins ©Thomas Goetghebuer

Impact sur la lumière artificielle

Au niveau de l'éclairage artificiel, deux stratégies sont possibles : la première est d'assurer un éclairement minimal de base de 200 à 300 lux, combiné à des lampes de bureau pour atteindre localement les 500 lux exigés sur le plan de travail (CEN, 2002). De notre expérience, cette piste est rarement privilégiée par des promoteurs. La nécessité de la lampe de bureau leur apparaît comme une preuve de l'incapacité du bâtiment tel qu'ils le livrent à assurer le confort requis. La seconde stratégie est d'assurer les exigences d'éclairement normatives au moyen des seuls luminaires d'ambiance. C'est cette piste qui est considérée ici.

Dans un concept de flexibilité maximale, le plan de travail peut être placé sur n'importe quel module. Il est donc nécessaire d'assurer sur l'ensemble des modules un niveau d'éclairement équivalent et respectant l'exigence de 500 lux. Pour cela il est nécessaire de prévoir un luminaire à chaque module. Toute réduction du nombre de luminaires, par exemple sur base d'un module sur deux, est inadéquate lorsqu'elle coïncide avec les plus petites partitions du plan. En effet les tests que nous avons menés par simulation avec les luminaires les moins énergivores du marché ne permettent pas de respecter l'exigence d'uniformité de la norme EN12464 (CEN, 2002). Partant de l'idée de luminaires à chaque modules, des simulations Dialux intégrant les luminaires les plus performants du marché en 2009 (moment auquel nous réalisons cette évaluation) nous mènent à la puissance minimale de 13.12 W/m^2. La figure 11.15 prouve le respect des exigences d'éclairement et d'uniformité dans un bureau de deux modules avec cette puissance. Cette figure montre également que cette configuration mène à un surdimensionnement dans les locaux plus grands, du fait de l'absence de la cloison. 13.12 W/m^2 peut être considéré comme valeur acceptable relativement au standard classique de 15 W/m^2 (CEN, 2007a).

Impact sur le chauffage, la ventilation et la climatisation

Pour ces techniques, il est nécessaire de disposer d'un émetteur de chauffage/refroidissement et d'une amenée d'air neuf tous les deux modules. Il est inutile d'en prévoir tous les trois modules car le local le plus petit aura deux modules de large (2.4 m). Mais pour s'assurer que dans le cas d'un local de trois modules alimentés par un seul émetteur la puissance soit suffisante, il faudra que les émetteurs soient surdimensionnés d'un facteur 1.5. Il est va de même pour l'amenée d'air qui devra être surdimensionnée dans la même proportion, sauf à prévoir des modes de régulation complexes des débits au niveau des unités terminales.

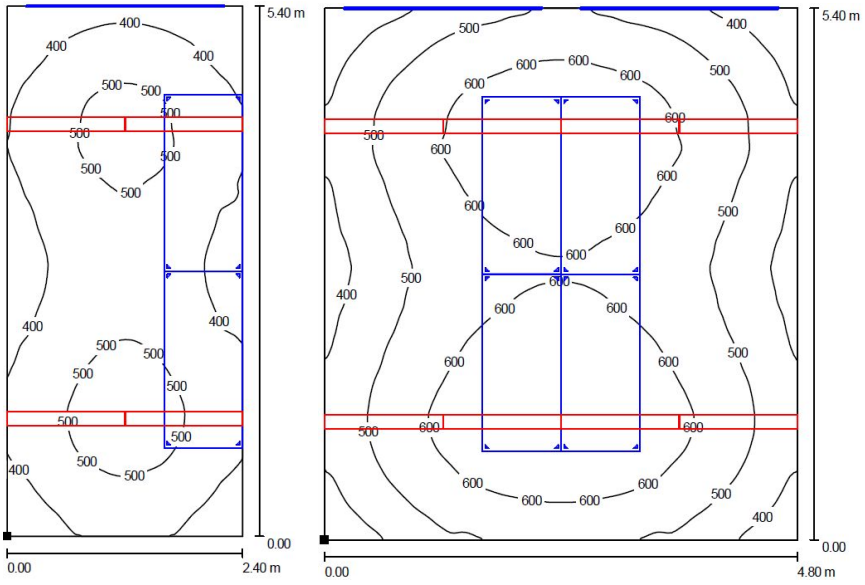


FIGURE 11.15 – Simulation avec Dialux de l'éclairage artificiel dans un concept de flexibilité maximale. Le luminaire considéré est le Philips TBS340 LC 1xTL-D36W/840 CON C6. La puissance moyenne est 13.12 W/m^2

11.7.2 Flexibilité raisonnée

L'idée d'une flexibilité raisonnée peut être décrite par opposition à la flexibilité maximale. Ici, il est accepté de renoncer à une part de la liberté d'aménagement et de dessin de la façade, pour limiter les contraintes sur les autres aspects considérés. Nous envisageons 2 niveaux de flexibilité raisonnés (figure 11.16) : le premier niveau permet de créer des espaces de 2 modules, ou des multiples entiers de cet espace de base. Les cloisons ne peuvent donc être admises qu'à 1 axe sur 2. Le second niveau de flexibilité raisonnée permet de créer des espaces de bureau de 4 modules, ou des multiples entier de cet espace de base. Les cloisons ne peuvent donc être admises qu'à 1 axe sur 4. Il ne s'agit là que d'exemples, qui pourraient être multipliés (3 modules ou d'autres largeurs de trame). L'idée qu'ils illustrent est l'obligation de dessiner les cloisonnements sur un multiple entier d'une unité de base relativement large, quelle qu'elle soit. Le premier niveau est proche de la flexibilité maximale, mais permet déjà des économies d'énergie. Le second niveau est encore plus efficace en termes d'énergie, mais implique plus de contraintes d'aménagement.

Pour valider la comparaison entre ces configurations et celle présentant une flexibilité maximale, il est nécessaire qu'elles permettent une densité d'occu-

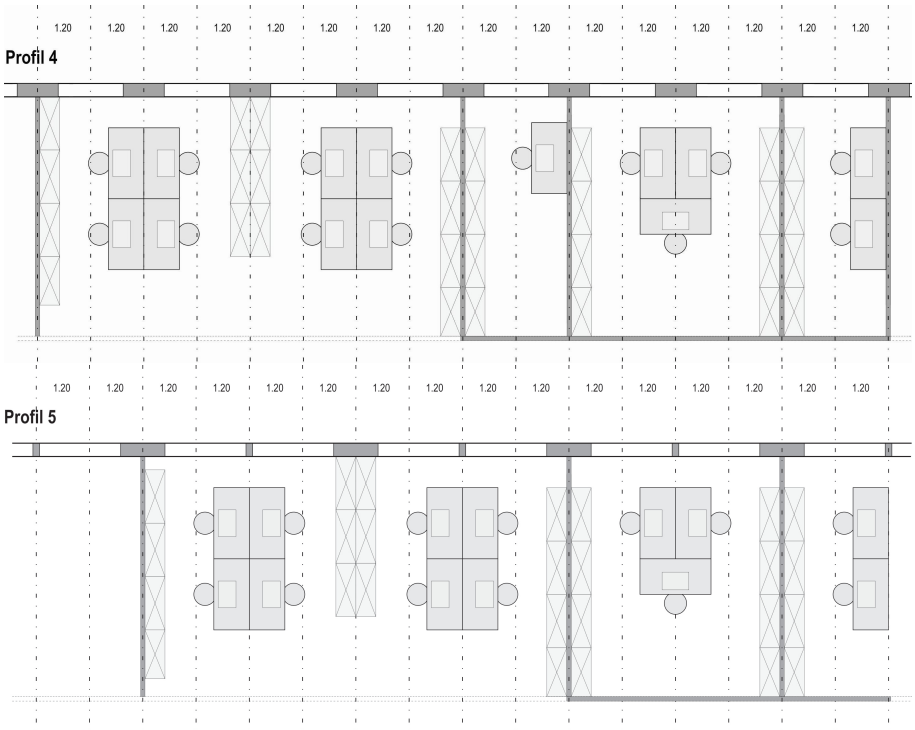


FIGURE 11.16 – Exemples de concepts de flexibilité raisonnée. Au-dessus, le premier niveau, basé sur une unité de 2 modules. En-dessous, le second niveau, basé sur une unité de 4 modules. Dessins ©Thomas Goetghebuer

pation équivalente. Le tableau 11.4 indique la surface plancher disponible par travailleur pour les configurations représentées dans les figures 11.14 et 11.16. Pour le niveau 1 de flexibilité raisonnée, seules les unités de 3 modules ne peuvent être créées. Une telle unité permet d'accueillir 2 ou 3 travailleurs et des bureaux de direction incluant un petit espace de réunion. Les groupes de 2 ou 3 personnes devront ici être accueillis dans des locaux de 2 ou 4 modules, tandis que les bureaux de direction seront constitués de 4 modules. Dans le niveau 2 de flexibilité raisonnée, il n'est pas possible de créer de petits locaux. Ce niveau ne pourra dès lors pas être généralisé, mais peut servir de base à l'aménagement par exemple de certaines ailes de bâtiments, en combinaison avec localement des principes plus souples.

TABLE 11.4 – Densité d'occupation pour différentes configurations spatiales présentées dans les figures 11.14 et 11.16

Cas	Nombre maximal d'occupants	Densité maximale (m^2/occup)	Niveau de flexibilité
Bureau de 2 modules (12.96 m^2)	2	6.48	Flexibilité maximale et raisonnée de niveau 1
Bureau de 3 modules (19.44 m^2)	3	6.48	Flexibilité maximale
Bureau de 4 modules (25.92 m^2)	4	6.48	Flexibilité maximale et raisonnée de niveau 1 et 2
Open space	4 (pour 4 modules)	6.48	Flexibilité maximale et raisonnée de niveau 1 et 2

Impact sur le dessin de la façade

Dans une configuration de flexibilité raisonnée, il n'est plus nécessaire de disposer d'un bandeau continu. Les situations problématiques (cloisons face aux fenêtres ou absence de fenêtre) sont résolues par la concordance entre le rythme de façade proposé (basé ici sur 2 modules) et l'unité minimale d'aménagement (2 ou 4 modules selon les cas).

Impact sur la lumière naturelle

La figure 11.17 montre que le rythme de fenêtres suggéré mène à des résultats acceptables en termes d'éclairement naturel. Ce résultat est obtenu pour le niveau 2 de flexibilité raisonnée avec une ouverture de seulement 40 % de la façade et des coefficients de réflexion standards pour les différentes parois. Le

standard LEED2.1 demande un Facteur Lumière du Jour supérieur à 2 sur au moins 75 % des espaces dédiés à des tâches visuelles précises (US Green Building Council, 2002). Ce standard n'est pas tout à fait rempli ici, mais l'on voit que c'est dû à un manque de profondeur d'éclairement, et non à l'opacification d'éléments au centre et sur les extrémités latérales de la façade du local.

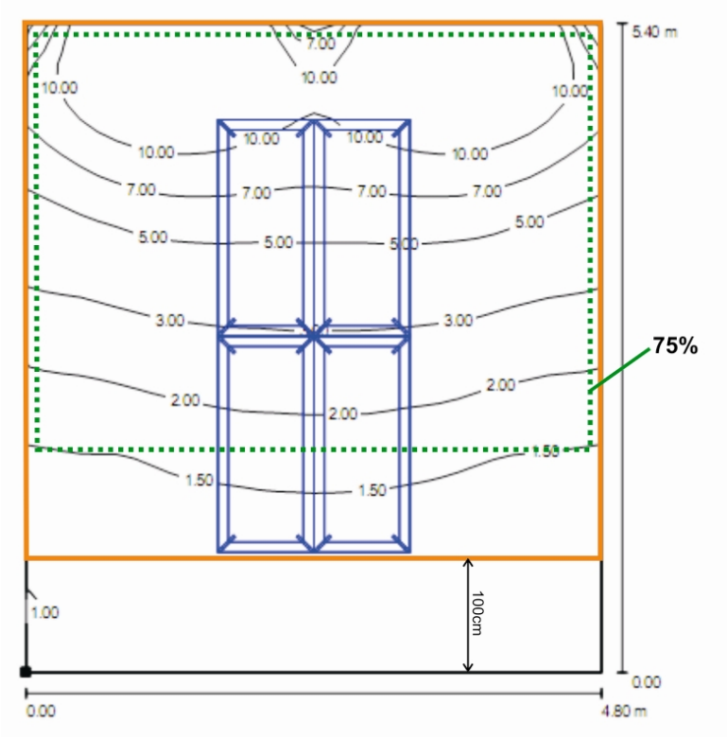


FIGURE 11.17 – Facteur lumière du jour pour le niveau 2 de flexibilité raisonnée représenté en figure 11.16 et pour une partie vitrée de la façade égale à 40 %. Le trait tillé indique la limite de 75 % des espaces dédiés à des tâches visuelles précises utilisé pour l'évaluation LEED 2.1

Impact sur la lumière artificielle

Les résultats d'un exercice de dimensionnement d'une installation d'éclairage sont montré en figures 11.18 et 11.19. Les puissances installées obtenues après recherche de leur minimisation sont 9.46 W/m^2 et 5.83 W/m^2 pour les niveaux 1 et 2 de flexibilité raisonnée respectivement. Ces performances sont obtenues grâce à la localisation précise des espaces de travail qui permet de limiter l'éclairement maximum (500 lux) à une fraction de la surface du local.

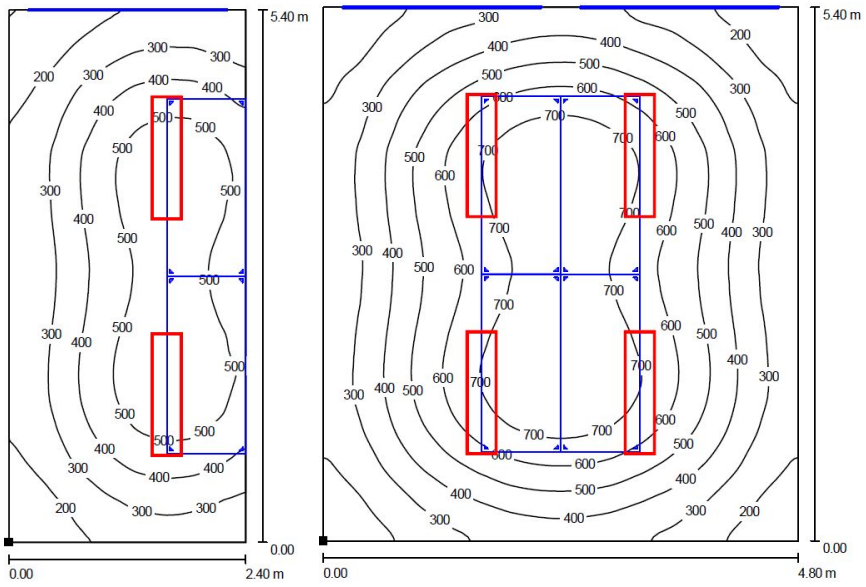


FIGURE 11.18 – Simulation avec Dialux de l'éclairage artificiel dans un concept de flexibilité raisonnée - niveau 1. Le luminaire considéré est le Zumtobel L-FIELDS A A 2/28W La puissance moyenne est 9.46 W/m^2

Impact sur le chauffage, la ventilation et la climatisation

Le passage d'une flexibilité maximale à une flexibilité raisonnée de niveau 1 demande l'installation du même nombre d'émetteurs et d'amenées d'air. Il n'est cependant plus nécessaire de les surdimensionner vu l'impossibilité d'une situation avec un espace de 3 modules alimenté par un seul émetteur. Le niveau 2 de flexibilité raisonnée permet par contre d'économiser la moitié des émetteurs et amenées d'air, puisqu'il suffit d'en prévoir un pour quatre modules. Les équipements à prévoir devront néanmoins conserver la puissance totale et donc doubler leur puissance individuelle, tout en assurant une bonne répartition de la chaleur et de l'air dans le local.

11.7.3 Confrontation des niveaux de flexibilité

Impact énergétique

Nous avons montré que la flexibilité maximale menait naturellement au choix d'une façade entièrement vitrée ou équipée d'un bandeau. La flexibilité raisonnée est par contre compatible avec un rythme de fenêtre. Pour évaluer l'impact de la part vitrée de la façade sur les consommations d'énergie thermique, nous nous référons au logiciel Alter-clim (van Moeseke, 2006). Il s'agit

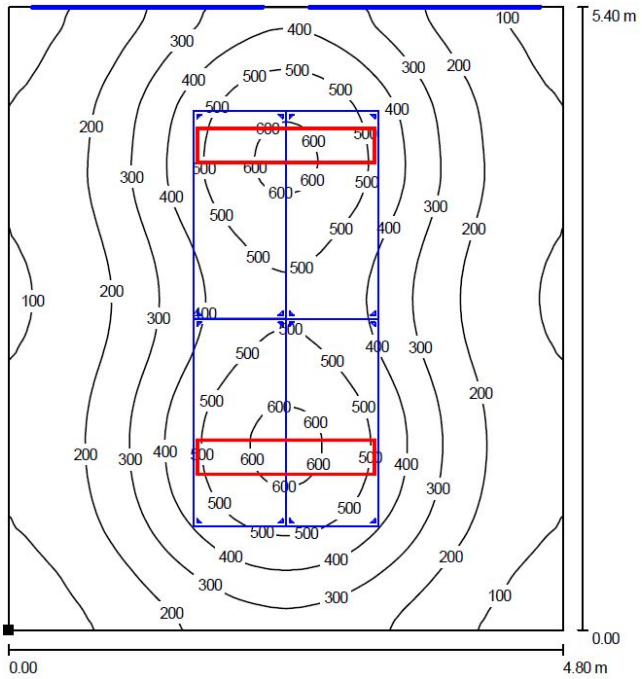


FIGURE 11.19 – Simulation avec Dialux de l'éclairage artificiel dans un concept de flexibilité raisonnée - niveau 2. Le luminaire considéré est le Zumtobel L-FIELDS A A 2/35W T16. La puissance moyenne est 5.83 W/m^2

d'une interface en ligne que nous avons développée autour d'une base de donnée de résultats de simulations dynamiques. La figure 11.20 montre l'impact de la réduction de la surface vitrée sur les consommations d'énergie primaire liées au maintien des ambiances thermiques. Ces valeurs n'intègrent pas la réduction possible de la puissance d'éclairage liée à la flexibilité, pour isoler l'impact de la modification de la façade.

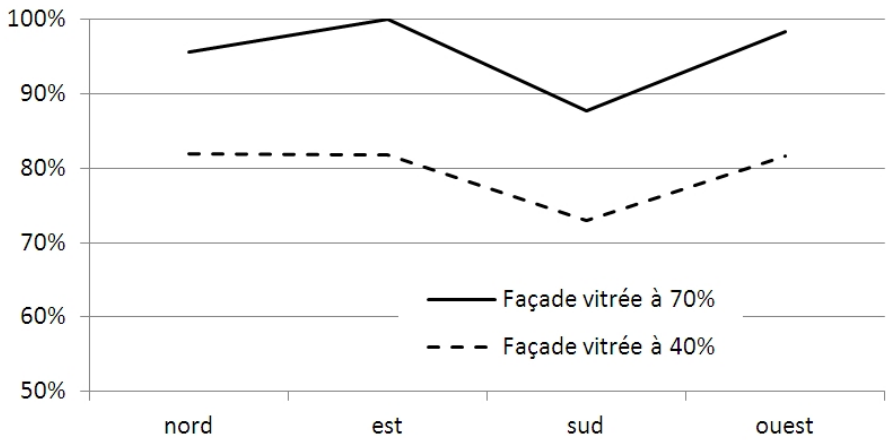


FIGURE 11.20 – Consommation relative d'énergie primaire pour un bureau individuel classique (intégrant chauffage, refroidissement, gestion de l'humidité) en fonction de l'orientation et du dessin de la façade

L'impact énergétique de la réduction de puissance installée sur les consommations liées à l'éclairage peut de son côté être calculé précisément sur base des simulations Dialux (Figures 11.15, 11.18 et 11.19). L'économie est de 28 % pour la flexibilité raisonnée niveau 1 et de 56% pour le niveau 2 relativement à la flexibilité maximale. Ces valeurs n'intègrent pas les bénéfices liés au *dimming* des luminaires, qui est possible dans chaque configuration. La réduction des charges internes et son impact thermique ne sont pas non plus considérés. Il ira dans le sens d'un transfert bénéficiaire entre les postes éclairage et chauffage (les modes de production de chaleur ont un meilleur coefficient de conversion que l'électricité) et d'une réduction de la consommation de climatisation. L'intérêt énergétique de la réduction de puissance d'éclairage artificiel est donc évident.

Impact économique

Il est difficile d'aborder la question des coûts dans ce type d'évaluation théorique. Nous pouvons néanmoins dire que :

- Les installations d'éclairage artificiel proposées dans les configurations de flexibilité raisonnées sont *a priori* meilleur marché que celle de la flexibilité totale. Ceci est possible par la réduction du nombre de luminaires, malgré le fait que les luminaires choisis doivent être particulièrement efficaces et capables d'assurer une bonne uniformité. L'installation d'équipements de *dimming* en fonction de l'éclairage naturel sera également moins chère, car elle dépend directement du nombre de sondes et donc du nombre de luminaires.
- Les installations HVAC seront moins chères dans un concept de flexibilité raisonnée, du fait de l'absence de surdimensionnement, voire de la limitation du nombre d'émetteurs et amenées d'air. Ce point étant ici aussi partiellement compensé par un coût unitaire plus élevé pour maintenir la puissance.
- Enfin, dans le cadre d'une construction de type maçonnerie, les parties vitrées sont plus chères à l'investissement que les parties opaques. La flexibilité raisonnée permet donc *a priori* une économie en permettant la limitation des surfaces vitrées. Ce point est cependant sujet à débat si l'on intègre d'autres modes constructifs tels que les façades rideaux.

Approche suggérée

Les éléments présentés ci-dessus suggèrent donc qu'une limitation volontaire de la flexibilité permet, tout en conservant une certaine souplesse d'aménagement, d'améliorer passivement les performances énergétiques (opacification partielle de la façade et réduction des puissances d'éclairage artificiel) et de réduire le coût de construction (réduction du nombre d'émetteurs HVAC, de l'éclairage artificiel). Ces éléments constituent une étude théorique et limitée, mais dont les résultats sont suffisamment marqués pour justifier une attention particulière des concepteurs sur les conséquences énergétiques du niveau de flexibilité spatiale désiré.

Dans le cadre de cette thèse, outre la preuve de ce que la performance énergétique est liée à des dimensions auxquelles on ne la lierait pas *a priori*, nous retenons de cette évaluation l'idée représentée en figure 11.21. Elle consiste à présenter le dessin d'un bâtiment comme la création d'un potentiel de performance énergétique. Par sa forme, son implantation, son mode constructif, l'architecte intègre une série de mesures permettant de réduire le besoin d'énergie,

telles que l'isolation, la recherche de gains solaires, la ventilation naturelle. Mais ces mesures ne sont pas suffisantes pour concrétiser une performance énergétique : elles n'en constituent que la condition nécessaire. La concrétisation du potentiel qu'elles représentent dépendra des diverses exigences que formulera le maître d'ouvrage ou l'occupant, par exemple en termes de flexibilité. Cette idée nous semble une illustration assez explicite du principe de partage de responsabilité entre les différents décideurs.

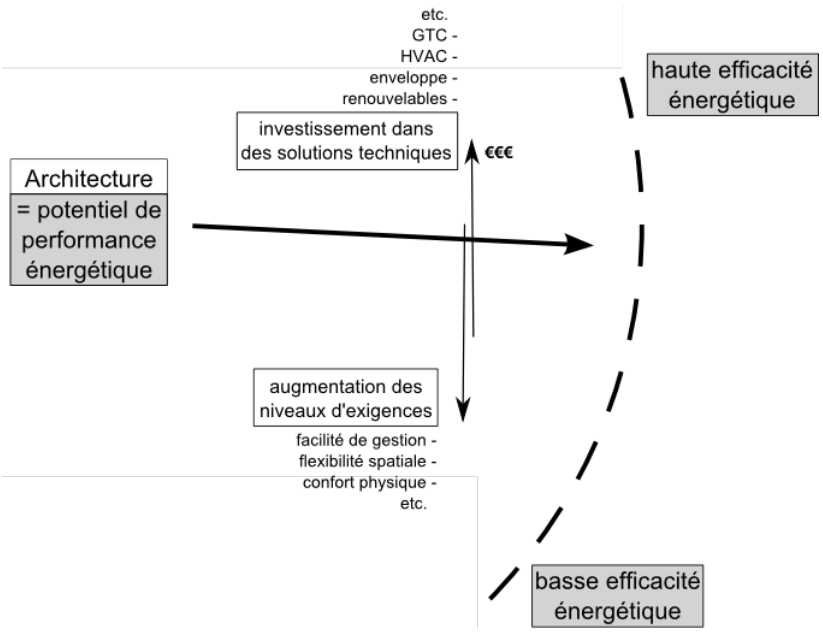


FIGURE 11.21 – Combinaison du potentiel d'une architecture passive et des exigences spécifiques de l'occupant/promoteur avec la performance énergétique comme visée. La capacité d'investissement est présentée comme un moyen de compensation partielle d'exigences incompatibles avec la performance énergétique passive

11.8 Conclusion - éléments d'une approche soutenable

Dans ce chapitre, nous étudions successivement les relations possibles entre l'énergie et seize thèmes synthétisant les différentes dimensions de l'architecture. Sans garantir son exhaustivité, nous pensons que cet inventaire est suffisamment large pour présenter l'étude de ces relations comme un réel exercice de décloisonnement de la question énergétique. Toutes ces relations ne sont pas étudiées avec le même niveau de détail. Dans tous les cas, nous propo-

sons un ou plusieurs axes de réflexion. Tous ces axes reçoivent une attention particulière permettant d'esquisser, sur base d'analyses logiques, les études nécessaires pour les mener plus loin. Deux axes ont reçu une attention plus particulière : celui de la liaison de l'énergie aux questions de confort et de salubrité, et celui de la liaison de l'énergie aux questions de flexibilité des aménagements de plateaux de bureaux.

Sur cette base, nous pouvons énoncer les conclusions et les axes de réflexion repris ci-dessous. Au niveau des conclusions :

1. Nous pouvons réaffirmer la conclusion du chapitre 10 selon laquelle les aspects non-physiques des matériaux et modes constructifs (capacité d'entretien, origine recyclée, insertion dans une boucle de la matière, etc.) doivent être considérés en priorité par rapport aux propriétés strictement physiques (résistance thermique, énergie grise, etc.), à moins de trouver une forme d'intégration dans les calculs d'analyse de cycle de vie. Sans cela, les propriétés strictement physiques ne devraient apparaitre que dans un deuxième temps pour déterminer des optimums en termes de quantité de matière à mettre en œuvre.
2. La lumière artificielle consomme dans certains types de bâtiments plus d'énergie que le maintien des ambiances thermiques, et le confort lumineux n'est pas simplement liée à la disponibilité de lumière. En outre, la valorisation de la lumière naturelle se fait en jouant sur un nombre de paramètres limité, lesquels sont inclus dans l'ensemble plus large des paramètres énergétiques. Une démarche de conception donnant la priorité aux questions de lumière est donc à privilégier.
3. La salubrité des espaces a été dissociée de la notion de confort. Il a été démontré que le maintien de conditions salubres sans utilisation active de techniques de chauffage est un objectif envisageable dans notre climat. Ceci mène à un partage de responsabilité entre le concepteur et l'occupant face aux consommations d'énergie.
4. Les notions voisines de flexibilité et de résilience sont présentées comme des éléments centraux pour l'intégration du principe de précaution. Il n'est pas évident dans quelles conditions l'une ou l'autre approche doit être préférée. Néanmoins, nous démontrons le rôle de choix liés à la flexibilité spatiale dans la réalisation de performance énergétiques élevées. Nous montrons qu'il est intéressant de viser une maîtrise de la flexibilité. Cette maîtrise passe par la définition de possibilités de variations dans un cadre défini. Sur cette base, l'idée d'une flexibilité limitée au sein d'un cadre résilient se dessine comme piste d'étude porteuse.

Au niveau des axes de réflexion :

1. Le rôle possible du comportement dans la réalisation effective des performances énergétiques attendues a été pointé. Des analyses plus poussées de cette relation seraient utiles, de même que l'intégration plus poussée de l'habitant dans le processus de conception de son habitat. Ce point est abordé au chapitre 13.
2. Nous plaidons pour que les questions énergétiques soient vues comme une qualité fondamentale de l'architecture, dont l'influence dépasse les styles et permet une multiplicité de langage architectonique. Nous suggérons pour cela que les aspects énergétiques du bâtiment soient traduits en quelques principes fondamentaux dont l'impact formel est possible sans être déterministe. Un tel inventaire est proposé en conclusion de cette thèse, dans le chapitre 14.
3. Nous proposons que l'idée de précarité énergétique future de l'habitant soit intégrée dans la conception, sous la forme de stratégies d'adaptation du logement.
4. Une approche de la question de la performance énergétique dans les bâtiments existants et patrimoniaux est suggérée mais non développée. Elle se base sur la discussion de la cohérence entre le mode de vie et l'espace habité. L'approche de la rénovation énergétique est généralement basée sur une adaptation des espaces au mode de vie dominant, sans analyse de ce que suggère le bâtiment. Des recherches plus poussées en histoire du confort et des conditions d'ambiance dans les bâtiments, ainsi que sur les possibilités d'adaptations comportementales permettraient d'ouvrir le réflexion sur la rénovation énergétique des bâtiments et de sortir par le haut de ce qui se résume parfois à un choix entre performance et préservation d'un patrimoine.
5. L'idée d'une définition thermique des lieux comme élément de conception est évoquée, en parallèle à la possibilité d'utiliser en conception les logiques propres aux réseaux F&E.
6. Les opportunités énergétiques liées aux échelles urbaines (réseaux de chaleur notamment) sont présentées comme une piste de développement de démarches participatives et de création de lien social. En outre, nous mettons en évidence que l'échelle de réflexion des questions énergétiques s'est déplacée du bâtiment dans un climat à des espaces confrontés à la fois à un climat et à des réseaux énergétiques disposant de leur logique propre.
7. Plusieurs limites des analyses économiques réalisées pour les investissements liés à la performance économique sont décrites. Nous suggé-

rons sur base du principe d'incertitude que c'est la notion même d'investissement qui doit être discutée, plutôt que celles de rentabilité et de pertinence économique. Plusieurs pistes sont évoquées pour limiter l'investissement sans reporter vers l'avenir des charges insoutenables. Des études économiques, sociologiques et comportementales apparaissent nécessaires pour valider puis développer ces pistes.

Globalement, ce chapitre met en évidence l'intérêt qu'il y a à étudier les questions énergétiques au travers d'autres questions liées à la discipline architecturale. Cependant, dès lors que l'on croise l'énergie avec d'autres thèmes se pose la question de la prise de décision entre aspects interdépendants mais non comparables. Cet aspect est relevé au point 11.1.1 traitant des aspects matériels de la construction, mais touche également les dimensions culturelles ou sociales notamment. La multiplicité des thèmes, des enjeux et des exigences croisant la question énergétique est en outre démultipliée par les difficultés méthodologiques d'évaluation propre à chacun de ces thèmes. Ceci rend illusoire la possibilité de comparer exhaustivement différentes architectures ou choix liés à l'énergie, et de faire la preuve du caractère optimal d'une solution. Il semble donc nécessaire de pouvoir définir des méthodes de pensée et des balises parmi ces multiples exigences pour permettre des prises de décisions concrètes.

Chapitre 12

L'homme dans le monde par l'architecture

Ce chapitre est inspiré par les principes d'intégration des composantes du développement durable et de participation. Le principe d'intégration invite à prendre conscience de la relation particulière entre l'homme et son environnement. Les idées développées ici relèvent de cette relation. En effet, celle-ci peut se manifester par l'attribution à l'architecture d'un rôle d'intermédiaire entre l'individu ou les sociétés et le milieu physique. Le principe de participation quant à lui invite à considérer l'action possible du projet sur la transformation des modes de vie. Le projet d'architecture ne serait pas qu'un élément de mise en relation de l'homme avec son milieu, mais également un élément de ce milieu capable d'influence sur l'homme. Notre réflexion s'attachera donc à mettre en évidence les façons dont la conception des aspects énergétiques de l'architecture peut manifester et influencer la relation homme-monde. Cette approche originale de l'énergie permet de mettre en évidence deux idées déjà présentes dans la réflexion sur l'architecture soutenable, à savoir la qualité des ambiances et l'importance du comportement des habitants.

12.1 Relation homme-monde

Christian Godin présente dans *La haine de la nature* un parcours de la relation de l'homme à la nature (Godin, 2012). Selon lui, cette relation est historiquement passée d'une position orphique (l'homme dans la nature, la contemplant sans la comprendre ni pouvoir agir sur elle) à une position prométhéenne basée sur la sortie de l'homme de l'ordre de la nature et par une recherche de prise de pouvoir sur celle-ci. L'homme se définirait en dehors de la nature, lui serait ou aspirerait à en être étranger. Cette étrangeté et incompréhension

génèrent peur et volonté de domination. Cette distance se serait manifestée pendant des siècles par une attitude hostile envers la nature, tant que celle-ci présentait un danger manifeste. Cette hostilité s'est muée aujourd'hui en une relation d'exploitation matinée d'idées de protection que Christian Godin associe à la figure d'Epiméthée. Frère de Prométhée, Epiméthée est présenté comme symbole d'un équilibre face à l'exploitation destructrice rendue possible par la technique amenée par Prométhée. Cette troisième figure n'en est pas moins basée sur l'idée d'une étrangeté de la nature.

Nous présentons dans le chapitre 2 quelques éléments historiques de la pensée écologique. Force est de constater que tant l'idée d'une préservation des ressources que celle d'un nécessaire recul de l'homme face à la nature (écologie profonde) sont compatibles avec l'idée de l'étrangeté de la nature. L'écologie ne porte pas nécessairement une vision renouvelée de la relation homme-nature. Or, Christian Godin s'attèle à démontrer que les crises environnementales actuelles ont une origine existentielle. Elles ne pourront donc pas être véritablement résolues sans évolution de la conception que l'homme a de lui-même dans la nature, ce qui lui fait craindre que la haine de la nature ira à son terme, à savoir la destruction de celle-ci dans sa compréhension actuelle, sa destruction en tant qu'élément extérieur à l'homme susceptible de le contraindre dans son libre arbitre.

Partant d'un constat de distance entre monde physique et monde humain proche de celui de Christian Godin, Augustin Berque propose d'utiliser l'architecture pour tisser un lien entre l'homme et son milieu et répondre ainsi aux multiples crises écologiques (Berque, 2012). Cette proposition vise à donner un rôle *cosmique* à l'architecture. Il ne s'agit pas de chercher à revenir à un état mythique d'inclusion harmonieuse de l'homme dans une nature bienveillante. La proposition est de chercher à définir les termes d'une nouvelle relation homme-milieu. En nous basant sur la notion d'écophilosophie, nous avançons dans le chapitre 2 l'idée de l'immersion de l'homme dans un réseau de relations. Voir l'homme comme une entité agissant dans un tissu de relations physiques, culturelles, sociales permettra peut-être de dépasser cette haine de la nature. Si notre milieu est construit d'une multiplicité d'éléments et de relations qui participent à la définition de l'homme et des sociétés, l'architecture peut participer à la prise de conscience de l'existence de ce tissu de relations. De cette façon, elle peut alimenter la réflexion sur une redéfinition de la place de l'homme dans le monde.

Pour intégrer ce tissu de relations, il faut que l'architecte reconnaisse ce qu'Augustin Berque nomme *esprit du lieu*. Cette notion, qu'il reprend de Nishida Kitaro et développe dans ses recherches sur la mésologie est construite

sur l'idée que le monde physique tel que présenté par une approche des sciences exactes n'est pas le monde sensible perçu. Cet esprit du lieu est défini comme une construction humaine (un prédicat), c'est à dire une construction sociale et culturelle, générée par les habitants sur base d'une réalité physique (un sujet logique). L'esprit du lieu est donc une relation entre un milieu et ses habitants. Augustin Berque s'attache à démontrer que cet esprit du lieu est à la fois construction humaine et élément de définition de l'humanité, ce qu'il nomme trajectivité (Berque, 2009). La trajectivité est construite sur une vision de l'homme comme une entité duale, physique d'une part et sociale de l'autre, ce qu'il nomme médiance. Dans ce contexte, Augustin Berque propose que l'architecture cherche à entrer en résonance avec l'esprit du lieu. Ceci implique qu'elle se nourrisse de la subjectivité des habitants, du sens qu'ils donnent à leur présence au monde.

12.2 Travailler avec la relation homme-monde

Présenter l'architecture comme un moyen de révélation d'une relation entre une société et un lieu, ou plus généralement le monde, n'est pas original. On peut trouver des idées similaires par exemple dans l'architecture sacrée ou vernaculaire (voir par exemples la description par Amos Rapoport du lien entre formes vernaculaire et images de l'habitat idéal (Rapoport, 1972) dans différentes sociétés). L'invitation d'Augustin Berque relève selon nous plus d'une mise en évidence d'une capacité intrinsèque de l'architecture que d'une modification de son objet.

Cette invitation peut être elle-même contextualisée dans la réaction à l'a-localisation affichée par une partie de l'architecture du XX^{e} siècle. Mais les architectures en question n'ont jamais constitué qu'une part visible de la pratique, régie par des doctrines plus que par des théories, qui n'engagent pas fondamentalement la discipline. Les grands maîtres de l'architecture du XX^{e} siècle ont d'ailleurs montré un intérêt réel pour les sites, comme le décrit James Steele (Steele, 2005). Néanmoins, le caractère superficiel des espaces résultant d'une part de la production architecturale est réel et décrit par exemple par Franco La Cecla (La Cecla, 2011). Les appels au retour à une architecture contextuelle ne sont d'ailleurs pas récents. La notion d'esprit du lieu proposée par Augustin Berque rappelle évidemment l'idée homonyme du *genius loci* de Christian Norberg-Shulz (Norberg-Schulz, 1981). La notion définie par Augustin Berque et Nishida Kitaro s'en distancie quelque peu en insistant sur la dimension sociale de la relation au lieu. Si le *genius loci* pour l'architecte est un prédicat sur le sujet logique que constitue le monde physique, Augustin

Berque nous amène à dire qu'il devrait plutôt s'agir d'un prédicat sur un prédicat : l'architecte doit construire non sur ce qu'il perçoit du lieu, mais sur ce qu'il peut comprendre de la perception qu'en ont les habitants.

Concevoir l'architecture en intégrant l'esprit du lieu implique donc pour l'architecte d'identifier cet esprit. Dans la mesure où l'architecte est amené à travailler dans des lieux et contextes sociaux différents, sa propre relation au monde n'est *a priori* pas représentative des esprits des lieux auxquels sa pratique le confronte. Augustin Berque propose une méthode herméneutique, basée sur l'imprégnation au lieu (Berque, 2012), qui est difficilement compatible avec la multiplicité des contextes dans lequel l'architecte est amené à travailler. Traduire l'esprit du lieu peut donc d'emblée être vu comme une invitation à des méthodes de conception intégrant une participation des habitants et usagers pour palier l'impossibilité d'une analyse mésologique par l'architecte lui-même. Nous revenons sur les questions de participation dans le chapitre 13. Parallèlement, il nous semble que cette recherche d'un esprit du lieu local pourrait être guidée par des questions générales. Quelques questions liées à notre thème de recherche pourraient être les suivantes :

- Le monde physique évolue selon des cycles. Comment les cycles climatiques sont-ils intégrés dans le mode de vie ? Comment les cycles de la matière sont-ils intégrés dans l'économie ? Comment l'écoulement du temps est-il ressenti ?
- Le monde humain est constitué d'individus et de sociétés. A quelle échelle se place la responsabilité face aux risques subits et provoqués par le monde physique ?
- Quelles valeurs sont projetées sur ce que recouvre le terme nature ? Mentionnons par exemple l'ironie vue par Bernard Rudofsky dans une société habituée au confort mécanique dont les individus cherchent le ressourcement par l'évasion dans la nature (Rudofsky, 1987).

Pour revenir au sujet qui nous occupe dans cette thèse, pointons que l'énergie est aujourd'hui un élément particulier de la relation homme-monde. Elle peut en effet être approchée comme un élément physique et naturel, une ressource du site, et comme un élément culturel en tant qu'elle est transformée et domestiquée par l'homme, objet de génie et vecteur d'espoirs et de craintes. L'énergie est dès lors une entrée toute désignée pour faire prendre conscience de ce qu'est la réalité du milieu physique et le rôle joué par l'homme dans ce milieu. De ce fait, identifier et chercher à utiliser la relation de l'homme à l'énergie en architecture peut être vu comme une expérience à échelle réduite d'intervention sur la relation de l'homme à son milieu. Pointons l'originalité de la proposition faite ici : il s'agit d'aller plus loin que la prise en compte du

contexte dans la conception, pour mettre en évidence de façon plus explicite et influencer une partie précise de la relation de l'homme à l'environnement. L'objet est de chercher par l'architecture à influer sur la perception des enjeux énergétiques et ainsi pouvoir modifier les comportements individuels. Cet objectif passe nécessairement par un travail sur deux volets que nous développons dans les sections suivantes : la perception de l'énergie au travers notamment de la notion d'identité climatique et le comportement au travers de la responsabilisation.

Au travers de l'approche proposée ici, il conviendra cependant de ne pas chercher à donner à l'architecture un rôle trop présent. Peter Zumthor dénonce dans *thinking architecture* la surabondance d'images dans un monde perdant le contact avec la réalité des choses (Zumthor, 2010). Il plaide pour une architecture qui travaille avec les éléments réels que sont le sol, l'eau, la lumière, les objets. Il aspire à une architecture d'apaisement, qui dialogue avec le lieu et s'attache à nous le faire voir différemment avant de s'apaiser pour trouver sa place. C'est bien dans cet esprit que nous envisageons les développements de ce chapitre. Notre proposition d'une architecture construite en connaissance d'une relation au monde et qui influence cette relation ne sera pas pour autant explicitement verte ou militante. Cette nuance est illustrée par exemple par la différence entre la Fortbildungsakademie Mont-Cenis (Sodingen, Françoise-Hélène Jourda & Gilles Perraudin en 1999) et la Latapie House (Floirac, Anne Lacaton et Jean-Philippe Vassal en 2009) : si les deux projets mettent en évidence une relation particulière de l'homme à la nature au travers de la question de l'énergie, le premier le fait par l'utilisation des forces naturelles pour transformer un climat local, le second par la synchronisation de rythmes climatiques et de variations spatiales. Un autre exemple est la différence entre la Corrugated Cardboard Pod, (Hale County, Rural Studio en 2001) et la China Academy of Art (Hangzhou, Wang Shu en 2007) : le premier manifeste explicitement un choix de matière recyclée, tandis que le second exprime une la capacité d'entretien et de renouvellement liée au langage architectural et au mode constructif. Tous ces projets intègrent des principes d'architecture écologique, mais les formalisent de façon manifeste ou plus subtile.

12.2.1 Identité climatique

Nous définissons l'identité climatique d'un lieu comme l'ensemble des qualités associées par les habitants à un espace et liées à la perception des paramètres physiques de l'ambiance (température, humidité, luminosité, mouvement d'air, etc.). Chaque espace peut être caractérisé par une identité climatique, comme mentionné au chapitre 11.4. Les composants de cette identité et

leur possible perception sont autant de pistes de travail possibles pour l'architecte. Cette identité est variable dans le temps et selon les individus. Il s'agit d'une notion subjective et culturelle construite en partie sur une réalité physique mesurable, comme le relève Philippe Madec : "Quand la lumière est réduite aux lux, les sons aux décibels, quand les odeurs relèvent de l'olfactif, c'est la culture qui est évacuée" (Gauzin-Müller *et al.*, 2009). Cette notion d'identité climatique intègre donc les variables physiques sous leur forme sensible de chaleur ou mouvement d'air par exemple. La réalité d'une relation entre sensation thermique et compréhension du lieu a été décrite notamment par Lisa Heschong (Heschong, 1981). Nous proposons donc que les architectes développent une sensibilité pour les identités climatiques, une capacité à les définir et à concevoir des espaces et technologies en fonction de cette définition. A ce titre relevons immédiatement deux constats : (1) la perception sensible par le corps humain d'une ambiance est l'affaire de plusieurs sens. Toucher, sensation thermique, auditive et visuelle peuvent être mobilisés pour rendre perceptible l'identité climatique d'un lieu. Il sera dès lors pertinent de viser une approche multi-sensorielle du monde physique. (2) En outre, cette perception est basée sur la détection de variations plus que de grandeurs absolues. La conception de lieux aux conditions physiques variables dans le temps et l'espace est donc à l'évidence un axe de travail majeur, qui impliquera la remise en cause des définitions du confort telles que standardisées actuellement, dans la mesure où ces définitions tendent à l'uniformisation des ambiances.

Cette notion de variabilité dans le temps et l'espace, qui peut par exemple prendre la forme d'espaces de transition et de noyaux est fortement présente dans l'architecture climatique (voir par exemple la maison à Regensburg de Thomas Herzog. Cette architecture postule que "s'intéresser au confort des individus dans leur maison demande de déterminer le type d'ambiance intérieure qui convient le mieux aux activités domestiques de l'homme. Cette interrogation met en évidence les problèmes relatifs aux climats artificiels. Ceux-ci ne peuvent évidemment pas satisfaire aveuglément la préférence qu'ont les individus pour les températures agréables. Il importe au contraire de diversifier les ambiances au même titre que nous diversifions notre alimentation." (André De Herde in (Paige *et al.*, 1986)). Fondamentalement, l'architecture climatique ne vise pas l'économie d'énergie, mais une forme de confort basée sur la diversité des ambiances née de la diversité des espaces. Ce n'est que dans un second temps, lorsque l'on choisit de réaliser des conditions d'ambiance particulières par l'utilisation d'énergie, que les principes mis au jour par l'architecture climatique peuvent être utilisés pour réduire la consommation énergétique. En cela l'architecture climatique diffère fondamentalement de l'architecture solaire qui vise à utiliser des phénomènes dans un but strictement énergétique et non sensible. L'architecture solaire "utilise les matériaux

dont elle est construite pour capter directement, stocker et distribuer l'énergie solaire à ses habitants. [...] La maison entière est un système énergétique solaire dont de nombreux composants ont désormais une fonction double : à la fois la fonction traditionnelle de procurer un enclos et la fonction énergétique de capter, stocker, distribuer et dissiper la chaleur." (Lebens, 1980)

L'approche que nous voulons donner au travail sur l'identité climatique s'inscrit dans la lignée de l'architecture climatique. Il ne s'agit pas de mettre en avant des principes constructifs de valorisation du climat pour minimiser une consommation d'énergie, ou de constater l'influence du climat sur des espaces diversement exposés pour en définir l'habitabilité, mais bien d'agir volontairement sur la nature de ces identités climatiques. Cette action volontaire doit bien évidemment se réaliser par les moyens les moins consommateurs d'énergie, et donc être cohérente avec les contraintes et opportunités climatiques, mais il ne s'agit là que de considérations de réalisation alors que notre proposition est plus fondamentale.

Le travail de Philippe Rahm peut de ce point de vue être mis ici en exergue. Nous avons déjà mis en évidence que sa proposition de constituer des espaces au départ de phénomènes physiques tels que les écoulements illustrait le précepte de globalisme, en tant qu'il répond à la question *Qu'est-ce que la connaissance du cycle de l'énergie suggère comme démarche à l'échelle des espaces ?* (voir le chapitre 9). Nous pouvons maintenant également rapprocher son travail de la proposition faite ici de définir explicitement une diversité d'ambiances souhaitées avant de se donner les moyens de la réaliser, même si les moyens de réalisation qu'il se donne peuvent être discutés. Notons également que la discussion menée dans la section 11.6 sur la différence entre confort et salubrité peut être relue à la lumière de la notion d'identité climatique. Les conditions de salubrité que nous y proposons constituent le noyau thermique d'une identité climatique particulière.

De ce qui précède, nous pouvons énoncer que les choix d'identités climatiques devraient se faire en intégrant les principes suivants :

- valoriser la diversité des identités climatiques dans le temps et l'espace en jouant sur les comportements dynamiques des grandeurs physiques ;
- valoriser la richesse de perception de ces identités par une approche multi-sensorielle ;
- valoriser la compréhension et la multiplicité des interprétations de ces identités par une intégration de l'habitant dans leur définition et leur choix de matérialisation.

12.2.2 Comportement

Les comportements des individus relativement aux enjeux énergétiques peuvent être révélateurs d'une attitude plus large face à l'environnement. La preuve en est l'influence de la prise de conscience énergétique actuelle sur les modes de vie d'une partie de la population. Cette relation entre prise de conscience et comportement n'est cependant pas automatique, d'autres facteurs pouvant interférer tels que l'inertie comportementale, des contraintes économiques, un manque de perception de son rôle ou de sa capacité d'action, etc.

Pour prétendre à une influence sur les comportements énergétiques dans un bâtiment, il est nécessaire que le concepteur réfléchisse à la liberté d'action laissée à l'habitant et au sens que prendra cette liberté. Nous évoquons par ailleurs (chapitre 5) le fait que laisser une capacité d'action aux habitants, les voir comme des acteurs et non comme des occupants permettait des économies d'énergie par la mise en place de stratégies d'adaptation comportementale notamment, et une modification des plages de confort. L'idée que l'occupant est un élément perturbateur d'une stratégie énergétique est contreproductive. Il faudrait inverser la logique des codes de la construction qui voit l'habitant comme un élément passif à protéger de risques potentiels (Cole *et al.*, 2010). Notons que la mise en évidence du rôle de l'habitant est déjà présente dans l'architecture bioclimatique, qui se différencie en cela de l'architecture climatique présentée plus haut : "intégrer la donnée climatique ne peut se limiter à la considération pure et simple de l'habitat comme objet, mais repose la relation première entre l'homme, son habitat et son environnement : c'est le bioclimatisme" (André De Herde in (Paige *et al.*, 1986)).

Une liberté d'action peut cependant mener à des comportements non optimaux, qu'une automatisation peut travailler à résoudre. L'exemple du bénéfice énergétique apporté par l'automatisation de l'extinction de l'éclairage artificiel en est un exemple parlant. La définition du degré d'autonomie à laisser à l'habitant n'est donc pas évidente. Le principe de responsabilité partagée plaide pour un transfert du pouvoir de décision vers l'habitant, tandis que celui de précaution invite à se prémunir de comportements inefficients. Une responsabilisation conditionnée parait donc la voie à suivre. La condition de cette responsabilisation serait l'adéquation entre le niveau d'autonomie laissé à l'habitant et sa compréhension des conséquences de ses choix.

Cette adéquation implique au niveau du concepteur d'intégrer les capacités connues ou supposées du futur habitant et de travailler à les développer. En outre et plus concrètement, la compréhension des impacts des comportements

par l'habitant peut être facilitée par le choix de dispositifs technologiques. Compteurs d'énergie et sondes diverses, voir dans une certaine mesure des outils de gestion informatiques si la complexité du bâtiment l'impose peuvent faciliter cette compréhension. Mais les organes de régulation ne sont pas les seuls à pouvoir être réfléchis dans le sens de la responsabilisation. La centralisation et l'automatisation des techniques de contrôle climatique aujourd'hui crée une distance entre les habitants et les conditions climatiques intérieures. Cette distance peut être illustrée par la comparaison d'un chauffage centralisé et d'un système basé sur un poêle à recharge manuelle. Cette recharge régulière rend plus directement perceptible la consommation d'énergie, par le poids du combustible à charger régulièrement, que la lecture occasionnelle d'un compteur dans une cave. Un autre exemple est la question de la définition du bâtiment zéro-énergie déjà discutée au chapitre 7. En théorie, l'efficacité énergétique demande une définition basée sur une compensation a terme entre une consommation d'énergie fossile et une production d'énergie renouvelable, au travers d'un réseau, plutôt qu'une recherche d'autonomie réelle par stockage sur site. Cependant, la compréhension de la finitude de la ressource manifestée par ce stockage rend beaucoup plus perceptible par l'habitant la préciosité de l'énergie qu'il consomme.

Une prise en compte des aspects comportementaux dans le cadre développé ici implique donc de valoriser le statut d'acteur de l'habitant, pour autant que l'on veille à garantir sa compréhension et sa capacité d'usage des technologies mise en œuvre. Il faudra donc privilégier les technologies permettant une action réfléchie de l'habitant et une mesure sensible par celui-ci des conséquences de son action. De cette façon, l'architecture favorisera la prise de conscience par l'habitant de son immersion dans le milieu, ce qui constitue la première étape d'un travail de remise en cause du rôle qu'il joue dans ce milieu.

12.3 Conclusion - éléments d'une approche soutenable

Dans ce chapitre, nous plaidons pour que l'architecture intègre un travail sur la relation homme-monde dans un sens de transformation de cette relation. Notre volonté de travailler cette relation est justifiée par le principe d'intégration de la composante culturelle et la vision d'une écologie construite sur la compréhension des relations entre l'homme et son milieu. Il n'appartient pas à la seule architecture de parvenir à une modification de cette relation, mais elle dispose de moyens pour en mettre en évidence différents aspects. Cette mise en évidence nous semble un préalable indispensable à un travail plus réflexif.

L'énergie est présentée comme un vecteur intéressant dans cette optique par sa multiple dimension physique et culturelle. Aussi proposons-nous de la considérer comme un outil de mise à jour et d'influence de la relation homme-monde. Pour travailler l'énergie dans ce sens, nous suggérons deux axes : travailler à rendre perceptibles les conditions physiques de l'habitat au travers de la notion d'identité climatique et travailler à rendre conscients les comportements liés à l'énergie. Nous proposons et définissons donc la notion d'identité climatique comme l'ensemble des qualités associées par les habitants à un espace et liées à la perception des paramètres physiques de l'ambiance. Cette identité peut être utilisée comme élément de définition des espaces et donc de conception. Le lien entre cette notion et l'architecture climatique est mis en évidence. L'aspect comportemental est brièvement discuté dans le sens d'une responsabilisation. Nous mettons en évidence que cette responsabilisation passe à la fois par une capacité d'action et une compréhension des conséquences des actions. Cette idée de compréhension des conséquences peut être travaillée de différentes façons, par la technologique ou par des dimensions sensibles.

Il est évident que les propositions faites ici mettent en question la notion de confort et plus largement le mode de vie. Nous ne souhaitons cependant pas que cette remise en cause soit perçue comme un renoncement. De façon caricaturale, on pouvait voir l'architecture vernaculaire comme la mise en œuvre de moyens limités pour satisfaire au mieux une aspiration au confort dans un contexte climatique donné. A l'opposé, l'architecture actuelle est la mise en œuvre de moyens toujours limités pour minimiser la consommation d'énergie liée à un niveau de confort non discuté. Dans aucun de ces extrêmes la question du mode de vie à privilégier n'est posée. Soit c'est une idée du confort inaccessible faute de moyens, soit une définition *a priori*, peu remise en cause par les projets d'architecture. C'est précisément la question du mode de vie à privilégier que nous ouvrons par les éléments discutés ici. Quel mode de vie correspond au type de relation que nous souhaitons développer avec notre environnement physique ? Partant du double constat de nos moyens techniques actuels et de la nécessité d'adapter les modes de vie, il est nécessaire aujourd'hui de poser cette question. Sans préjuger de ce que pourra produire ce questionnement, il nous semble qu'un élargissement de la notion de confort thermique à celle de confort de vie sera utile, selon l'idée qu'une avancée des concepts autour de notions connues nécessite une modification des définitions de ces notions, ou l'inclusion d'éléments autres.

Enfin, notons que les réflexions présentées dans ce chapitre montrent qu'un champ de recherche important existe dans l'analyse des comportements individuels et collectifs face aux enjeux énergétiques et aux idées écologiques, et

dans la façon dont ces comportements peuvent être influencés notamment par des dispositifs technologiques ou spatiaux. C'est donc une nouvelle fois le rôle central de l'être humain dans la question énergétique qui est mis en évidence dans ce chapitre.

Chapitre 13

Adapter les méthodes de conception

La considération des méthodes de conception est justifiée par la plupart des principes du développement durable. Par méthodes de conception nous désignons ici plus les méthodes de travail et d'organisation que les processus intimes de création. Le principe d'intégration des composantes pose la question du comment faire cette intégration. Le principe d'équité pousse à inventer des indicateurs permettant d'intégrer l'équité entre acteurs. Le principe de participation nécessite de se demander comment intégrer les habitants à l'élaboration du projet. Le principe de responsabilité invite à reconnaître la part de responsabilité de chaque intervenant, et à permettre à chaque acteur de traduire sa responsabilité en actes. Le principe de précaution suggère que l'on s'inspire des méthodes d'analyse et de gestion du risque.

Ce chapitre propose donc 3 analyses, à savoir :

- l'examen de ce qu'une approche d'analyse des risques peut apporter dans la conception de projets d'architecture énergétiquement performants, y compris deux études plus détaillées sur la place des modélisations numériques et la précision des méthodes de calcul statiques ;
- l'analyse de l'apport des démarches participatives dans la conception de projets basse énergie, articulé autour de l'identification des différentes responsabilités de chaque intervenant ;
- une réflexion originale sur la nature des indicateurs utilisés pour l'évaluation de la qualité énergétique des projets.

L'examen de ce qu'une approche d'analyse des risques apporte est réalisé en premier et permet d'établir un cadre englobant les deux autres analyses.

13.1 Intégrer l'analyse du risque

Les éléments utilisés dans cette section pour définir la notion de risque sont repris essentiellement de la famille de normes ISO 31000 (ISO, 2009b; ISO, 2009a; ISO/IEC, 2009).

La vision traditionnelle du risque par l'ingénieur est une fonction de la combinaison de la probabilité d'un évènement et de sa conséquence. Cette vision remonte à la définition du risque par Daniel Bernouilli en 1738 : "le risque est l'espérance mathématique d'une fonction de probabilité d'événements" (Bernouilli, 1967). Soit si un événement e_i a une probabilité d'occurrence p_i avec une conséquence probable C_i, la valeur de l'aléa i est le produit p_i*C_i et le risque lié à l'ensemble des évènements possibles est $r = \sum p_i * C_i$.

Cette vision a été actualisée récemment et reformulée en intégrant la notion d'objectif : "le risque est l'effet de l'incertitude sur les objectifs" (ISO, 2009b). Ce faisant, nous sortons d'une vision du risque comme un évènement possible, à éviter et aux conséquences à évaluer, pour passer à une vision plus générale de non réalisation, ou réalisation partielle d'un objectif. Dans cette vision, le risque est la combinaison d'un enjeu et d'aléas. Cette vision s'applique assez immédiatement à la question de la performance énergétique : l'enjeu est la réalisation effective des ambitions, les aléas étant tous les éléments faisant que ces ambitions ne sont que partiellement rencontrées.

Le processus de gestion du risque implique plusieurs étapes : l'établissement du contexte, l'identification du risque, l'analyse du risque, son évaluation, et son traitement, étapes auxquelles il faut adjoindre les processus de surveillance et de communication (voir figure 13.1). Certaines de ces étapes sont discutées par la suite. Le parcours de ces étapes fera souvent écho aux principes de *commissioning*. Cette notion, plus courante dans le secteur de la construction que l'analyse de risque recouvre un processus de contrôle de la qualité dont nous dirons un mot plus loin. Nous pensons cependant que l'analyse de risque, telle que décrite ici, est une notion plus pertinente pour traduire le principe de précaution, notamment parce qu'elle intègre explicitement la notion d'incertitude.

Comme autre préalable, notons que le management des risques suit 11 principes (ISO, 2009a), parmi lesquels nous jugeons utile de relever les cinq suivants :

1. Le management des risques est intégré aux processus organisationnels. Il ne s'agit pas uniquement d'un apport extérieur pour résoudre un point technique. Le management des risques doit être intégré tant au niveau

stratégique qu'au niveau opérationnel dans la gestion du projet et, pour notre propos, dans la gestion et maintenance du bâtiment.

2. Le management des risques est intégré aux processus de prise de décision. Il s'agit d'une aide à la décision pour faire des choix argumentés, pour définir des priorités et pour sélectionner les actions les plus appropriées. Ce principe exprime clairement la pertinence d'une stratégie de management du risque dans le cadre du principe de précaution.
3. Le management des risques traite explicitement de l'incertitude. Il sera donc nécessaire de se donner les outils, notamment mathématiques, nécessaire pour l'évaluation et l'utilisation de l'incertitude.
4. Le management des risques s'appuie sur la meilleure information disponible. L'incertitude à considérer n'est pas uniquement celle liée aux conséquences futures, mais également celle liée à la limite de nos connaissances actuelles.
5. Le management des risques intègre les facteurs humains et culturels. Il ne s'agira donc pas uniquement d'analyses technico-économiques, mais bien d'études plus larges intégrant une dimension organisationnelle.

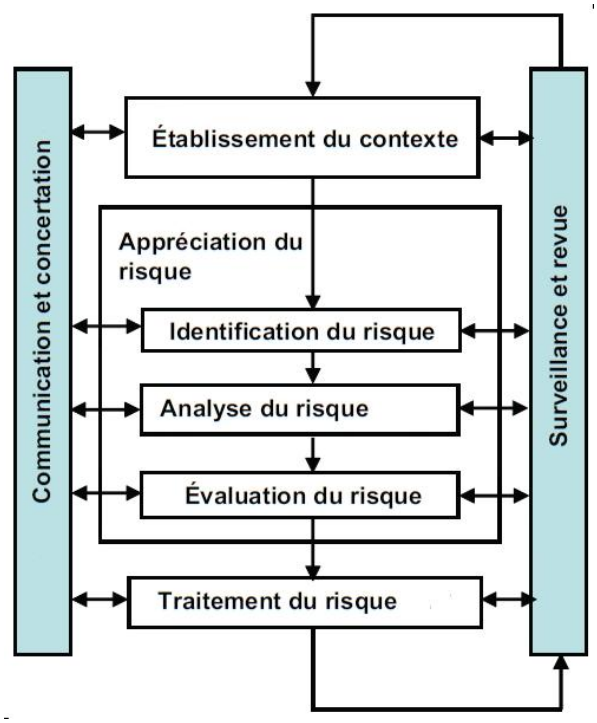


FIGURE 13.1 – Etapes du processus de management du risque (ISO, 2009a)

13.1.1 Communication et concertation

Un processus de communication et de concertation entre toutes les personnes impliquées dans le management du risque est nécessaire à chaque étape. Dans le cas des performances énergétiques, cette consultation doit intégrer le concepteur, l'installateur et le gestionnaire du dispositif envisagé.

La principale difficulté dans le domaine du bâtiment est la mise en communication effective de tous les acteurs. Or, cette communication est indispensable d'une part pour permettre à chaque acteur d'avoir une perception éclairée du risque et d'autre part pour intégrer dans la prise de décision les nuances entre les perceptions du risque des différents acteurs. Les méthodes de participation développées plus loin apparaissent donc comme un élément de base de la gestion des risques liés à la qualité énergétique. Nous considérons dès lors qu'elles doivent être assimilées à des dispositifs d'économie, et trouver systématiquement une place dans le processus de conception lorsqu'une haute performance énergétique est visée.

13.1.2 Etablissement du contexte

L'établissement du contexte intègre une dimension externe et interne. La limite proposée par la norme ISO 31000 :2009 entre ces dimensions est celle de l'organisme, cette norme étant avant tout orientée vers le management d'entreprise. Nous proposons de traduire cette limite non pas à l'échelle d'un bureau d'architecture ou d'étude, mais d'équipe de conception au sens large, intégrant le maître d'ouvrage et l'entreprise. Nous considérons donc comme interne tout ce qui relève de la prise de décision et de l'application des dispositifs techniques et architecturaux, et comme externe tout ce qui échappe aux équipes de conception.

Le contexte externe est dès lors l'ensemble des demandes formulées par la société relativement à la performance du projet à concevoir. Notons à ce titre l'existence d'exigences réglementaires (PEB), de labels (*Passivhaus*, Breeam, Valideo) et de concepts (net zéro-énergie), auxquelles s'ajoutent des obligations d'ambition discutées dans le chapitre sur le principe d'équité inter et intragénérationnelle. Ajoutons également ici les demandes pouvant être formulées par l'occupant futur, en termes d'habitabilité des espaces construits, de facilité d'usage des techniques proposées et de maintien dans le temps des performances techniques, environnementales et économiques.

L'analyse du contexte interne cherche à permettre un processus de management du risque cohérent avec la culture et la structure de l'équipe de concep-

tion. Cette partie implique d'identifier les rôles et responsabilités de chacun, les politiques et stratégies à mettre en place, les aptitudes de chacun, les relations entre les parties prenantes au sein de l'équipe et les flux d'informations au sein de l'équipe. Cette phase de diagnostic est indispensable pour intégrer dans le processus de management du risque les facteurs organisationnels. Appliquée à la conception d'un bâtiment, cette analyse peut être l'occasion d'une mise à plat des expertises de chaque acteur afin d'identifier d'éventuels manques dans les compétences rassemblées, ou des transferts d'expertise à organiser entre acteurs. Elle est l'occasion d'une définition conjointe de méthodes de travail et d'une clarification des responsabilités contractuelles de chaque acteur relativement à la performance énergétique finale.

Enfin, l'établissement du contexte implique une phase de définition des critères permettant d'évaluer l'importance du risque. La définition de ces critères doit prendre en compte la méthode de définition de la vraisemblance et du niveau des risques, le niveau d'acceptabilité d'un risque, la méthode de prise en compte de plusieurs risques combinés, etc. Typiquement, parmi ces critères se trouveront le niveau de précision attendu des évaluations et donc le type d'outils d'évaluation utilisés et la plage de variation tolérée des résultats par rapport aux performances réelles.

Il importe que cette analyse du contexte soit faite dès la phase de programmation, car elle peut servir de base à une modification de l'équipe de conception (compétences manquantes), à une modification des contrats (responsabilisation vis-à-vis des performances réelles ou estimées) ou à une modification de la méthode de travail (phases de partages d'expériences, formations spécifiques, etc.).

13.1.3 Identification des risques

Cette étape vise à dresser une liste exhaustive des risques basée sur les évènements susceptibles de provoquer, stimuler, empêcher, gêner, accélérer ou retarder l'atteinte des objectifs. Parmi ceux-ci, il convient d'intégrer les risques associés au fait de ne pas saisir une opportunité. Les risques listés doivent l'être quelle que soit leur source (contrôlable ou non, identifiée ou non), et intégrer leurs conséquences possibles, y compris les réactions en chaîne et effets de cascade.

Dans le cadre de l'obtention d'une haute performance énergétique, nous identifions les risques repris au tableau 13.1 dont l'enchaînement est présenté dans

la figure 13.2. Cet inventaire ne concerne que les risques liés à la gestion de projet et aux processus d'étude et de décision. Une analyse de risque spécifique pourrait être réalisée pour chaque technique ou mode constructif.

TABLE 13.1 – Risques liés à l'objectif de haute performance énergétique

Phase		Risque	Conséquence
Programmation	1.1	Mauvaise définition des objectifs (indicateurs et critères partiels ou inadéquats)	Incapacité à analyser la qualité des solutions proposées
	1.2	Mauvaise constitution de l'équipe (manque d'expertise ou de volonté, oubli d'acteurs)	Vision tronquée du problème, manque d'anticipation, manque de suivi de l'objectif
	1.3	Mauvaise organisation de l'équipe (responsabilités peu ou mal formalisées, mode de fonctionnement inadéquat)	Manque de communication, opportunité de qualité non saisie
Conception	2.1	Imprécision des outils d'évaluation	Degré d'incertitude sur les résultats
	2.2	Mauvaise traduction des objectifs dans les évaluations	Utilisation des outils d'une façon non pertinente pour répondre à la question posée
	2.3	Mauvaise interprétation des résultats d'évaluation	Décisions non conformes au conclusions
	2.4	Intégration partielle ou inadéquates des conclusions d'évaluation dans le projet	Mise en péril du fonctionnement des dispositifs mis en œuvre
	2.5	Effets combinés inattendus avec d'autres dimensions du design	Interférences entre dispositifs modifiant le comportement de ceux-ci
Exécution	3.1	Mise en œuvre non conforme aux prescriptions	Degré d'incertitude sur les performances, voire fonctionnement inadéquat
	3.2	Variabilité de la performance des composants mis en œuvre	Degré d'incertitude sur les performances
	3.3	Contrôle de réception partiel ou inadéquat	Non détection de mise en œuvre inadéquate
Opération	4.1	Utilisation du bâtiment non conforme aux attentes	Degré d'incertitude sur les performances
	4.2	Gestion des équipements non conforme aux attentes	Degré d'incertitude sur les performances
	4.3	Usure d'un dispositif sans capacité de restauration adéquate	Diminution des performances dans le temps

13.1.4 Analyse des risques

L'analyse implique la compréhension du risque. Cette analyse a pour but de fournir des données permettant la décision de traiter ou non le risque, et de déterminer les stratégies et méthodes de traitement les plus appropriées.

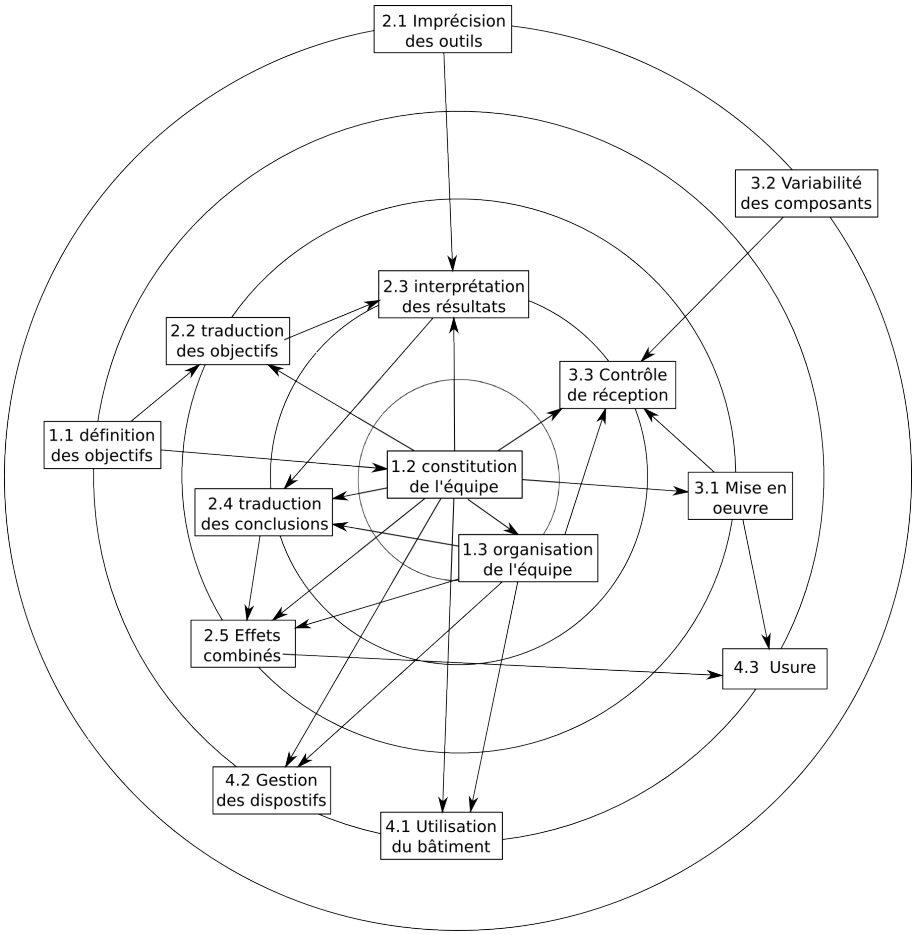


FIGURE 13.2 – Enchaînement des risques identifiés liés à l'objectif de haute performance énergétique

L'analyse du risque implique la prise en compte des causes du risque et de ses conséquences positives et négatives. L'analyse doit également prendre en compte les moyens de maîtrise des risques existants, leur efficacité et leur performance. Cette analyse peut être quantitative, qualitative ou semi-quantitative. Cette analyse comporte elle-même un degré de confiance devant être pris en compte.

L'analyse exhaustive des 14 risques identifiés est un travail d'une ampleur dépassant cette thèse. Nous nous limitons ici à mener deux réflexions. La première a trait à la question de l'incertitude dans l'évaluation *a priori* des performances énergétiques (risque 2.3 "incertitude des résultats"). La seconde cherche à mettre en évidence par un exemple l'impact du niveau de performance énergétique recherché sur le risque 2.1 "Imprécision des outils d'évaluation".

Incertitude et prévision des performances

Les probabilités sont un outil évident d'analyse de risque. Elles peuvent être utilisées en physique du bâtiment à deux niveaux : par la prise en compte d'une incertitude sur les hypothèses faites dans l'évaluation des performances énergétiques et par la prise en compte de scénarios probables d'évolution dans le temps de ces hypothèses.

Pour une estimation des performances énergétiques, il est nécessaire de faire des hypothèses relativement à la qualité des matériaux et de leur mise en œuvre, aux caractéristiques des équipements techniques, à leur mode de gestion et aux modes d'occupation du bâtiment. L'évaluation des incertitudes relatives à ces différents points est particulièrement compliquée, faute d'une documentation suffisante. Il n'existe pas à notre connaissance d'échantillonnage publié indiquant l'incertitude associée aux qualités physiques des matériaux de construction ou techniques HVAC. Plus encore, il est connu que la qualité de mise en œuvre est souvent un grand point faible dans l'industrie du bâtiment. Mais là non plus nous ne disposons pas d'études permettant d'évaluer cette qualité et d'identifier le poids de différents paramètres techniques ou organisationnels dans cette qualité. Nous sommes donc incapables de prévoir *a priori* un facteur de qualité de mise en œuvre. Les modes de gestion et d'occupation bénéficient d'une plus grande documentation grâce aux enquêtes de *post occupancy evaluation*. Plus simples à mesurer, les taux et rythmes d'occupation de nombreux bâtiments ont pu être observés et des valeurs représentatives sont citées dans différentes normes (voir par exemple la norme ISO13790 (ISO, 2008)). Une mesure de variation autour de ces typologies devient donc envisa-

geable. Certaines recherches commencent également à proposer des modèles de comportement intégrant des éléments de probabilité pour caractériser les interactions entre l'habitant et le bâtiment, dans certaines configurations précises (voir par exemple (Rijal *et al.*, 2007)).

La question de l'évolution dans le temps des performances intrinsèques d'un bâtiment est peut-être encore plus délicate, car par définition elle relève de l'extrapolation et non de l'analyse. La masse de bâtiments existants représente un potentiel d'apprentissage gigantesque sur l'évolution dans le temps des performances énergétiques. Mais l'évolution des modes constructifs et de gestion, les changements de comportement et la nature de prototype de chaque projet (entendu ici comme la rencontre de dispositifs techniques et d'un mode d'habiter) rendent toute extrapolation délicate. Cette analyse permettrait néanmoins de mettre en évidence les facteurs influençant le rythme d'évolution des performances dans le temps (nature des techniques ? complexité de l'installation ? profil socioculturel de l'habitant ? type de propriété ? etc.). Cette difficulté est d'autant plus grande si nous nous plaçons dans le cadre des nécessaires changements de comportement vis à vis de l'énergie, poussés par les enjeux économiques et environnementaux. Nous pouvons faire l'hypothèse d'une amélioration probable des modes de gestion et d'entretien par rapport à l'existant, mais dans quelle mesure et à quelles conditions ? La matière à analyser est donc grande, mais la capacité de l'existant à nous faire anticiper le futur semble limitée.

Enfin, la question de l'évolution dans le temps pose également celle de l'évolution du contexte physique et social dans lequel se trouve le bâtiment. Des modifications d'affectation, grandes ou légères, ont un impact sur la qualité énergétique. La prévision de ces modifications est complexe car liée à la gageure d'une compréhension de l'évolution des contextes sociaux (quelles formes d'habiter ? quelle structure familiale ?) et économiques sur plusieurs décennies. Le contexte physique et particulièrement climatique est également appelé à changer. Si le GIEC émet des scénarios d'évolutions climatiques, leur intégration dans la modélisation des bâtiments doit se faire avec certaines précautions pour trois raisons. (1) Ils sont clairement présentés comme dépendants d'évolutions socioculturelles considérées par les climatologues comme équiprobables, faute de capacité de prévision. Or ces différents scénarios ont un impact majeur sur les évolutions climatiques. (2) Chaque scénario se traduit par une fourchette large de prévision (plusieurs degrés) qui reflète la diversité des résultats des modèles climatiques terrestres existants. (3) Ces modèles sont eux-mêmes l'objet de critiques. James Lovelock insiste par exemple sur la possible sous-évaluation de boucle de rétroactions positives (mécanismes d'atténuation des changements climatiques, tels qu'une augmentation de la

photosynthèse) et négatives (effet masquant du changement d'état des glaces arctiques sur l'évolution globale de la température, qui provoquera une brisure dans l'évolution climatique une fois ces glaces en grande partie fondues) (Lovelock, 2007).

Ces constats étant posés, nous sommes amenés à considérer que la prévision exacte des performances énergétiques d'un bâtiment particulier est malaisée. A titre d'exemple, nous reprenons en figure 13.3 le relevé des besoins de chauffage réel des logements étudiés dans le cadre du projet Cepheus, lesquels étaient conçus pour présenter un besoin de chaleur de 15 kWh/(m²an) (Feist *et al.*, 2001b). Il semble qu'une prévision exacte ne soit possible que dans des circonstances précises que nous pensons liées aux aspects techniques et d'occupation. Relativement, aux aspects techniques, il s'agit d'un accès à une documentation exhaustive sur les composants mis en œuvre, mais surtout d'une garantie de suivi et de vérification de la qualité de la mise en œuvre. Relativement aux aspects d'occupations, une prévision correcte ne peut se faire que si les occupants peuvent être assimilés à un élément passif (par exemple, soumis à un horaire strict et une très faible capacité d'interaction avec le bâtiment) ou à un élément dont le comportement est déterministe (par exemple suite à une information bien intégrée sur le comportement à tenir dans le bâtiment, comme on en voit parfois dans le cadre de bâtiments intégrant des stratégies de *free cooling*).

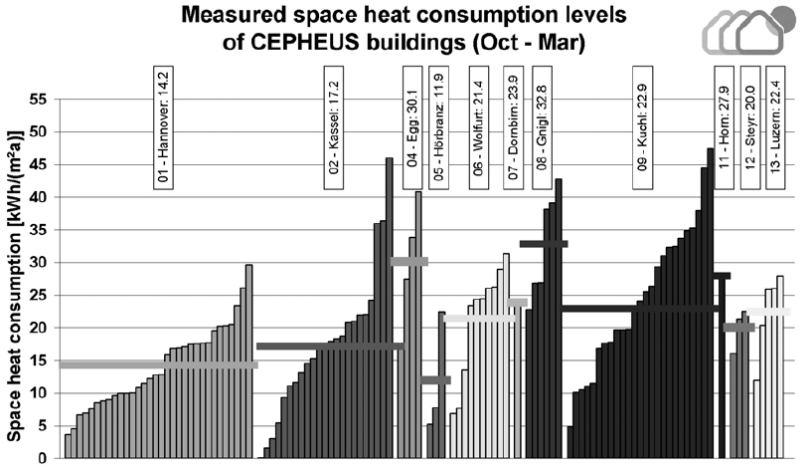


FIGURE 13.3 – Relevé des demandes de chaleur des logements étudiés dans le projet Cepheus. Bien que les moyennes correspondent aux résultats attendus, on constate une grande dispersion selon les logements. Figure reprise de (Feist *et al.*, 2001b).

L'incapacité à prévoir la performance énergétique réelle n'est pas en soi une preuve que cette performance est le résultat de processus non déterministes. Cependant, l'intervention dans la question énergétique de la composante humaine et de sa complexité propre est un indice important d'un tel comportement. Cet indéterminisme relatif ouvre de vastes champs de recherche relatifs à l'amélioration réelle de la performance énergétique des bâtiments existants, dont la faible performance ne serait pas entièrement une fatalité. Il ne doit cependant pas freiner la recherche de description et prévision du comportement énergétique des bâtiments, mais impose une clarification de l'objet de cette recherche. L'anticipation d'une performance par le biais de modélisations ne devrait en effet pas servir à anticiper un résultat qui serait inéluctable. Car sans capacité d'action cette évaluation est peu utile. La prévision doit au contraire servir à éclairer les choix en regard de leurs conséquences, selon le principe d'incertitude tel que défini au chapitre 3. Peu importe donc la qualité de la prévision, pour autant que le comportement du modèle constitué intègre correctement les poids relatifs des éléments soumis à comparaison. Il ressort de cela les bonnes pratiques suivantes en termes de prévisions de performances énergétiques :

- La prévision d'une performance selon un scénario unique n'apporte aucune information utile. Ce n'est que la confrontation de scénarios qui permet de tirer une conclusion relative.
- Chaque scénario devrait être présenté avec une mesure d'incertitude. La mesure d'une incertitude globale étant supposée irréaliste, c'est une mesure d'incertitude limitée aux éléments divergents entre les différents scénarios analysés qui doit être proposée. Cette mesure d'incertitude permet une comparaison plus juste entre scénarios.
- Il en découle que le nombre de modifications entre les différents scénarios doit être limité pour que la comparaison soit utile, faute de quoi l'incertitude globale risque de noyer l'impact des modifications analysées.
- L'évaluation des incertitudes des différents paramètres étudiés permet de mettre en évidence une qualité de ces paramètres, à savoir leur fiabilité. La réduction de l'incertitude liée à chaque paramètre ou dispositif est en soi une mesure de qualité énergétique.

Cette discussion est à replacer dans le contexte actuel de conception de bâtiments basse énergie pour lesquels des preuves de qualité sont de plus en plus souvent exigées *a priori*. Il importe face à ce constat de différencier trois types d'évaluations possibles : (1) La recherche d'une anticipation d'une performance réelle, qui nous semble hors d'atteinte pour les raisons invoquées plus haut, la principale étant qu'une simulation ne traite qu'un nombre limité

d'aspects de la performance énergétique ; (2) La recherche d'une preuve de conformité dans le cadre d'un protocole déterminé, qui est ce dont il est question dans les processus administratifs et de certification, laquelle n'est généralement pas en mesure de guider une conception du fait de contraintes méthodologiques uniformisant les procédures d'évaluation (exemple de l'uniformisation des gains internes dans le calcul PHPP) ; Et (3) les évaluations orientées vers la conception, construites en fonction de questions particulières propres à chaque projet. C'est pour ces dernières que les recommandations listées plus haut sont formulées.

Enfin, pour illustrer la possibilité d'assortir tout résultat de simulation d'une mesure d'incertitude, nous menons une évaluation destinée à répondre à la question du mode de chauffage idéal d'une maison à très faible demande de chaleur. En particulier, nous examinons l'intérêt d'un chauffage électrique direct. Ce mode de chauffage est généralement déconseillé en Belgique du fait de son impact en énergie primaire, mais le développement de l'électricité verte et la grande souplesse d'utilisation de ce système pourrait le rendre intéressant en comparaison à un chauffage centralisé distribué par le réseau de ventilation. Cette centralisation induit en effet une relative uniformisation des apports de chaleur et une gestion de l'émission de chaleur moins proche du besoin, tandis que des convecteurs électriques par pièce permettent une gestion théoriquement optimale. Pour étudier cette question nous reprenons un cas d'étude existant qui inclus deux stratégies proches de la question que nous posons (Obyn et van Moeseke, 2012), et y ajoutons une forme d'incertitude quant au comportement de l'habitant. Pour la variante chauffage centralisé (ici un poêle biomasse (rendement énergétique de 70, 75 ou 80 %) lié à un ballon et trois batteries de chauffage sur le réseau de ventilation mécanique), les possibilités d'interventions pour l'habitant sont décomposées en une série de choix, à savoir : une consigne de chauffage pour la zone de ventilation 1 (séjour) de 20.5, 21 ou 21.5°C, une consigne pour la zone 2 (locaux techniques et bureau) de 19, 19.5 ou 20°C, une consigne pour la zone 3 (chambres) de 19.25, 20.25 ou 21.25°C, une consigne pour les salles de bain de 22, 22.5 ou 23°C. Toutes ces consignes sont supposées constantes dans le temps. Enfin, l'habitant peut sélectionner une température de déclenchement au niveau du ballon de chauffage de 57, 60 ou 63°C. Une fois cette température atteinte, l'alimentation du poêle est supposée interrompue, avec un retard de 15 minutes. Toutes les combinaisons d'hypothèses sont jugées équiprobables. Pour les autres hypothèses, ainsi qu'une description détaillée du bâtiment et des systèmes techniques, nous renvoyons le lecteur à l'article original (Obyn et van Moeseke, 2012). Signalons seulement que dans les deux cas une installation solaire thermique est présente et couvre 60 % des besoins d'eau chaude sanitaire. Le cas opposé est celui d'un chauffage électrique direct par local. Pour chaque local (et non plus par zone),

les consignes peuvent être choisies dans les mêmes intervalles que précédemment. Nous intégrons en outre le choix d'un chauffage constant (modulé en puissance par des thermostats locaux) ou intermittent (allumage et extinction idéalisée en fonction de l'occupation) et deux scénarios d'évolution de la part d'énergie verte dans le mix énergétique belge (taux actuel de 7 % et objectif 2020 de 21 %).

Les résultats sont présentés à la figure 13.4. On y constate des besoins de chaleur moindres mais plus variables dans le cas *électrique* que dans le cas *biomasse*, signe que la possibilité de gérer par local et par intermittence ou non a bien un impact important sur ce besoin. Une fois intégrée la conversion en énergie primaire, les cas *biomasse* se révèlent plus intéressants, mais un léger recouvrement est constaté avec les cas *électrique* : la valeur maximale dans le scénario biomasse correspond au 17^{e} centile dans le scénario électricité. En considérant qu'une part importante de l'électricité peut venir de sources renouvelables, la valeur médiane du scénario électricité reste significativement supérieure à celle du scénario biomasse (elle correspond à son 92^{e} centile), mais le recouvrement entre les résultats des deux scénarios est néanmoins important. Ceci montre qu'une comparaison sur la base d'un cas unique pour chaque scénario mènera probablement à la conclusion d'un moindre impact énergétique de la solution biomasse, alors que l'analyse de sensibilité présentée ici mène à une conclusion plus nuancée : la décision quand au type de système à privilégier dépendra de la confiance que l'on peut créditer à l'habitant quand à ses choix de gestion. Une gestion consciencieuse de la liberté permise par un chauffage local électrique peut être plus intéressante d'une gestion peu rigoureuse d'une installation centralisée de type biomasse. Cet exemple illustre clairement la subtilité d'interprétation que peut apporter une mesure d'incertitude à ce type d'évaluations.

Imprécision des outils d'évaluation statique

Nous développons dans cette section une évaluation de la précision des méthodes de calcul statique du bilan énergétique des bâtiments en fonction du niveau de performance énergétique. Cette analyse a fait l'objet d'une publication lors de la conférence Plea2012 (van Moeseke, 2012). Elle démontre que la recherche de minimisation des besoins de chauffage réduit la précision de ces outils. C'est donc un risque tout a fait spécifique à la construction très basse énergie que nous mettons en évidence.

L'explication fondamentale de cette erreur est qu'un accroissement de la performance énergétique d'un bâtiment a pour effet de concentrer sa période

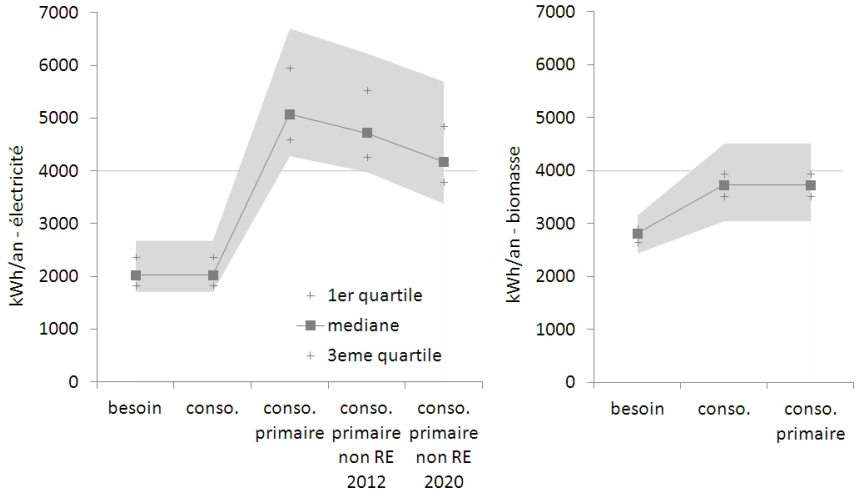


FIGURE 13.4 – Prévision de la consommation d'énergie de chauffage pour un scénario tout électrique ou biomasse, avec mesure d'incertitude, développée comme suite de l'étude de Sophie Obyn (Obyn et van Moeseke, 2012)

de demande de chaleur sur les périodes de l'année qui sont, dans le climat d'Uccle, à la fois les plus froides et les moins ensoleillées. A contrario, un bâtiment de performance moyenne demandera de la chaleur sur une période de temps plus étalée, y compris la mi-saison où des gains solaires conséquents sont disponibles. Dans le même temps, les gains internes liés à l'occupation des locaux peuvent être supposés relativement constants tout au long de l'année. Il y a donc lieu de penser que l'augmentation des performances thermiques est de nature à modifier les impacts relatifs des gains solaires et internes sur le bilan thermique du bâtiment. Or, les méthodes d'évaluation statiques traditionnellement utilisées pour les certifications énergétiques réglementaires ou volontaires (PEB, *Passivhaus*, etc.) sont incapables de capturer cette éventuelle différence de comportement. Cette incapacité est liée au modèle de prise en compte des gains thermiques utilisés par ces méthodes, à savoir le calcul d'un facteur d'utilisation $\eta_{g,h}$ décrit par la norme ISO 13790 (ISO, 2008). Cette méthode est explicitée par les équations 13.2 à 13.5, dans lesquelles γ_H est le rapport gain/perte, $Q_{G,H}$ le total des gains de chaleurs en période de chauffage en mégajoules et $Q_{L,H}$ le total des pertes thermiques en période de chauffage en mégajoules, τ_H est une constate de temps du bâtiment exprimée en heures, χ_j la capacité thermique surfacique de la j^e paroi en kJ/(m^{2}K), A_j la surface de la j^e paroi et $H_{L,H}$ le coefficient de pertes thermiques du bâtiment en W/K. τ_H est une constante pour un bâtiment particulier, tandis que γ_H et $\eta_{g,h}$ doivent être recalculés sur base mensuelle ou hebdomadaire. On constate rapidement que le facteur d'utilisation dépend de la masse et des déperditions du bâtiment.

Les propriétés d'effusivité et de diffusivité des matériaux sont négligées, de même que la distribution temporelle et spatiale des gains solaires. Nous allons donc analyser l'impact du niveau de performance énergétique sur la précision de ce facteur d'utilisation.

$$\text{si } \gamma_H = 1 \longrightarrow \eta_{g,h} = \frac{1 - \gamma_H^{a_H}}{1 - \gamma_H^{(a_H+1)}} \tag{13.1}$$

$$\text{sinon } \longrightarrow \eta_{g,h} = \frac{a_H}{a_H + 1} \tag{13.2}$$

$$\text{avec chaque mois } \gamma_H = \frac{Q_{G,H}}{Q_{L,H}} \tag{13.3}$$

$$\text{et pour les bâtiments résidentiels } a_H = 1 + \frac{\tau_H}{15} \tag{13.4}$$

$$\text{avec } \tau_H = \frac{\sum \chi_j A_j / 3.6}{H_{L,H}} \tag{13.5}$$

Pour ce faire, nous construisons avec Trnsys 17 un modèle dynamique représentant une maison isolée dont le niveau de performance thermique est librement déterminé. Pour différents niveaux de déperditions thermiques, des simulations parallèles sont réalisées, avec ou sans gains internes et solaires. Par comparaison entre ces simulations, nous pouvons déduire la réalité de la valorisation des gains internes et solaires et définir des facteurs d'utilisations selon les équations 13.6 à 13.8. Dans ces équations, UF_{solar}, UF_{int} et UF_{gain} représentent respectivement les facteurs d'utilisation des gains solaires, internes et totaux. HD est la demande de chaleur, l'indice indiquant à quelle hypothèse elle correspond vis à vis des gains gratuits. SG_{HP} et IG_{HP} sont les gains solaires et internes pendant la période de chauffe. Ces facteurs d'utilisation peuvent ensuite être comparés avec ceux obtenus selon la norme ISO 13790 en base mensuelle. Pour le calcul de $\eta_{g,h}$, les valeurs de $Q_{G,H}$ et $Q_{L,H}$ sont extraites des simulations dynamiques. a_H est calculé sur base de la constante de temps du bâtiment, laquelle varie entre 54 h et 174 h pour les différents cas considérés. Ces cas sont déterminés par variation des propriétés des parois, fenêtres (mais sans modification du facteur solaire de plus de 1 %), niveaux d'étanchéité à l'air et de récupération de chaleur sur la ventilation. Le coefficient de déperdition varie en conséquence entre 287 et 89 W/K (soit entre 0.69 et 0.41 W/m^{2}K). Le bâtiment considéré est représente en figure 13.5 et a déjà été utilisé pour différentes recherches (Trachte et Massart, 2011; Georges *et al.*, 2012). Sa surface chauffée est de 152 m^2 avec des ratios d'ouverture de 26 %, 15 %, 12 % et 8 % au Sud, Nord, Ouest et Est respectivement. La figure 13.6 montre que ce bâtiment est représentatif de l'échantillon de constructions résidentielles dont nous disposons grâce à l'action Construire avec l'énergie.

$$UF_{solar} = \frac{HD_{nosun} - HD_{sun}}{SG_{HP}} \tag{13.6}$$

$$UF_{int} = \frac{HD_{noint} - HD_{int}}{IG_{HP}} \tag{13.7}$$

$$UF_{gain} = \frac{HD_{nogain} - HD_{gain}}{SG_{HP} + IG_{HP}} \tag{13.8}$$

Les gains internes considérés sont décrits dans la figure 13.7. La valeur de pointe est 7.42 W/m^2 en moyenne spatiale. La moyenne globale dans le temps et l'espace est 2.63 W/m^2. Les gains sont plus élevés la nuit que la journée du fait de la présence des occupants, avec des pointes lors des pics d'activités du matin et du soir. Dans tous les cas, la consigne de chauffage est de 20°C entre 6h00 et 9h00 et entre 16h00 et 22h00 les jours de semaine et entre 8h00 et 22h00 les week-ends.

La figure 13.8 montre que les gains solaires dans le bâtiment décroissent plus rapidement que les gains internes lorsque la période de chauffe est raccourcie. Ils représentaient 260 % des gains internes pour un besoin de chaleur de 60 kWh/(m^{2}an) mais ne valent plus que 138 % des gains internes pour un besoin de chaleur de 20 kWh/(m^{2}an). La longueur de la période de chauffe indiquée est évaluée sur base de la simulation dynamique comme étant le nombre de jours où la demande de chaleur est supérieure à 0.02 kWh/(m^{2}jour).

La figure 13.9 compare le facteur d'utilisation $\eta_{g,h}$ calculé selon la norme ISO 13790 avec ceux déduits de la simulation dynamique. On voit une correspondance assez bonne pour les mois d'hiver entre ces deux valeurs lorsque la demande de chaleur est de 60 kWh/(m^{2}an), et une très grande stabilité du $\eta_{g,h}$ selon le niveau de besoin de chaleur. On observe par contre une réduction sensible du facteur UF_{solar} en fonction de la demande de chaleur, et donc une divergence entre le calcul statique et l'analyse dynamique pour les basses demandes de chaleur.

La figure 13.10 détaille la variation de l'erreur relative entre UF_{solar} et $\eta_{g,h}$ en fonction des deux paramètres déterminant $\eta_{g,h}$, à savoir γ_H et τ_H. Une corrélation est visible entre cette erreur et τ_H : au plus grande la constante de temps, au plus importante l'erreur relative. Une constante de temps élevée peut indiquer soit une inertie importante, soit de faibles déperditions thermiques ($H_{L,H}$ bas en W/K). L'inertie étant constante dans notre cas, c'est donc bien une corrélation entre l'erreur relative sur la valorisation des gains solaires et le niveau de déperditions thermiques qui est mis en évidence. La relation entre cette erreur relative et le ratio gains/pertes γ_H est beaucoup plus complexe. Ce

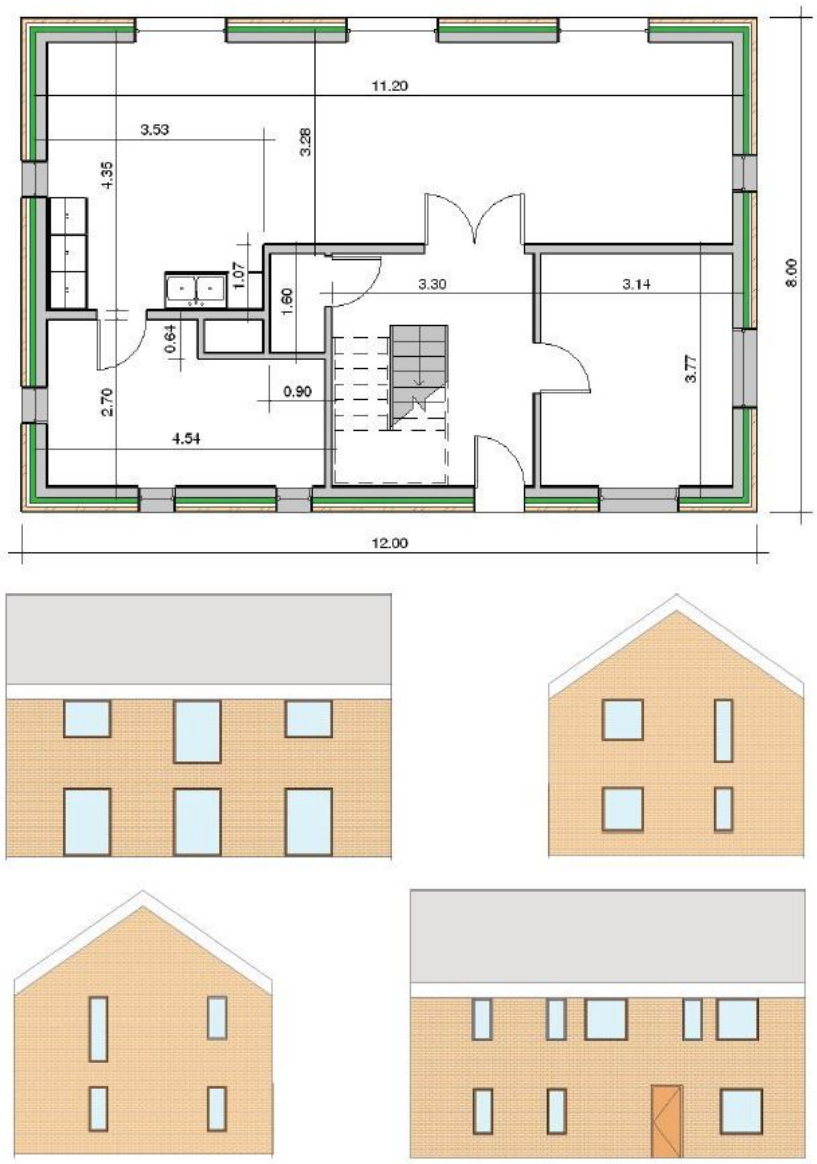


FIGURE 13.5 – Cas d'étude pour l'analyse des gains internes et solaires : plan du rez-de-chaussée et élévations

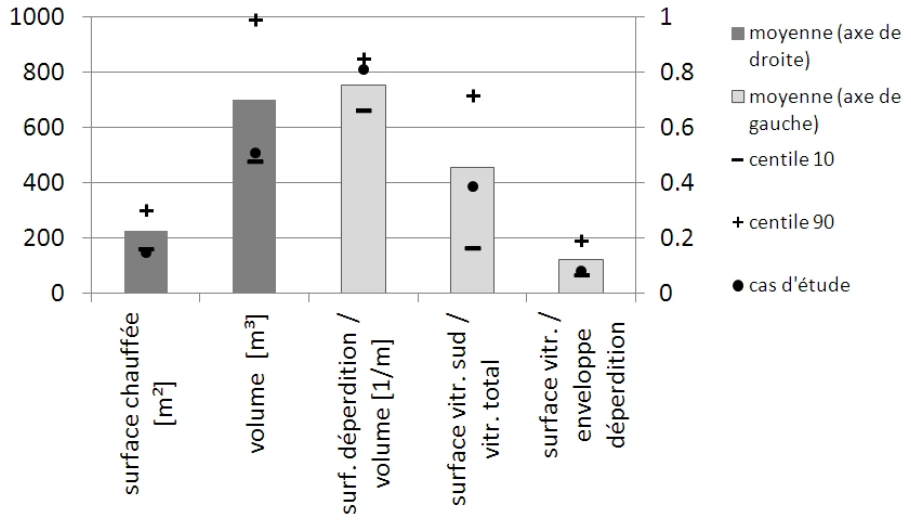


FIGURE 13.6 – Cas d'étude pour l'analyse des gains internes et solaires : comparaison à la base de donnée Construire avec l'énergie

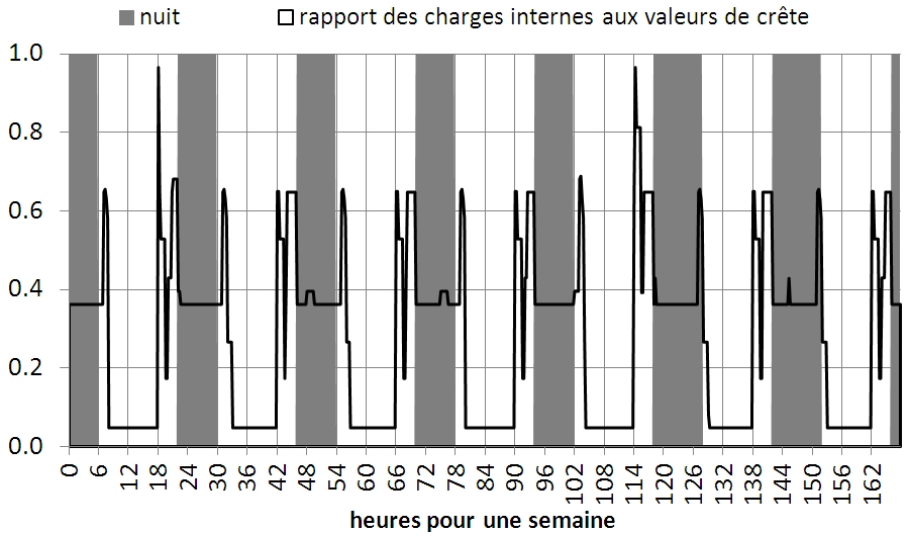


FIGURE 13.7 – Cas d'étude pour l'analyse des gains internes et solaires : moyenne spatiale des gains internes exprimés comme un ratio de la valeur de pointe 7.42W/m^2

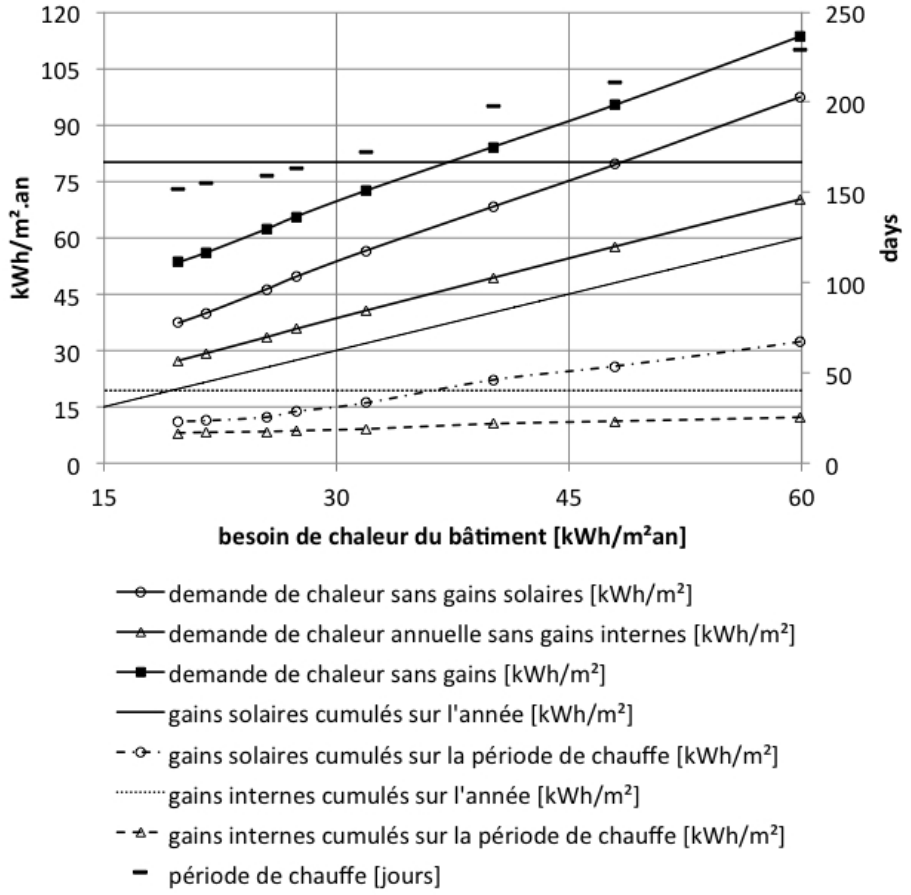


FIGURE 13.8 – Variations des gains solaires et internes en fonction du besoin de chaleur. Les valeurs sont exprimées relativement à la surface plancher net.

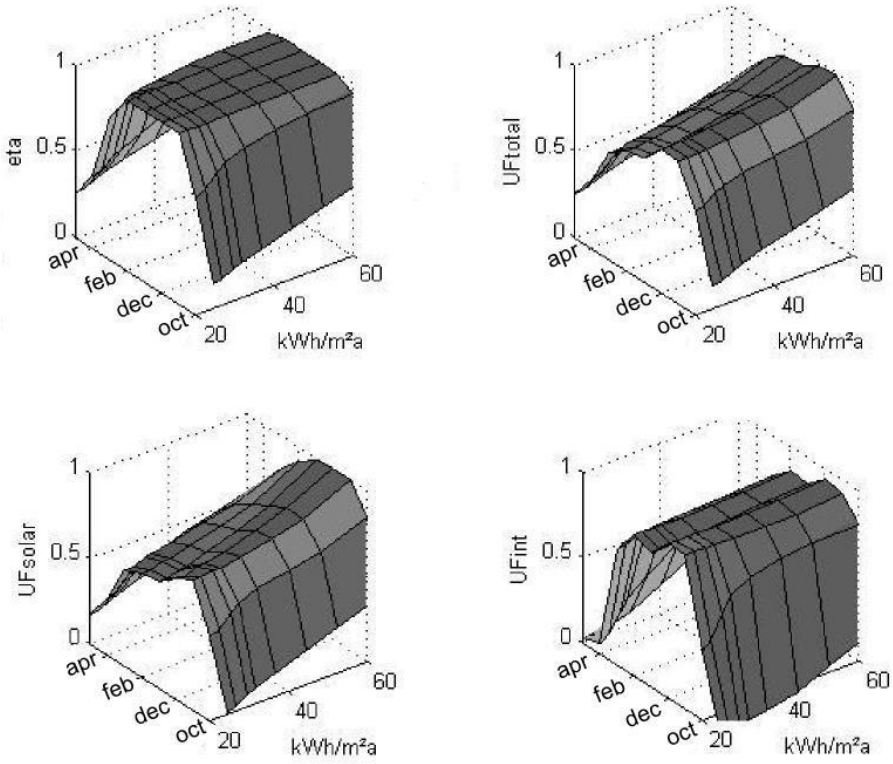


FIGURE 13.9 – Comparaison des valeurs mensuelles de valorisation des gains internes et solaires pour différents niveaux de demande de chaleur

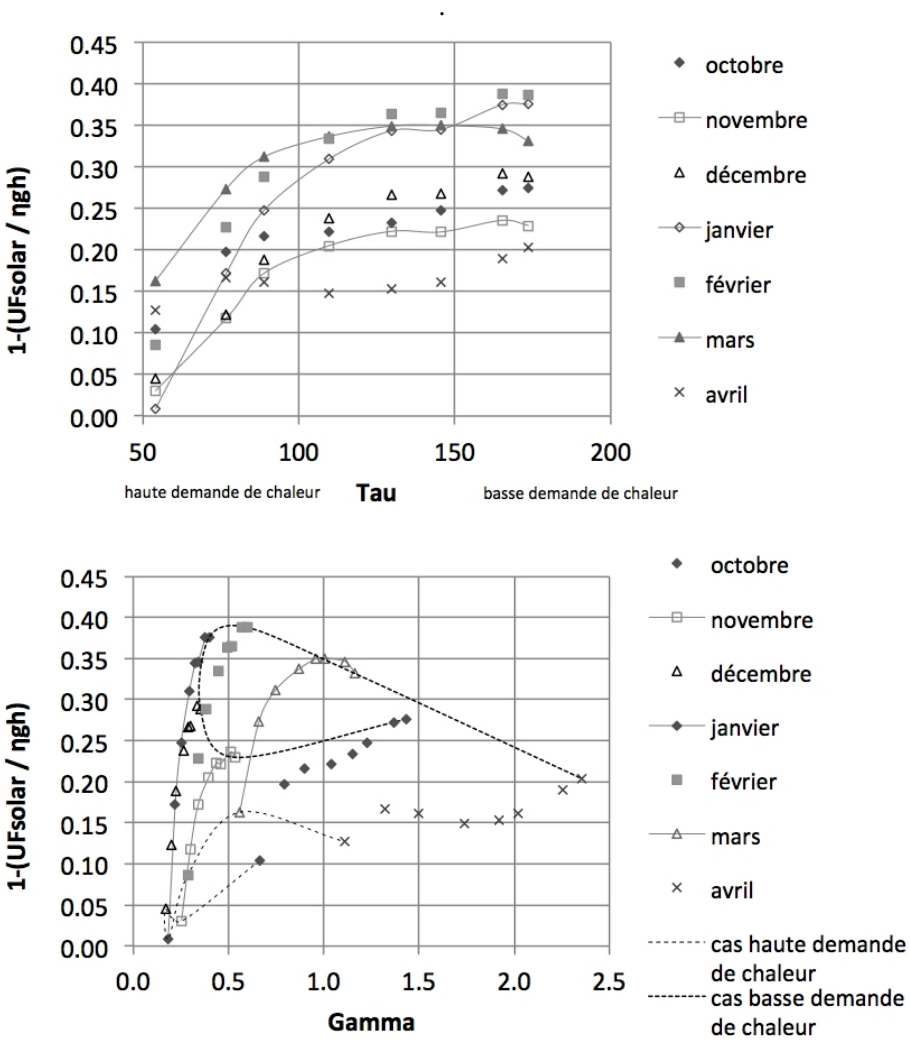


FIGURE 13.10 – Analyse de l'erreur relative entre valeurs mensuelles de valorisation des gains solaires selon leur mode d'évaluation. L'erreur est exprimées comme $1 - \frac{UF_{solar}}{\eta_{G,H}}$ et examinée en fonction de la constante de temps τ_H et du ratio gains/pertes γ_H.

paramètre seul ne permet pas d'expliquer la variation de l'erreur. Néanmoins, l'examen des valeurs par mois montre qu'une élévation du ratio gain/perte est lié à une erreur plus importante, ce qui est bien ce que nous constatons en examinant la relation de l'erreur à τ_H.

Cette étude démontre que les gains internes et solaires présentent une évolution différente dans le bilan énergétique d'un bâtiment lorsque les déperditions thermiques sont réduites significativement. Cette différence tient en une réduction de la part relative des gains solaires, qui devient proche de celle des gains internes. Cette évolution différente n'est pas décrite dans les modèles de calculs statiques, qui ne considèrent qu'un seul facteur d'utilisation pour les deux types de gain. Nous évaluons l'erreur faite sur la valorisation des gains entre 20 et 40 % pour la plus faible demande de chaleur considérée, alors qu'elle était inférieure à 15 % pour une demande de chaleur plus représentative des réglementations énergétiques actuelles. Cette erreur va dans le sens d'une survalorisation des gains solaires, et donc d'une sous-estimation de la demande de chaleur.

Nous avons donc bien pu mettre en évidence un risque d'imprécision des outils d'évaluation à notre disposition qui est directement lié à l'ambition de haute performance énergétique. Si l'impact de cette erreur sur les résultats globaux n'est pas évalué, cette analyse justifie notre propos sur la nécessité d'une analyse des risques liés à la question particulière de la performance énergétique des bâtiments.

13.1.5 Suite à l'analyse : évaluation, traitement et surveillance

Sur base de l'analyse des risques, l'évaluation vise à déterminer quels risques méritent un traitement et selon quelle priorité. Elle fait donc appel aux conclusions de l'analyse du risque et de l'établissement du contexte, notamment aux critères d'évaluation définis à ce stade. Une fois l'évaluation faite, les options de traitement de ces risques sont multiples, et peuvent être appliquées individuellement ou en combinaison. De façon théorique, elles peuvent inclure un refus du risque conduisant à l'abandon d'une option, la prise du risque afin de poursuivre une opportunité, l'élimination de la source du risque, une modification de sa vraisemblance ou de ses conséquences, un partage du risque avec d'autres parties ou un maintien du risque fondé sur un choix argumenté. La sélection de l'option de traitement se fait sur base de l'effort de mise en œuvre par rapport aux avantages obtenus, compte tenu du contexte (légal, réglementaire...). Notons que l'option de traitement peut elle-même présenter un risque et nécessite donc une surveillance spécifique.

A titre d'exemple, le risque identifié plus haut d'une imprécision dans l'évaluation statique des gains solaires dans les bâtiments basse énergie pourrait en phase d'évaluation être jugé important, car susceptible de mettre en cause l'achèvement réel de performances souhaitées dans un projet où une stratégie solaire passive est explicitement développée, mais mineur dans un projet qui pour diverses raisons cherche peu à valoriser le soleil (contexte urbain, orientation défavorable, etc.). Les options de traitement ouvertes sont l'élimination de la source de risque, par le choix d'un mode d'évaluation plus précis tel qu'une simulation dynamique, une modification de sa vraisemblance par la recherche de marges de sécurité vis à vis de l'objectif de performance annoncé, une modification de sa conséquence par le renforcement d'autres stratégies de performance énergétique, pour réduire l'impact des gains solaires dans ce projet, ou un maintien du risque argumenté par exemple par la connaissance d'incertitudes sur d'autres paramètres dont les impacts opposés compensent celui-ci.

Enfin, la surveillance doit être intégrée dans le processus de management du risque, et la responsabilité de cette surveillance doit être clairement établie. Ce processus doit s'appliquer à tous les aspects du management du risque afin d'assurer la performance des moyens mis en œuvre, d'améliorer en continu l'appréciation des risques, de tirer des leçons des évènements, de détecter des changements de contexte et d'identifier des risques émergents. Nous ne pouvons cependant pas aller plus loin ici dans une démarche d'analyse de risques, faute d'une identification plus détaillée de ceux-ci qui dépasse la question posée dans cette thèse.

13.1.6 Commissioning

La notion de *commissioning* a fait l'objet de deux tâches de l'agence internationale de l'énergie (tâches 40 et 47). Cette notion peut se définir comme l'ensemble des opérations de diagnostic, de validation et de correction d'un bâtiment, notamment au début de sa première occupation et/ou de ses transformations, destinées à l'amener à répondre adéquatement aux attentes en termes de confort, d'entretien, de maintenance et de performance environnementale, exprimées lors de sa programmation et adaptées à la réalité de l'occupation et de la gestion. Le *commissioning* doit être vu comme une procédure de définition et de contrôle de la qualité effective d'un bâtiment. La figure 13.11 décrit quatre différents types de *commissionings* (Legris *et al.*, 2010) :

– *commissioning* initial : commencé pendant le design et poursuivi durant la construction et l'occupation. Il aide à garantir que la performance de

la nouvelle construction ou rénovation lourde rencontre les attentes du propriétaire ;
- *retrocommissioning* : première mise en œuvre d'une procédure de *commissioning* dans un bâtiment existant en l'absence d'un processus antérieur documenté ;
- *recommissioning* : nouveau *commissioning* dans un bâtiment ayant déjà fait l'objet d'une telle démarche. Il vise la vérification, l'amélioration et la documentation de la performance des systèmes du bâtiment ;
- *ongoing commissioning* : processus de *commissioning* continu avec comme objectif de maintenir, améliorer et optimiser les performances des systèmes suite à un *commissioning* initial ou *recommissioning*.

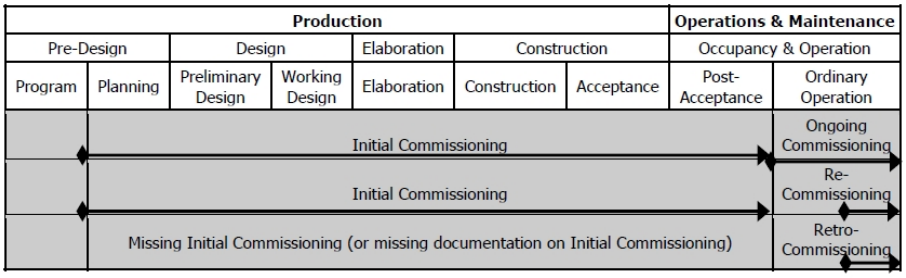


FIGURE 13.11 – Quatre types de *commissionings* selon (Legris *et al.*, 2010)

Bien que souvent ramenée à l'étape cruciale de réception et optimisation du bâtiment et de ses techniques lors du lancement d'un nouveau projet, le *commissioning* peut être vu comme une procédure de suivi de la qualité dans un sens beaucoup plus large, intégrant notamment la prise en main par l'habitant et la cohérence des choix techniques avec le comportement de celui-ci (cette liaison est déjà évoquée dans le chapitre 11.2). Suite à des discussions avec le professeur Jean Lebrun, de l'Université de Liège, qui fut impliqué dans les deux tâches de l'IEA mentionnées plus haut, nous proposons de schématiser un processus de *commissioning* de la façon présentée en figure 13.12. Les originalités de cette schématisation sont les suivantes :

- Le *commissioning* commence lors de la définition des performances attendues, durant la phase de programmation. Il ne s'agit pas uniquement de s'assurer que les dispositifs mis en œuvre remplissent bien leur office, mais également que le choix des dispositifs soit cohérent avec les attentes. Ces attentes sont influencées par les contextes (réglementaire, scientifique, technique, économique, etc.) et par ce que l'on sait du futur occupant du bâtiment, notamment sa capacité de gestion des dispositifs prévus dans le bâtiment.

– Toutes les phases de conception, exécution, réception et optimisation se font à la lumière des attentes définies lors de la programmation. A chacune de ces étapes, une analyse de la cohérence des dispositifs envisagés avec les attentes exprimées doit être réalisée.
– Le *commissioning* inclut nécessairement un suivi lors de l'usage du bâtiment, au-delà de la prise en main initiale, afin de s'assurer du maintien dans le temps du respect des attentes exprimées lors de la programmation. Pour mener à bien ce suivi, il est nécessaire de se doter d'outils techniques et méthodologiques de suivi des performances. Les outils techniques sont typiquement des outils de mesure (comptabilité énergétique) tandis que les outils méthodologiques visent plus l'information et la participation de l'occupant (guides de gestion, d'entretien et de maintenance vulgarisés).
– La définition des attentes performantielles inclut non seulement les performances *in-use*, mais également les performances en fin de vie des dispositifs (recyclabilité, démontage, réemploi, etc.). Il est donc nécessaire qu'une documentation spécifique soit produite lors de la réception des dispositifs et effectivement consultée, mise à jour et valorisée lors de la fin de vie de ceux-ci.

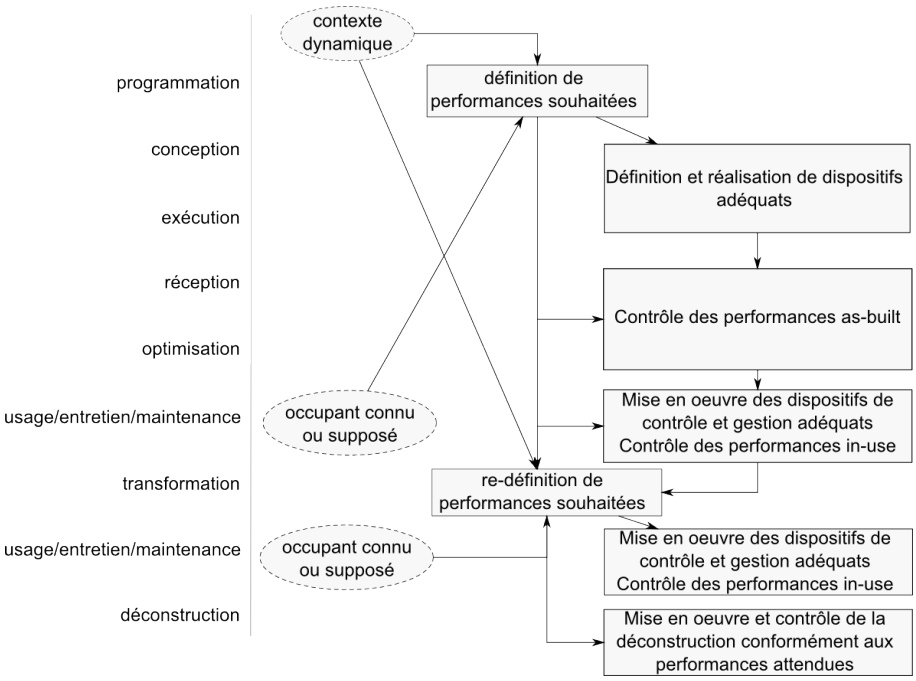


FIGURE 13.12 – Proposition de démarche de *commissioning*

Ce canevas de *commissioning* reprend plusieurs des notions présentées dans le cadre de l'analyse de risque. Notamment, l'analyse et la prise en compte d'un contexte et la définition précise des performances attendues, en tenant compte de ce que l'on sait du futur occupant correspondent à l'étape *établissement du contexte* d'une analyse de risque. Cette définition claire des attentes peut être utilisée comme référent pour juger à chaque étape de la pertinence d'une technique. Cette évaluation correspond aux phases *appréciation* et *traitement* d'une analyse de risque. Les aspects communication et surveillance du management de risque n'apparaissent pas telles qu'elles dans ce schéma. Elles impliquent la présence d'un acteur clairement identifié en charge de la mise en œuvre effective de cette démarche de *commissioning*. Le rôle de cet acteur est d'assurer le maintien de l'information à chaque phase du projet, mais également de conserver un regard critique sur le projet, alimenté par les différents contextes. Il est en effet important que cette démarche de qualité ne s'enferme pas dans un processus linéaire programmation-conception-réalisation. Une procédure de qualité doit avoir comme rôle d'identifier les besoins d'itérations au sein de ce processus pour en maintenir la pertinence dans des contextes dynamiques.

On voit donc une grande proximité entre la notion de *commissioning* telle que nous la présentons ici et les principes de management de risque. Il apparait donc utile de profiter de l'expertise développée par les secteurs des sciences humaines, notamment en management, pour fonder une procédure de qualité en architecture. Cette procédure de qualité peut se décliner à l'échelle d'un projet particulier. Elle peut alors se baser sur l'expertise existante développée autour du *commissioning*. Cette procédure peut également se décliner à l'échelle d'un bureau d'architecture, pour assurer la transmission de savoir entre projets. Plus proche d'une préoccupation de recherche, cette procédure devrait également exister à l'échelle du secteur de la construction au sens large. L'analyse critique du parc de bâtiments existants et des réalisations nouvelles devrait permettre d'alimenter la pratique architecturale, au même titre que le font aujourd'hui les analyses théoriques de physique du bâtiment par exemple. L'essentiel des publications d'architecture sont malheureusement déficientes lorsqu'il s'agit de prouver des qualités physiques telles que la performance énergétique réelle des projets. Un travail académique de définition de procédures d'analyse, déjà partiellement réalisé autour des notions de *post occupancy evaluation* et de *commissioning* nous semble donc nécessaire. Il doit être suivi d'une exploitation de données tant à l'échelle de projets individuels que de statistiques par marché et climat.

13.2 Intégrer les méthodes participatives

A de multiples reprises dans cette thèse nous mettons en évidence l'intérêt d'intégrer des aspects participatifs pour atteindre une grande qualité énergétique. En particulier, nous en avons pointé deux aspects au chapitre 11.2. D'une part la performance énergétique implique une cohérence entre les ambiances créées et celles attendues par les habitants. Elle doit donc être basée sur la meilleure compréhension possible de la notion de confort thermique, dont la dimension comportementale suggère une réflexion sur le rôle de l'occupant dans la conduite des dispositifs énergétiques actifs ou passifs. D'autre part la performance théorique intrinsèque d'un dispositif n'entraine pas de facto son acceptation ou celle de ses conséquences. Ceci risque de pénaliser fortement les performances réelles des dispositifs et des choix retenus. Un processus de conception incluant des phases d'explication des technologies est en mesure d'augmenter leur acceptabilité et leur bon usage. Mettre en place des méthodes participatives a en outre une valeur en soi en termes de lien social.

Une littérature théorique abondante et de nombreux exemples de projets participatifs existent. Le projet L'Espoir de l'Atelier d'architecture Carnoy-Crayon à Molenbeek nous semble une belle illustration de ce qu'une approche participative peut apporter (figures 13.13 et 13.14). Citons entre autres un accès à la propriété pour des personnes en situation précaire, le choix d'une très haute qualité énergétique et environnementale, mais aussi une plus value sociale au travers du processus de maîtrise d'ouvrage (outre une valorisation de la capacité d'initiative des habitants, certains ont pu développer une expertise et devenir des "ambassadeurs du passif". voir à ce sujet le blog http ://espoirmolenbeek.blogspot.be/) et un défi pour les entreprises (les constructions en ossature bois de quatre niveaux en ville sont exceptionnelles en Belgique) (Deprez et Cech, 2012). L'engouement et la conjonction d'initiatives autour de ce projet fait qu'il deivent difficile de faire la distinction entre un projet d'architecture et un projet de développement. Dans le même esprit, mentionnons l'approche développée en Afrique par Francis Kéré ou Karin Smuts, qui voient les projets d'architecture comme autant de projets de développement endogènes, basés sur les savoir-faire locaux, et celle de Patrick Bouchain qui cherche à résister à la définition stéréotypée de programmes "qui briment les usagers au lieu de les servir" (Contal et Revedin, 2011).

L'objet de cette section n'est pas de détailler des expériences de participation mais d'approcher l'idée de participation au travers du principe de responsabilité partagée mais différenciée. Selon ce principe, tous les intervenants d'une problématique sont coresponsables, mais dans des proportions variables. Nous chercherons donc à identifier quelles sont les responsabilités respectives

FIGURE 13.13 – Logements L'Espoir, Molenbeek, Atelier d'architecture Carnoy-Crayon, 2010. Plans ©Atelier d'architecture Carnoy-Crayon

FIGURE 13.14 – Logements L'Espoir, Molenbeek, Atelier d'architecture Carnoy-Crayon, 2010. Habitants posant devant la plaque reconnaissant le projet comme *Bâtiment Exemplaire 2008* et vue de la façade avant. Photos : ©Damien Carnoy

des différents acteurs de la qualité énergétique d'un bâtiment, avant de réaliser un inventaire de méthodes de participation favorisant la prise en charge de ces responsabilités.

13.2.1 Distribution de responsabilité

L'exercice d'identification des responsabilités présenté ici fait apparaitre des responsabilités évidentes, que nous dirons *premières*, et des responsabilités indirectes, ou *secondaires* (Tableau 13.2). Des responsabilités primaires sont celles du maître d'ouvrage au stade de la programmation et celle de l'architecte dans le choix des dispositifs. Le terme secondaire ne doit pas être pris dans un sens de moindre importance. Contrairement à l'idée selon laquelle la concentration de chaque intervenant sur la qualité d'exécution de sa propre tâche mène forcément à un résultat de qualité, nous postulons que c'est par le débordement de chaque intervenant au-delà de son rôle premier mais dans les limites de ses compétences, que peut se créer une valeur ajoutée supplémentaire. La figure 13.15 illustre l'enchainement des responsabilités des différents acteurs relativement à la performance énergétique.

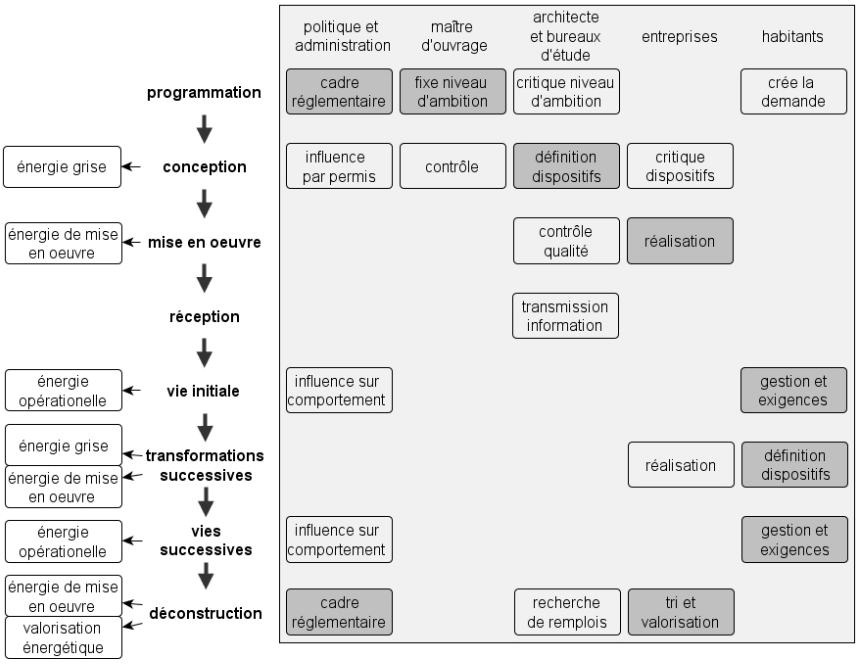


FIGURE 13.15 – Distribution des responsabilités relativement à l'enjeu énergétique aux différents stades de vie d'un bâtiment

TABLE 13.2 – Nature des responsabilités relativement à l'enjeu énergétique aux différents stades de vie d'un bâtiment

Intervenant	Stade	Nature	Détail
Politique	Programmation	Première	Définition d'un cadre ambitieux.
	Conception	Secondaire	De par les procédures de demandes de permis, l'administration dispose d'une influence, généralement sous la forme d'une capacité d'exclusion de dispositifs proposés.
	Usage/vies	Secondaire	De par l'influence sur les prix, orientation des consommations énergétiques.
	Déconstruction	Secondaire	Création d'un cadre propice à la valorisation des composants et matériaux.
Maître d'ouvrage	Programmation	Première	Définition d'un niveau d'ambition adéquat, et mobilisation des moyens nécessaires.
	Conception	Secondaire	Contrôle de la cohérence du projet avec les ambitions et moyens. Anticipation de l'appropriation possible par l'occupant.
Architecte	Programmation	Secondaire	Critique des ambitions du maître d'ouvrage sur base de son expertise.
	Conception	Première	Définition des dispositifs optimaux cohérents avec les ambitions exprimées.
	Mise en œuvre	Secondaire	Contrôle de la qualité d'exécution par les entreprises.
	commissioning	Secondaire	Transmission à l'occupant du know-how nécessaire à la conduite du bâtiment.
	Déconstruction	Secondaire	Responsabilité de recherche de remploi maximal d'éléments existants.
Bureau d'étude	Conception	Première	Définition des dispositifs optimaux au vu des ambitions, et remise en cause des éléments amonts.
	Mise en œuvre	Secondaire	Contrôle de la qualité d'exécution par les entreprises.
	commissioning	Secondaire	Transmission à l'occupant du know-how nécessaire et optimisation des systèmes.
Entreprise	Conception	Secondaire	Critique, sur base de leur expérience, des dispositifs envisagés.
	Mise en œuvre	Première	Réaliser au mieux les dispositifs en limitant les nuisances et impacts environnementaux sur chantier

Continue page suivante

TABLE 13.2 – *Suite de la page précédente*

Intervenant	Stade	Nature	Détail
	Transformations successives	Secondaire	Responsabilité secondaire, car simple exécutant commandité par l'habitant. Paradoxalement, elle est néanmoins capitale, car l'entreprise est ici le seul acteur professionnel à même de guider un choix énergétiquement responsable.
	Déconstruction	Première	Responsabilité première car l'entreprise est souvent seule aux commandes dans une opération de déconstruction, notamment pour ce qui relève du tri des matières et de leurs valorisations éventuelles, soit en réemploi, soit sous forme énergétique.
Habitant	Programmation	Secondaire	Au travers des lois de l'offre et de la demande, la population de manière générale dispose d'une influence sur la programmation des bâtiments
	Usage/vies	Première	Adaptation des exigences de confort et utilisation rationnelle de l'énergie
	Transformations	Première	Réflexion sur la pertinence de la transformation, sa programmation et les moyens mis en œuvre.

De cette mise à plat des responsabilités respectives, on constate que les responsabilités des différents acteurs sont multiples et se chevauchent. On peut tirer les trois enseignements suivants :

- A côté des responsabilités premières, on peut distinguer des responsabilités secondaires *en aval* (postérieures dans le temps) et *en amont* (antérieures dans le temps). Les premières relèvent du suivi des conséquences de ses propres choix, et les secondes de l'information auprès des autres acteurs. Cette différence nous semble fondamentale dans la mesure où les responsabilités en aval sont essentiellement une question d'initiative de l'acteur concerné, et ne nécessitent pas de cet acteur une compétence complémentaire à celle nécessaire pour réaliser sa tâche première (par exemple, le *commissioning* d'une installation technique peut se faire correctement uniquement sur base de l'expertise du bureau l'ayant conçue), tandis que la prise d'une responsabilité en amont implique une invitation de la part de l'acteur central lors de la phase en question, et une connaissance minimale de la part de chaque intervenant des domaines d'expertise de l'autre. La concrétisation de prises de responsabilité en aval semble donc plus aisée à réaliser que celle en amont.
- On constate une multiplication des impacts énergétiques si l'on observe les dernières phases de vie, parallèlement à une diminution du nombre

d'acteurs directement impliqués lors de ces phases. On est donc dans une situation de découplage entre la responsabilité et l'impact, entre la prise de décision et sa conséquence. L'habitant, qui est l'acteur principalement impliqué dans les phases cumulant le plus d'impact énergétique, est contraint par les choix faits en amont. Cette situation n'est évidemment pas propice à une minimisation des impacts énergétiques.
– Aucun intervenant n'apparait clairement comme étant responsable de la réception et du *commissioning* du bâtiment dans son ensemble. La pratique veut que chaque intervenant soit responsable de la qualité de son propre travail, mais aucune validation transversale de la performance globale n'est généralement prévue.

13.2.2 Méthodes de participation

L'organisation du projet doit permettre à chaque intervenant d'assumer au moment adéquat ses différentes responsabilités. La distinction de responsabilités premières et secondaires, amont et aval, suggère les méthodes suivantes :

– La mise en œuvre effective des responsabilités amont de chaque intervenant plaide pour une organisation de travail adaptée. A l'opposé d'un processus linéaire d'interventions successives, il semble pertinent que chaque intervenant X ait pu influencer chacune des phases qui aura un impact sur celles où sa responsabilité première sera engagée. Ceci peut se faire par association de l'intervenant X à l'acteur principal Y de la phase où une influence est utile, ou par une anticipation par l'acteur Y des besoins de l'intervenant X. La première piste relève des démarches de conception intégrées. La seconde, plus délicate mais seule possible lorsque l'acteur futur n'est pas identifié précisément, relève essentiellement de la notion de flexibilité. Cet aspect de séquence temporelle peut être lu sur la figure 13.15 qui identifie pour chaque acteur l'enchaînement des phases qui le concerne, ses responsabilités et les conséquences énergétiques possibles.
– La mise en œuvre des responsabilités aval nous apparaît essentiellement dépendante du sentiment de responsabilité des divers intervenants par rapport aux conséquences de leurs décisions. Ce sentiment de responsabilité est d'autant plus difficile à maintenir que le décalage temporel entre la prise de décision, son implémentation et le constat d'une performance sont éloignés. En outre peuvent survenir des ruptures de la chaine d'influences. Elles peuvent être le fait naturel d'une étape échappant à l'influence de l'acteur (par exemple, l'architecte n'a pas d'influence sur la volonté de rénovation d'un habitant, même s'il impacte

indirectement la façon dont une rénovation peut se faire), ou le fait d'un changement d'individu dans le même groupe d'acteur (l'entreprise de construction n'est pas nécessairement celle de démolition). Ces ruptures de chaines ne peuvent être comblées que par une transmission de documentation adéquate (d'où l'importance de la collecte et transmission des documents explicatifs et descriptifs adéquats à chaque phase d'intervention) et une intégration de flexibilité à même de permettre des variations raisonnées autour des décisions initiales. Des mesures contractuelles peuvent palier un éventuel défaut de responsabilisation.

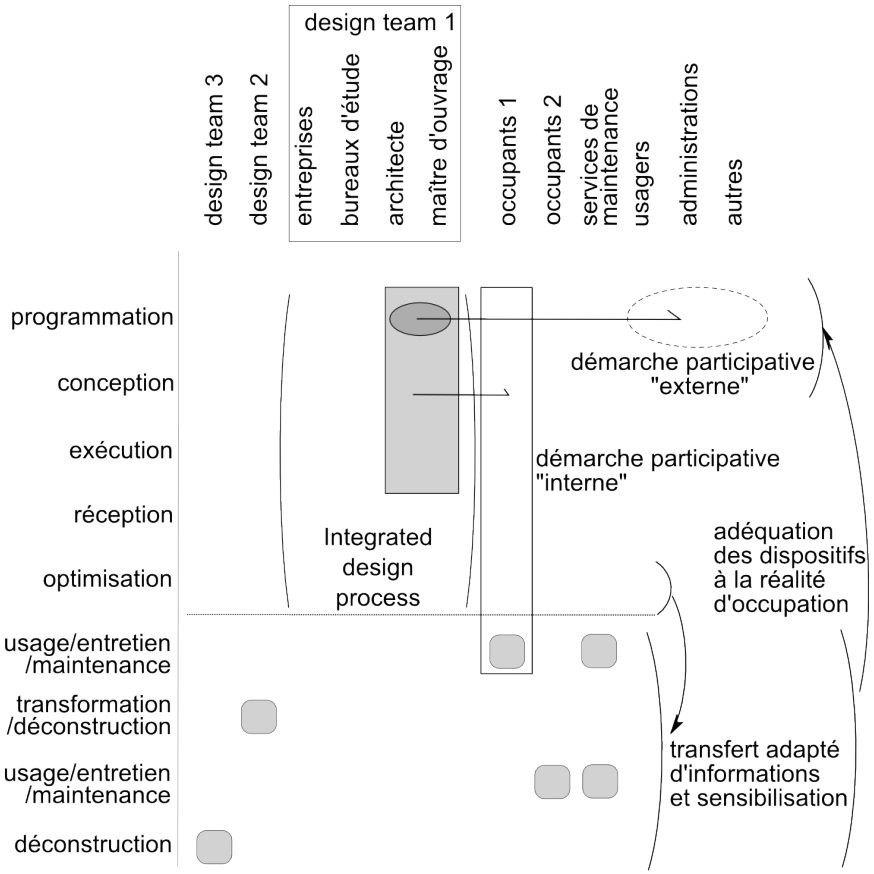


FIGURE 13.16 – Dispositifs de communication entre acteurs de la performance énergétique d'un bâtiment

Sur base des différents constats faits dans ce chapitre, nous proposons en figure 13.16 un inventaire de dispositifs organisationnels favorisant une participation des acteurs. Ces mesures diffèrent selon le type d'acteurs qu'ils concernent et leur rôle de transmission vers l'aval ou d'anticipation en amont :

- Les acteurs professionnels concernés lors d'une phase donnée peuvent être nombreux et de compétences diverses. Il est donc nécessaire de prévoir un mode de fonctionnement permettant la communication efficace entre tous ces acteurs, tel qu'un processus d'*integrated design* (à ce sujet lire notamment (Larsson, 2009))
- Certaines parties prenantes peuvent ne pas avoir été identifiées. Un processus participatif peut limiter le risque de l'oubli d'une partie. Nous parlerons alors de processus participatif *externe*, dans la mesure où il s'agit d'aller au-delà des acteurs dont l'implication est évidente, pour aller à la rencontre des voisins, usagers, groupes et associations locales, etc. Une telle démarche a principalement lieu en phase de programmation, pour valider ou adapter le programme du projet, mais pourrait être envisagée à d'autres phases également.
- Certaines parties prenantes peuvent, du fait de leur manque d'expertise technique, être plus ou moins volontairement exclues du processus de conception. C'est principalement le cas de l'occupant futur du projet, lorsqu'il est distinct du maître d'ouvrage ou qu'il délègue ce rôle à un promoteur professionnel. Un processus de conception participatif, que nous appellerons alors *interne* peut le réintégrer dans la conception, en l'instituant *expert habitant*.
- Un décalage temporel existe entre la prise de décision, sa traduction concrète et l'usage effectif du dispositif. Il est donc nécessaire de faire des choix de dispositifs qui soient en adéquation avec les capacités supposées des acteurs en aval non encore identifiés au moment du choix, de réaliser un transfert d'information adapté vers les acteurs avals pour qu'ils soient à même de comprendre le pourquoi des décisions qui ont été prises, et de leur donner les informations et les outils adéquats pour qu'ils prennent conscience de leur rôle dans la chaine de responsabilités face au risque identifié. Ce transfert d'information peut prendre différentes formes, allant de documents écrits formulés d'une façon adaptée, à la présence d'une personne relais à demeure ou présente ponctuellement. Pointons à ce sujet le projet de quarante-deux logements publics Savonnerie Heymans à Bruxelles du bureau MDW ARCHITECTURE : le concierge sert de relais entre la société de logement et les habitants, et peut guider ces derniers dans la prise en main de leur logement, en particulier de la loggia bioclimatique proposée par les architectes (voir figures 13.17 et 13.18).

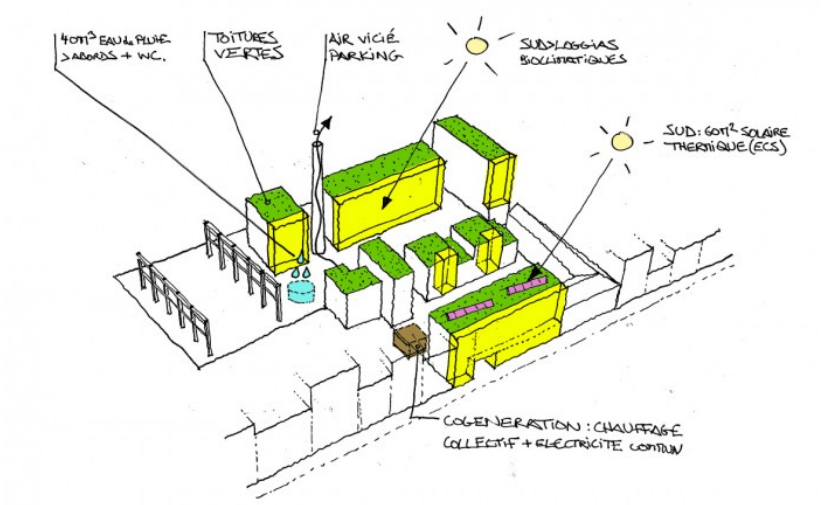


FIGURE 13.17 – Logements Savonnerie Heymans, Bruxelles, MDW Architectes, 2011. Cour intérieure et esquisse générale. Photo : ©Filip Dujardin. Croquis : ©MDW ARCHITECTURE

FIGURE 13.18 – Logements Savonnerie Heymans, Bruxelles, MDW Architectes, 2011. Vue intérieure de la loggia bioclimatique. Photo : ©Filip Dujardin

13.3 Redéfinir les indicateurs

La réduction des différents impacts liés à l'utilisation d'énergie nécessite une diminution effective des consommations et non uniquement une intention de réduction. L'évaluation objective des performances *a priori* en conception et à postériori lors de l'habitation joue donc un rôle fondamental dans une approche de qualité énergétique et nécessite la définition d'indicateurs adéquats. La volonté d'intégrer la complication des questions énergétiques et d'objectiver une performance réelle entraine un accroissement du nombre d'indicateurs ou une difficulté d'interprétation entre la réalité et un indicateur aux multiples facettes. Nous avons pointé au chapitre 7 le fait que cette volonté de rigueur peut nuire au pragmatisme et à la bonne intégration des concepts qu'ils sont sensés mesurer.

Il nous semble donc qu'il est pertinent de lancer une réflexion sur les indicateurs eux-mêmes. Nous allons donc proposer les bases d'une redéfinition des indicateurs de qualité énergétique puis illustrer ces bases en repartant de la question de définition des bâtiments zéro-énergie. Les principes de redéfinition d'indicateurs que nous proposons sont au nombre de trois.

Premièrement, un indicateur doit effectivement mesurer ce que l'on cherche à connaitre. Il convient donc de préciser quel est l'intention, la connaissance souhaitée avant de définir l'indicateur. Par exemple, cherche-t-on une valeur intrinsèque ou relative (quantification ou évaluation), une preuve ou une aide à la conception ? La nécessité de clarifier les intentions a déjà été mise en avant lorsque nous discutions du précepte de pertinence (chapitre 9). Le développement de cette thèse montre que cette intention ne doit pas être uniquement la performance au sens de la limitation des besoins et de la maximisation des rendements. Parmi les multiples dimensions de la question de l'énergie mise à jour dans cette thèse, retenons ici les éléments-clefs suivants :

- La performance énergétique doit se compléter d'une notion de qualité énergétique. La nature des ambiances, l'adéquation des formes d'énergie, la nature de la ressource sont à prendre en compte. En conséquence il peut être nécessaire de disposer de plusieurs indicateurs d'une même réalité pour en représenter les différents aspects.
- La qualité et la performance énergétiques sont la conséquence d'une multitude de décisions, soit directement liées aux aspects énergétiques, soit liés à d'autres dimensions de l'architecture mais avec un impact énergétique. En conséquence, la définition d'indicateurs spécifiques à chacune de ces décisions est nécessaire.
- L'agrégation des impacts de différentes décisions en une mesure globale

peut être intéressante pour certaines évaluations. Mais elle n'est pas toujours possible et, lorsqu'elle l'est, elle ne doit pas masquer les influences propres à chaque décision individuelle. Chacune de ces décisions peut en effet avoir des conséquences spécifiques non reprises dans l'indicateur global. En conséquence une mesure globale de performance ou de qualité devrait toujours être accompagnée des mesures des aspects individuels. Cette idée est fréquemment rencontrée dans les critiques du concept net-ZEB (chapitre 7).

Deuxièmement, ce que l'on cherche à mesurer peut différer selon les acteurs. La qualité énergétique est dépendante des hommes qui conçoivent, réalisent et habitent les bâtiments. Il est utile pour chacun d'eux de disposer d'outils leur permettant de mesurer la part d'influence liée à leur propre responsabilité. L'architecte a intérêt à connaître la qualité de son design, le constructeur celle de sa mise en œuvre, l'habitant celle de son comportement. Les indicateurs utiles ne seront donc pas les mêmes pour chaque intervenant. Ils diffèrent également pour chaque regard que posera un intervenant sur un aspect particulier. En particulier, nous avons notamment déjà mis en évidence la différence entre conception et évaluation quand il s'agit de la capacité de calcul des performances énergétiques (section 13.1.4). Ces deux regards des concepteurs sur leur projet nécessitent des outils et indicateurs spécifiques.

Troisièmement, une grandeur n'est utile que si l'on dispose d'une échelle pour l'interpréter. Si pour certaines grandeurs la physique montre clairement qu'il faut chercher une valeur maximale (la résistance thermique des parois par exemple), pour d'autres ce sont des valeurs de compromis que l'on cherchera entre des effets positifs et négatifs (le facteur solaire constant d'un vitrage par exemple) ou la capacité à présenter des variations face à des conditions dynamiques (une protection solaire par exemple). Il est dans les trois cas nécessaire de définir des valeurs seuils ou des objectifs absolus. En outre, il est parfois utile que les indicateurs permettent la comparaison à d'autres projets. Cette capacité de comparaison implique une forme de relativité dans la définition de l'indicateur. Le choix de l'élément auquel on ramène une grandeur doit se faire à l'aune de la finalité que l'on se donne. Prenons l'exemple d'un besoin de chaleur à comparer entre différents projets. Si l'on souhaite au travers de ce besoin évaluer la performance d'un mode constructif, une expression en kWh/m^2 ou kWh/m^3 est pertinente. Si l'on souhaite évaluer le performance d'un projet, une expression relative au programme de type kWh/occupant est plus utile.

Comme synthèse de ces trois principes, retenons qu'un indicateur doit refléter une vue orientée de la réalité, s'adresser à un acteur spécifique avec un but particulier, et proposer une échelle d'interprétation.

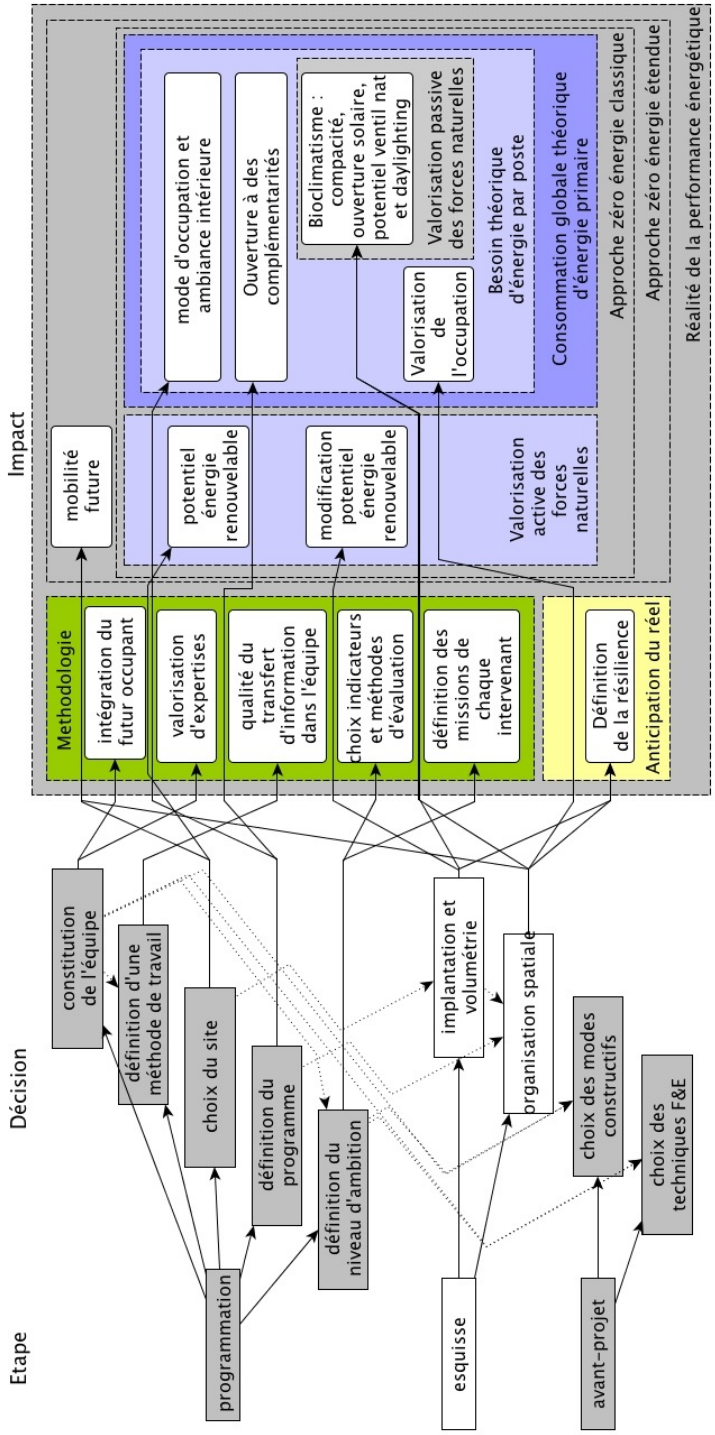


FIGURE 13.19 – Détail des décisions avec impact énergétique selon les étapes de conception : programmation et esquisse

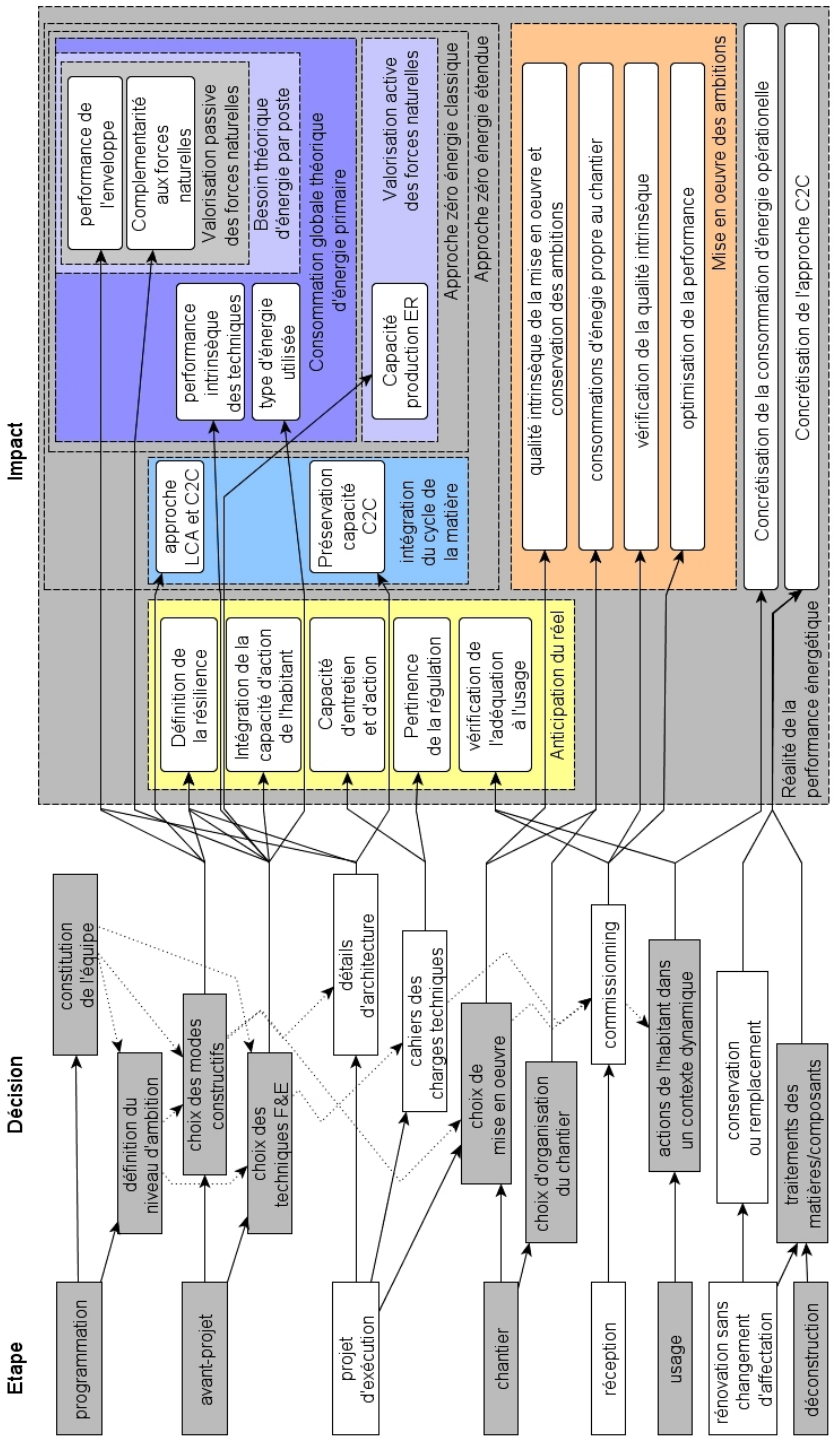


FIGURE 13.20 – Détail des décisions avec impact énergétique selon les étapes de conception : de l'avant-projet à la déconstruction

Pour illustrer ceci, nous revenons sur la définition des bâtiments zéro-énergie. Cette discussion a fait l'objet d'une communication lors du Passive House symposium 2012 (van Moeseke *et al.*, 2012a). Nous partons du principe que cette définition et les indicateurs associés doivent constituer une aide à la conception pour les architectes. Nous pointons au chapitre 7 que l'équilibre entre production et consommation d'énergie est un objectif peu pertinent à l'échelle d'un projet. Aussi proposons nous de remplacer la notion net zéro-énergie par celle de performance énergétique redéfinie de la définition suivante : la performance énergétique est (1) le résultat de la conception et de la réalisation d'un bâtiment permettant à la fois (2) de faire tendre vers zéro les besoins énergétiques liés à une occupation spécifique et (3) de maximiser la capacité de production d'énergie renouvelable du site (4) tout en usant de moyens dont l'impact énergétique propre également tend vers zéro. Cette définition est restrictive par rapport à l'ensemble des concepts développés dans cette thèse. Ce recentrage sur ces quelques concepts vise à limiter l'ampleur de l'exercice. Relevons que cette définition prend un contre-pied par rapport à la définition traditionnelle des net-ZEB non seulement par la remise en cause de l'équilibre entre consommation et production, mais aussi par l'idée de liaison entre consommation et mode d'occupation. Elle pousse cependant à centrer son évaluation sur les conditions de vie et non sur des performances énergétiques.

Conformément aux principes énoncés plus haut, nous décomposons cet objectif en ses multiples paramètres (figures 13.19 et 13.20). Ces paramètres sont rassemblés en huit groupes qui précèdent la concrétisation des impacts énergétiques réels lors de la vie du bâtiment. Il s'agit de :

- La valorisation passive des forces naturelles : les éléments traditionnels de l'architecture bioclimatique que sont l'orientation solaire, la ventilation naturelle, la limitation des déperditions, etc.
- Les besoins théoriques d'énergie par poste : ce groupe englobe le précédent mais y ajoute les aspects liés à l'occupation, à la définition des ambiances et aux gains internes. Cet ensemble permet d'établir des bilans thermiques théoriques
- Les consommations globales théoriques d'énergie primaire : ce groupe ajoute aux précédents le choix des techniques F&E et des formes d'énergie utilisées. C'est là l'ensemble des éléments traditionnellement repris dans un bilan énergétique primaire.
- La valorisation active des formes d'énergie : l'identification d'un potentiel de production d'énergie renouvelable et la capacité de valorisation de ce potentiel que l'on se donne. Avec le groupe précédent, ils forment la base de la définition usuelle des bâtiments zéro-énergie.

- Le cycle de la matière : les choix technologiques basés sur des analyses de cycle de vie et une approche *craddle to craddle* devraient impérativement être intégrés aux précédents dans une approche zéro-énergie étendue.
- La mise en œuvre des ambitions : ce groupe rassemble les impacts du chantier et de la réception et constituent le passage de l'ambition énergétique vers un bâtiment réel prêt à recevoir des habitants.
- Les éléments méthodologiques : intégration de l'occupant, des expertises de chaque partenaire, définition des indicateurs.
- Anticipation du réel : ce groupe rassemble des impacts allant de l'esquisse à l'usage. Il fait suite aux aspects méthodologiques et vise la correspondance entre le concept énergétique et la réalité de l'occupation future.

A priori, chacun de ces impacts doit recevoir un ou plusieurs indicateurs pour permettre son évaluation. Des indicateurs globaux par groupe peuvent en outre être proposés. Chaque indicateur doit être accompagné d'une échelle d'évaluation et d'objectifs idéaux et intermédiaires (par exemple correspondant aux meilleures pratiques actuelles). Dans la mesure du possible, ces indicateurs doivent être définis de façon relative aux particularités du projet. Par exemple, la compacité ne doit pas se mesurer comme V/A_t, mais relativement à la compacité maximale possible pour le volume devant être construit. Ceci revient à comparer l'enveloppe de déperdition à celle d'une sphère de même volume : $0<(4.84*V^{2/3})/A_t<1$.

Pour les mesures d'économie d'énergie, la littérature offre beaucoup d'indicateurs, tant pour la performance globale (par exemple la consommation d'énergie primaire par mètre carré) que pour les éléments intermédiaires (la résistance thermique d'une paroi, ou le rendement d'une chaudière). Nous nous concentrons donc sur le groupe suivant, à savoir la valorisation active des forces naturelles, en nous limitant aux aspects solaires. A chaque phase de conception, nous proposons un indicateur répondant aux principes décrit plus haut. Cette décomposition en phases répond à l'idée qu'un projet peut être soumis à différents types d'évaluation selon son niveau d'avancement, à savoir un diagnostic, un audit ou un bilan (Boutinet, 2011). Ces indicateurs et leurs justifications sont présentés dans le tableau 13.3.

La décomposition proposée en phases de conception et leur association à des indicateurs de qualité spécifiques permet de disposer d'éléments de guidance pertinents aux différents états d'avancement du projet. Accompagnés de valeurs cibles non proposées ici, ces indicateurs peuvent constituer un guide plus sûr vers la performance énergétique que l'actuelle démarche net-ZEB de

TABLE 13.3 – Indicateurs de la valorisation active de l'énergie solaire

Phase et indicateur	Mesure, échelle et commentaires
Programmation : Potentiel solaire du site	$I_{parcelle}$ [kWh/a] = $I_{sun,global}$ * $S_{parcelle}$ Il s'agit de l'irradiation totale annuelle sur parcelle, compte tenu des ombres portées par des éléments présents sur des parcelles voisines
Esquisse : Potentiel solaire du bâtiment	I_{bat} [kWh/a] = (Σ_{wall} $I_{sun,wall}$ * S_{wall}) - $Ombre_{portee}$ 0 < ... < 1. A maximiser. Il s'agit de l'irradiation annuelle sur différentes parois du volume bâti, déduction faite de l'ombre portée sur des parcelles voisines qui limitent le potentiel d'autres projets.
Avant-projet : Energie solaire théoriquement valorisée	$I_{valo,theo}$ / I_{bat} 0 < ... < 1. A maximiser. Il s'agit de la production théorique d'énergie solaire thermique ou photovoltaïque, en fonction des surfaces productrices intégrées au projet et des choix de technologie.
Avant-projet : Exergie solaire théoriquement valorisée	$I_{ex,valo,theo}$ / $I_{ex,bat}$ 0 < ... < 1. A maximiser. Notion identique à la précédente, mais mesurée en exergie
Commissioning : Energie solaire réellement valorisée	$I_{valo,reel}$ / $I_{valo,theo}$ 0 < ... < 1. A maximiser. Mesure effective de la performance de l'installation par rapport à sa performance théorique lors de la conception

vérification tardive (stade de l'avant-projet) de l'équilibre entre production et consommation. Il n'en reste pas moins vrai qu'une évaluation synthétique, telle que la confrontation au niveau de consommation d'énergie, reste pertinente dans un rôle de validation globale de la qualité et de facilité de communication. Rappelons enfin que la performance énergétique n'est bien évidemment pas le seul critère de qualité d'un projet d'architecture, et que ce processus d'évaluation à différents stades d'avancement devrait être réalisé pour les différentes facettes de la qualité architecturale.

13.4 Conclusion - éléments d'une approche soutenable

Ce chapitre regroupe des réflexions sur les aspects méthodologiques de la conception, autour de trois thèmes : l'application des principes de l'analyse de risque, une réflexion sur les différentes formes de participation et une discussion sur les indicateurs de la qualité énergétique.

Le processus d'analyse de risque a permis de mettre en évidence l'importance des questions de communication et d'organisation du travail, justifiant l'intégration d'aspects méthodologique dans une réflexion sur les questions énergétiques. Quatorze risques spécifiques liés à la performance énergétique ont été identifiés. il s'agit d'autant de points portés à l'attention des concepteurs. Ceux liés à l'imprécision des outils et des résultats sont étudiés plus en détails. L'incapacité à anticiper une consommation réelle est mise en avant et liée non pas tant à la complication du système technique et thermodynamique que constitue le bâtiment qu'à la complexité des aspects humains et des contextes de cette performance. Nous différentions différents types d'évaluation selon leur finalité et proposons des lignes directrices pour l'anticipation de ces performances dans le cadre d'un processus de conception. Nous démontrons également que l'imprécision des méthodes d'évaluations statiques des besoins d'énergie croit avec l'ambition énergétique. Les éléments avancés lient cette imprécision à une moins bonne représentation du comportement de ces bâtiments face aux gains solaires. Enfin, nous proposons un élargissement de la notion de *commissioning* à celle de procédure de qualité et appelons la pratique et la recherche à plus et mieux explorer la qualité énergétique réelle des bâtiments et à mettre en place les outils adéquats pour ce faire. A son échelle, cette thèse participe à cet effort.

Les aspects participatifs sont abordés sous l'angle du partage de responsabilité. Un inventaire des principales responsabilités de chaque acteur au regard de la performance énergétique est réalisé. Nous regroupons celles-ci en

responsabilités premières, amont et aval, et pointons la nécessité de dispositifs méthodologiques de participation propres à chacune. Nous pointons également le découplage temporel entre prise de responsabilité et impact réel des choix réalisés et l'absence de responsabilité clairement identifiée relativement à la performance réelle globale. Des principes méthodologiques sont proposés pour répondre à ces différentes difficultés. Il ne s'agit pas de démarches de participation innovantes. Notre apport original tient en l'articulation de l'ensemble de ces dispositifs dans une approche globale du partage et de la gestion des responsabilités de chaque intervenant.

Notons également que la question du partage *quantitatif* au regard d'un objectif énergétique ou environnemental global n'est pas abordée dans ce chapitre. L'équipe de conception doit-elle se donner les moyens techniques de réaliser un objectif énoncé quel que soit le comportement de l'occupant ? Dans quelle mesure cet effort peut-il être délégué à l'occupant, par exemple au travers d'une recommandation de réduction du confort ? Si tous les intervenants peuvent être efficacement associés aux prises de décision au moment adéquat, on peut supposer qu'un partage convenant à chaque partie est identifiable. Mais cette situation relève de l'exception, pour ne pas dire de l'improbable si l'on considère l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment (comment associer l'entreprise de déconstruction lors de la conception ?). Une situation plus fréquente est que chaque intervenant ou groupe d'intervenant est seul juge *en son âme et conscience* de l'importance de l'effort qu'il doit fournir. De la sorte, on entre dans un schéma de succession de responsabilités différenciées, et non dans une responsabilité commune partagée. La distribution de responsabilité et une organisation adéquate du travail n'induisent pas nécessairement la qualité des performances finales. Une ambition partagée, ou à défaut une distribution consensuelle d'un niveau d'effort est nécessaire. L'association des acteurs par des processus participatifs doit donc se faire dans le respect des capacités et leviers de chacun, mais à la lumière d'un objectif ambitieux accepté par tous. Nous donnons au chapitre 11.6 un exemple de répartition d'efforts entre concepteurs et habitants, par la discussion des notions de confort et salubrité.

La question des indicateurs est abordée au départ de considérations générales sur la qualité d'un indicateur, à savoir sa capacité à représenter effectivement l'objet d'intérêt et à porter un jugement sur base d'une échelle de valeurs relatives. Ceci implique une définition claire de l'élément devant être mesuré, de la finalité de cette mesure, et du public auquel l'indicateur est destiné. Sur cette base, nous reprenons la notion de bâtiment zéro-énergie discutée au chapitre 7 et proposons une définition alternative dont nous identifions les différents ressorts. Parmi ceux-ci, nous proposons une base d'indicateurs pour ceux relevant de la valorisation active des ressources énergétiques.

Les éléments abordés dans ce chapitre traitent principalement de la communication entre acteurs. La performance énergétique d'un bâtiment est particulièrement sensible à des failles de communication, comme le montre l'analyse de risques réalisée. Nous considérons dès lors que ces outils de communications doivent être assimilés à des dispositifs d'économie d'énergie en leur nom propre, et trouver systématiquement une place dans le processus de conception lorsqu'une haute performance énergétique est visée.

Chapitre 14

Conclusion

14.1 Retour sur la question, la méthode et les résultats

Dans l'introduction de cette thèse, nous avons formulé l'objet de notre recherche par la question : *N'y a t-il pas lieu de rediscuter l'approche de l'énergie, à la lumière des avancées sur la question de la durabilité de l'architecture en général ?* Suivent deux ensembles de chapitres qui fixent le cadre général de notre travail (la définition que nous retenons de l'architecture soutenable, la mesure du caractère complexe de la question énergétique en architecture et la reconnaissance du niveau d'ambition nécessaire face à cette question) et l'état de l'art (aperçu historique de l'architecture écologique, puis une critique originale du standard *Passivhaus* et de l'approche net zéro-énergie). Sur cette base, nous avons pu répondre oui à cette question, en particulier si l'on souhaite faire de cet aspect un levier de transformation de l'architecture et par là de la société. Le chapitre 8.1 clôture cette analyse générale en posant une nouvelle question : *Comment réinterpréter les aspects énergétiques pour favoriser, par l'architecture, un développement soutenable ?* Il s'agit là, en définitive, de la véritable question de cette thèse.

La méthodologie proposée pour y répondre est la traduction de principes fondamentaux identifiés comme un socle de valeurs. Ces principes sont au nombre de cinq : il s'agit du principe d'intégration des composantes environnementale, sociale, économique, politique et culturelle du développement durable ; du principe d'équité inter et intragénérationnelle ; du principe de précaution et d'incertitude ; du principe de responsabilité commune mais différenciée et du principe de participation. Ils ont été proposés par le Bureau Fédéral du Plan (Commission interdépartementale du développement durable (CIDD), 2000), comme synthèse des 27 principes de la déclaration de Rio (United Nations Environment Programme, 1992). Il va de soit que les développements

proposés ne sont acceptables que dans la mesure où ces principes sont eux-mêmes partagés. En ce sens, cette thèse s'inscrit clairement dans une filiation par rapport à ces textes et à la pensée du développement durable.

Ces principes nous ont permis de structurer notre travail en cinq chapitres. Nous les reprenons rapidement ci-dessous pour mettre en évidence leurs conclusions et leurs apports originaux. Cette structure et la référence régulière à ces cinq principes ont constitué un cadre de pensée permettant non seulement de mettre en évidence les ressorts des approches actuelles de l'énergie, mais également de proposer des approches originales et de liaisons fructueuses entre différentes thématiques. Nous invitons les lecteurs praticiens à lire les pistes relevées dans cette thèse comme autant de principes généraux avec un impact formel potentiel à identifier par le travail de projet. Cette méthode nous a en outre permis de balayer très largement la question de l'énergie en architecture, allant de considérations thermodynamiques à des positions plus proches de la philosophie, en passant par les sciences de gestion. Il apparait donc que le choix méthodologique s'est révélé pertinent.

Le chapitre 9 *Travailler avec des concepts propres à la complexité* propose d'appliquer des outils propres à la pensée complexe à la question qui nous préoccupe. L'exemple de l'application des préceptes du nouveau discours de la méthode de Jean-Louis Le Moigne (Le Moigne, 1994) permet de dégager des propositions originales touchant à la finalité des démarches de performance énergétique et aux méthodes d'analyse (partir de l'existant, questionner le point de vue et l'échelle d'analyse). Il prouve par l'exemple que la physique du bâtiment n'est pas la seule façon de progresser dans la compréhension des questions énergétiques dans le bâtiment.

Le chapitre 10 *Synthétiser les sous-thématiques de l'énergie* constate une décomposition usuelle de la question énergétique en différentes oppositions : production et consommation, systèmes actifs et passifs, énergie grise et opérationnelle. Nous y proposons un travail de synthèse de ces sous-thématiques, résultant en un organigramme actualisé de la question de l'énergie dans le bâtiment (figure 10.4). Ce travail nous amène à rejeter la notion de système passif, à mettre en avant l'intérêt des analyses exergétiques et à discuter du bilan énergétique global des matériaux isolants. La réflexion sur la notion d'exergie nous amène à proposer un indicateur original de performance exergétique visant à favoriser les formes d'énergies locales et non-délocalisables. La discussion sur les matériaux isolants nous permet de mettre en avant le caractère sous-optimal d'une approche linéaire faisant se succéder choix des performances thermiques à atteindre puis choix du mode constructif. Nous montrons que l'identification d'optimums nécessite dans certains cas une réflexion simultanée sur ces

deux aspects. Nous mettons également en évidence l'importance de paramètres tels que la durée de vie des composants. Globalement, cette analyse nous permet d'affirmer que la performance énergétique d'une paroi est une question constructive avant d'être une question de thermique du bâtiment.

Le chapitre 11 *L'énergie parmi les autres dimensions de l'architecture* propose une série de discussions sur le lien possible entre énergie et des éléments de cinq autres dimensions de l'architecture : culturelle, spatiale, sociale, économique et environnementale. Nous étudions en particulier les questions d'impact énergétique de la flexibilité spatiale et la faisabilité de maintenir des conditions d'ambiances salubres sans appoint de chauffage. Ce parcours nous permet d'énoncer quatre conclusions : (1) les aspects non-physiques des matériaux et modes constructifs doivent être considérés en priorité par rapport aux propriétés strictement physiques (résistance thermique, énergie grise, etc.), à moins de trouver une forme d'intégration dans les calculs d'analyse de cycle de vie ; (2) une démarche de conception donnant la priorité à la réflexion sur les questions de lumière est à privilégier ; (3) le maintien de conditions salubres sans utilisation active de techniques de chauffage est un objectif envisageable dans notre climat. Ceci mène à un partage de responsabilité entre le concepteur et l'occupant face aux consommations d'énergie, et suggère une approche originale des questions de précarité énergétique ; et (4) les choix liés à la flexibilité spatiale ont un impact énergétique, la réduction des consommations passant pour le cas étudié par la maîtrise de la flexibilité. Ce chapitre a également permis de mettre en évidence sept axes de réflexions dont trois sont étudiés ailleurs dans cette thèse et quatre sont proposés comme pistes de recherches ultérieures. Ces dernières sont : (1) l'intégration en conception du risque de précarité énergétique et des stratégies d'adaptations éventuelles qu'il suggère ; (2) une approche du patrimoine intégrant l'idée de cohérence entre le mode de vie et l'espace habité, ce qui nécessite des recherches plus poussées en histoire du confort et des conditions d'ambiances dans les bâtiments, ainsi que sur les possibilités d'adaptations comportementales ; (3) un glissement des réflexions énergétiques de l'échelle du bâtiment vers celles de lieux dans des contextes naturels et humains ; et (4) des études économiques, juridiques et sociologiques autour de stratégies visant à remettre en cause la nécessité d'investissements liés à la performance énergétique.

Dans le chapitre 12 *L'homme dans le monde par l'architecture* nous plaidons pour donner aux aspects énergétiques de l'architecture un rôle de renforcement du lien entre l'homme et son milieu. Pour reprendre les termes de Jean-Pierre Boutinet, il s'agit d'un appel à rendre les lieux *signifiants* par rapport aux enjeux énergétiques. C'est à dire à les *habiter* en tant qu'hommes conscients de cette dimension de notre relation au monde (Boutinet, 2011). Nous propo-

sons pour cela de travailler à rendre perceptibles les conditions physiques de l'habitat au travers de la notion d'identité climatique et de travailler à rendre conscients les comportements liés à l'énergie. Ces propositions nécessitent une remise en cause des modes de vie. Nous proposons d'aborder cette remise en cause par un élargissement de la notion de confort thermique à celle de confort de vie.

Le chapitre 13 *Adapter les méthodes de conception* présente l'application des principes de l'analyse de risque telle que définie dans les sciences de gestion, une réflexion sur les différentes formes de participation à la conception et une discussion sur les indicateurs utilisés pour mesurer la qualité énergétique. Il permet d'identifier le rôle central des aspects d'organisation et de communication dans la réalisation de performances énergétiques, de mettre en évidence la limitation de nos capacités d'évaluation, de structurer les différents processus de participation et de proposer des bases méthodologiques pour la définition d'indicateurs de performance. Plus concrètement, nous proposons un élargissement original de la notion de *commissioning* vers l'idée d'un processus de qualité et une approche alternative aux bâtiments zéro-énergie centrée sur la minimisation de la consommation et la maximisation d'un potentiel de production d'énergie, pour laquelle nous proposons des indicateurs spécifiques.

14.2 Pour des projets de qualité énergétique

14.2.1 Sur la notion de projet

En prenant du recul par rapport à ces conclusions, nous constatons qu'elles peuvent être synthétisées en quatre propositions majeures :

- La qualité énergétique peut se concevoir en fonction d'un projet de vie (voir chapitres 5 et 12 notamment). Il s'agit alors d'une construction humaine orientée vers une finalité et en résonance avec une compréhension particulière du monde. Elle devient le reflet d'un dessein (voir chapitre 4) ;
- La qualité énergétique doit se concevoir dans des contextes physiques et culturels, naturels et humains qui lui préexistent et l'influencent mais qu'elle peut influencer en retour (voir chapitres 10 et 11). Ce système complexe doit être reconnu et travaillé comme tel. En particulier, la qualité énergétique considère l'homme dans sa relation aux dispositifs, aux ambiances, au monde, aux modes de conception et de communication ;
- La qualité énergétique se conçoit donc avec des outils et méthodes adaptés (chapitre 13) ;

– La qualité énergétique s'évalue tant sur sa proposition théorique et ses intentions que dans sa matérialisation et sa réalisation des ambitions initiales. Elle est à la fois dessein et dessin (voir chapitres 5 - complexité naissant de la communication d'un projet -, 9 - précepte de globalisme - et 13 - méthodes intégrant le retour d'expériences).

Par opposition, nous affirmons que la *qualité énergétique*, et c'est la raison de l'utilisation de cette expression particulière, n'est pas une question limitée à ses aspects techniques et performanciels, sans remise en cause des modes de vie, n'est pas isolée des autres aspects de l'architecture, n'est pas irrémédiablement déterminée quand à ses théories et dispositifs, et n'est pas limitée à une anticipation et à des déclarations d'intention théoriques.

Il apparait par cet inventaire que nous proposons une approche de la qualité énergétique qui correspond à la notion de projet. Jean-Pierre Boutinet identifie trois traits caractéristiques des projets que nous retrouvons dans notre proposition (Boutinet, 2011) :

1. Exemplarité : le projet pense "un inédit idéalisé, un ailleurs souhaitable à réaliser". Jean-Pierre Boutinet décrit en effet la démarche de projet comme "un comportement orienté intentionnellement vers un but, c'est à dire une conduite". Nous pensons que l'exemplarité d'un projet de qualité énergétique peut venir d'une part de la réaction à une situation actuelle définissant un mieux que la qualité énergétique tend à faire advenir et d'autre part de l'association des projets de qualité énergétique à des projets de vie *a priori* toujours inédits.
2. Opérativité : le projet dépasse la conception et lui associe la réalisation. C'est attribuer au projet la fonction de "matérialiser une pensée, ce qui donne à l'auteur l'occasion de mieux savoir ce qu'il veut, et communiquer une pensée, ce qui permet à autrui de ne pas rester indifférent face à l'intention proposée". L'opérativité du projet de qualité énergétique nous semble évidente à la lumière de cette thèse. Nous proposons de dépasser l'approche actuelle centrée sur les moyens de réalisation et les performances pour y adjoindre une réflexion plus en profondeur sur les finalités et les méthodes en vue d'ouvrir le panel de solutions possibles. Les projets de qualité énergétique que nous proposons sont donc bien à la fois de l'ordre de la conception et de celui de la réalisation.
3. Pronominalisation - le projet est lié à "un acteur individuel ou collectif déterminé qui s'oriente et s'organise, un auteur". Nous avons discuté la logique d'acteurs à la lumière du principe de responsabilité partagée. Ce faisant, nous affirmions le caractère d'auteur collectif organisé des concepteurs, réalisateurs et habitants.

Par ailleurs, Jean-Pierre Boutinet identifie quatre préalables méthodologiques à la gestion de projet qui sont également présents dans notre proposition (Boutinet, 2011) :

1. Il n'y aurait de projet que "pour un acteur individuel ou collectif capable de se positionner en auteur, c'est à dire d'unifier au sein de son projet conception et réalisation", ce qui paraphrase les caractéristiques d'opérativité et de pronominalisation.

2. Le projet impliquerait que "la situation de référence soit appréhendée sur le mode de l'incertitude et de la complexité" car "une situation simple avec solution unique par déterminisme ne relève pas de la créativité du projet". Il dit par ailleurs que le projet "de par ses caractéristiques méthodologiques de distanciation, son exigence de globalité et sa nature floue, va représenter l'outil approprié pour représenter cette complexité [l'interaction d'une pluralité de paramètres tous aussi essentiels les uns que les autres], c'est à dire pour gérer de façon prioritaire non plus un seul mais une pluralité de paramètres à la fois". Or, la complexité des questions énergétiques et sa conséquence de non-déterminisme sont mises en évidence dans cette thèse.

3. L'élaboration du projet impliquerait que l'auteur "accepte de se livrer à une exploration ouverte d'opportunités au niveau de son environnement, laissant de côté tout recours à une sorte de fonctionnalisme porteur d'automatisme dans l'exploration des opportunités". Il nous semble que l'appel à un processus de conception basé sur l'échange entre acteurs, et en particulier avec l'habitant, constitue un cadre méthodologique propice à une exploration ouverte du contexte.

4. Le dernier préalable méthodologique est que "le contenu du projet résulte de la détermination d'une solution singulière, excluant le mimétisme intempestif, la logique répétitive, la structure bureaucratique qui génèrent un même type de solution pour tout un ensemble de situations-problèmes". A nouveau, c'est notre proposition de recentrer les méthodes sur des aspects participatifs plutôt que de modélisation physique qui répond à ce préalable. L'intégration d'acteurs ne détermine pas *a priori* la solution envisagée, au contraire des évaluations physiques dont le résultat est conditionné par la définition du modèle. La qualité énergétique impliquant cependant des aspects physiques évidents, nous mettons comme bémol à l'exploration des possibilités que celle-ci doit malgré tout intégrer une validation physique qui limitera nécessairement l'ensemble de solutions passant du stade de conception à celui de réalisation.

Utiliser le terme projet sur une question touchant à l'architecture n'est évidemment pas neutre. Si nous concluons qu'il peut exister des projets de qualité énergétique, précisons que nous ne cherchons pas à différencier ce dernier du projet d'architecture. Au contraire, c'est la place de la question énergétique et environnementale que nous souhaitons mettre en évidence au sein du projet d'architecture. Cette thèse démontre que les aspects énergétiques recèlent la possibilité d'être utilisés comme des éléments du projet d'architecture plutôt que comme des propriétés de la concrétisation de celui-ci. Cette place *dans* le projet d'architecture apparait suite à l'actualisation de la question énergétique à la lumière des principes de soutenabilité.

Précisons également que cette proposition intègre la question énergétique plus profondément dans le projet d'architecture que ne le faisaient l'application et la vulgarisation du bioclimatisme par exemple. Le bioclimatisme invite l'architecture à intégrer les forces naturelles et la capacité d'action de l'homme pour réaliser des ambiances confortables. Ce faisant, il limite la question de l'énergie à l'agencement des espaces et à la matérialisation de l'architecture. Dans notre proposition, la qualité énergétique devient explicitement un élément participant à la définition de la finalité du projet, à la compréhension de sa complexité et de ses méthodes, ainsi qu'un outil d'interprétation de ses multiples contextes, incluant mais dépassant le climat.

14.2.2 Méthodes et intentions

Si l'on veut intégrer l'enjeu de soutenabilité à l'approche de l'énergie dans le bâtiment, il y a donc lieu de considérer cette question au travers de l'idée de projet. Mais comment faire ? Jean-Pierre Boutinet situe l'invention du projet d'architecture à l'invention du *duomo de Sancta Maria de Fiore* de Florence par Brunelleschi (Boutinet, 2012). Au niveau méthodologique, il identifie dans ce projet les éléments fondateurs suivants que nous suggérons de reprendre par parallélisme entre projet d'architecture et projet de qualité énergétique :

- "Le projet architectural [ou projet de qualité énergétique] est une réponse à une commande sociale qui cherche son articulation à la fois en complémentarité et en opposition avec le programme du commanditaire". Le projet se base sur la remise en cause de son prétexte. Il le critique, le contextualise, l'enrichit. Un projet de qualité énergétique ne pourrait pas prendre pour acquis un niveau d'ambition énoncé préalablement. Il le remettra en question sur base de ce que l'on sait du monde et de son évolution.
- "Ce projet est inévitablement celui d'un acteur personnalisé, l'architecte

qui en tant qu'auteur se trouve confronté à une question, à un problème". Le projet de qualité énergétique devra être explicitement porté par un auteur, individuel ou collectif. L'architecte est *a priori* le mieux placé pour prendre ce rôle. Mais la complexité et technicité des questions posées implique la présence d'autres acteurs qu'il est possible d'inviter à devenir co-auteurs.

– "Ce problème est analysé en termes de complexité donc de pluralité des réponses possibles, compte tenu du site, des matériaux, des autres acteurs, notamment du commanditaire et des gens de métier". La reproduction est à exclure dans cette démarche, au bénéfice de la reconstruction de projets uniques.
– "Il est ensuite traité en atelier, séparément du chantier par modélisation et maquette". Le projet en phase de conception devra faire l'objet d'une validation ad hoc. Il s'agira en général d'évaluations physiques. Ces évaluations conservent leur importance mais doivent elle-même faire l'objet d'une critique. A différents moments dans cette thèse nous montrons les lacunes de ces évaluations qui reflètent un mode de pensée cloisonné incompatible avec le caractère partiellement complexe de la qualité énergétique. Elles présupposent l'existence de vérités intrinsèques, là où nous pensons qu'il n'y a que des vérités relatives à des points de vue limités. Nous devons donc chercher à substituer la complication des analyses de performance par la complexité de la recherche de pertinence de dispositifs dans le cadre de projets. La notion de pertinence nous semble intéressante car elle échappe à la comparaison pire/meilleur, pour se concentrer sur le *bien*. Elle est à l'opposé des compromis insatisfaisants entre dimensions antagonistes. La qualité est là quand l'énergie renforce les autres dimensions du projet.
– "Par-delà la solution technique, l'architecte maître d'œuvre est soucieux de redonner un sens à un espace qui en était dépourvu, c'est à dire à resémantiser". Le projet de qualité énergétique, si l'on poursuit notre parallélisme, passerait donc par l'identification d'un sens.Notre chapitre 12 *L'homme dans le monde par l'architecture* montre le cadre possible d'une telle resémentisation appliquée aux questions énergétiques.

En prolongement, nous souhaitons revenir sur la difficulté à décider face à un problème complexe. Dès lors que l'on croise l'énergie avec d'autres thèmes se pose la question de la prise de décision entre aspects interdépendants mais non comparables. Cet aspect est relevé au point 11.1.1 traitant des aspects matériels de la construction, mais touche également les dimensions culturelles ou sociales notamment. La multiplicité des thèmes, des enjeux et des exigences croisant la question énergétique est en outre démultipliée par les difficultés méthodologiques d'évaluation propre à chacun de ces thèmes. Ceci rend illusoire

la possibilité de comparer exhaustivement différentes architectures ou choix liés à l'énergie. Une recherche de solution optimale dans ce tiraillement d'exigences n'est plus adéquate. Il faut à la place, dans une approche holistique, chercher à identifier une proposition pertinente en fonction de l'attente liée au projet particulier. Ceci revient à modifier à chaque fois la grille d'évaluation que le concepteur se donne, pour l'adapter aux conditions particulières du projet, tout en gardant en tête quelques balises générales. Face à cette difficulté, il nous semble que la clarification des finalités est une étape nécessaire. La resémentisation proposée par Jean-Pierre Bethelot comme élément fondateur de la notion de projet nous apparait fondamentale. Faute d'ambition énoncée, il sera impossible d'établir une échelle de valeur et de faire des choix. Ceci rappelle le précepte de pertinence présenté au chapitre 9 selon lequel un objet d'étude doit s'analyser en fonction d'une visée (Le Moigne, 1994).

Se pose donc la question de l'identification de cette visée ou au minimum de balises à cette visée. Celles-ci peuvent être la traduction des enjeux pointés au chapitre 4 (décarbonisation, réponse à la précarité énergétique, choix de ressources abondantes, insistance sur la rénovation). Elle peut également être la volonté de concrétiser la redéfinition de la relation entre l'homme et son milieu, comme proposé à la fin du chapitre 2 brossant l'histoire de l'architecture écologique et développé au chapitre 12. Nous proposons également au chapitre 13.3 la combinaison d'une possibilité d'habitation avec une demande d'énergie minimale, une production renouvelable maximale et des moyens de mise en œuvre dont l'impact propre tend vers zéro. Enfin nous relevons dans les chapitres 10 et 11 l'importance des aspects constructifs (comment mettre en œuvre la matière), qui est au moins équivalente à celle des aspects physiques (propriétés de la matière).

14.3 Mot de fin... et de suite

L'avenir est incertain. Climatologues et économistes et autres s'échinent à en dessiner des contours probables. En tant qu'auteur de *projets*, l'architecte prend aujourd'hui position face à cet avenir et à la capacité de l'influencer. Au plus l'incertitude grandit, au plus le rôle du projet se renforce. "Tout se passe comme si les individus et les institutions étaient d'autant plus contraints d'inventer leur propre avenir qu'aucun système prévisionnel ne peut aujourd'hui leur dire de quoi demain sera fait" (Boutinet, 2012).

Quel que soit l'avenir, notre relation à l'énergie y sera modifiée. La foi en sa disponibilité qui a porté l'essor industriel du monde occidental pendant

quelques siècles se vérifiera de moins en moins. Nous nous dirigeons probablement vers une situation de rareté, à la fois du fait d'une carence réelle de certaines formes d'énergie et d'une sobriété que les sociétés s'imposent - espérons librement. Alors qu'une part croissante de la population sera dans l'incapacité économique de répondre à tous ses besoins en énergie, l'architecte doit se focaliser sur le mode d'habiter et la faisabilité d'aller vers des modes de vie zéro énergie, plutôt que sur l'efficience d'un mode de vie hérité d'une période d'abondance. Il doit dès aujourd'hui se placer dans une logique d'adaptation aux effets de la crise énergétique autant que dans son évitement.

Bien que persuadés que la forme de cette architecture ne sera ni celle du *Passivhaus* ni celle du bioclimatisme, nous avons volontairement évité de donner des *solutions* formelles dans cette thèse. Cela aurait été contraire à l'idée de donner aux questions énergétiques le statut de projet. Un travail d'inventaire des pistes explorées ou explorables par les architectes est à mener, travail qui bénéficiera du cadre posé ici. Il est probable que (ré)apparaîtront des idées de locaux tampons ou refuges, l'organisation de logements autours de foyers ou de formes de stockage d'énergie, que seront remis en cause les critères d'habitabilité minimaux, et le comportement des espaces face aux dynamiques de leurs contextes. En tous les cas, ce travail ne fera pas l'économie de partir de l'architecture telle que pratiquée et habitée aujourd'hui plus que de la physique du bâtiment. Notamment, il s'agira d'apprendre de ceux-qui sont d'ores et déjà en situation de précarité énergétique ou dans l'invention de modes de vie éco-responsables. La forme de cette architecture se construira également sur le prolongement de l'étude des multiples axes discutés dans cette thèse, dont plusieurs n'ont été ici que balisés.

Il reste donc à faire un gigantesque travail tant de recherche que de projet, et dans une certaine mesure de recherche par le projet. Cette conclusion ne nous surprend pas, puisque nous cherchions à renouveler une question, pas à la clore.

Bibliographie

ADAN, O., SCHOBER, G., KNIEST, F. et VORENKAMP, J. (1988). Changing the indoor humidity conditions, an allergological sanitation method for the indoor environment. *Revue Française d'Allergologie et d'Immunologie Clinique*, 28:147–151.

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE (2010). Task 40. Towards Net Zero Energy Solar Buildings. http ://www.iea-shc.org/task40.

ANDERSEN, I. et KORSGAARD, J. (1986). Asthma and the indoor environment : Assessment of the health implications of high indoor air humidity. *Environment International*, 12:121 – 127.

ARLIAN, L., NEAL, J., MORGAN, M., VYSZENSKI-MOHER, D., RAPP, C. et ALEXANDER, A. (2001). Reducing relative humidity is a practical way to control dust mites and their allergens in homes in temperate climates. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 107:99–104.

ARLIAN, L. G., NEAL, J. S., MORGAN, M. S. et VYSZENSKI-MOHER, D. L. (1999). Reducing relative humidity to control the house dust mite dermatophagoides farinae. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 104:852–856.

ASHRAE (2004). *Standard 55-2004 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (ANSI Approved)*. ASHRAE.

ASHRAE (2005). *ASHRAE Handbook : Fundamentals*.

ASSOCIATION NÉGAWATTS (2012). *Manifeste négaWatt - Réussir la transition énergétique*. Actes Sud/Colibris.

AUDENAERT, A., CLEYN, S. D. et VANKERCKHOVE, B. (2008). Economic analysis of passive houses and low-energy houses compared with standard houses. *Energy Policy*, 36:47–55.

AULICIEMS, A. et SZOKOLAY, S. (1986). Air conditioning in Australia : Human thermal factors. *Architectural Science Review*, 29:67 – 75.

BALLESTER, F., MICHELOZZI, P. et INIGUEZ, C. (2003). Weather, climate and public health. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 57:759 – 760.

BANHAM, R. (1984). *Architecture of the Well-Tempered Environment*. University Of Chicago Press ; 2 edition.

BERNOUILLI, D. (1967). *Specimen theoriae novae de mensura sortis*. Gregg press.

BERQUE, A. (2009). *Ecoumène, Introduction à l'étude des milieux humains*. Paris : Belin.

BERQUE, A. (2012). Valeurs humaines, cosmicité, aménagement. *In Conférence inaugurale du 3ème cycle européen en Architecture et Développement Durable 2012-2013*, Louvain-la-Neuve, Belgique.

BESANT, R., DUMONT, R. et SCHOENAU, G. (1979). The Saskatchewan conservation house : some preliminary performance results. *Energy and Buildings*, 2:163–174.

BLISS, R. (1955). Design and performance of the nations' only fully solar-heated house. *Air conditioning, Heating and Ventilating*, 52:92–97.

BLUYSSEN, P. M. (2010). Towards new methods and ways to create healthy and comfortable buildings. *Building and Environment*, 45:808 – 818.

BOARDMAN, B. (1991). *Fuel poverty : from cold homes to affordable warmth*. Belhaven Press London.

BOARDMAN, B. (2000). Introduction. *In* RUDGE, J. et NICOL, F., éditeurs : *Cutting the cost of cold : affordable warmth for healthier homes*, pages 3–13. E&F Spon.

BOUTINET, J.-P. (2011). *Psychologie des conduites à projet*. Presses Universitaires de France.

BOUTINET, J.-P. (2012). *Anthropologie du projet*. Presses Universitaires de France.

BPIE (2011). *Principles for nearly zero-energy buildings, Paving the way for effective implementation of policy requirements*. Building Performance Institute Europe, Brussels.

BRAGER, G. S. et DEAR (DE), R. J. (2002). Thermal adaptation in the built environment : a literature review. *Energy and Buildings*, 227:83–96.

BRANDT, W. (1980). *Nord-Sud : un programme de survie*. Gallimard.

BRAUNTGART, M. (2002). *Cradle to Cradle : Remaking the Way We Make Things*. North Point Press ; 1st edition.

BROCORENS, P. (2007). Pic du pétrole et pic du gaz. Rapport technique, Association for the Study of Peak Oil and Gaz.

BROCORENS, P. (2012). Réponse à l'interview de Pierre Terzian (Pétrostratégie), Matin Première, RTBf, 21.06.2012.

BRUGEL (2009). Rapport du gestionnaire de réseau de distribution sibelga sur l'exécution des missions de service public en matière d'électricité et de gaz pour l'année 2008. Rapport technique, Commission de régulation de l'énergie en Région de Bruxelles-Capitale.

BRUNDTLAND, G. H. (1987). *Our Commun Future, World Commission on Environment and Development*. World Commission on Environment and Development, WCED.

BUTTI, K. et PERLIN, J. (1980). *A Golden Thread, 2500 Years of Solar Architecture and Technology*. Van Nostrand Reinhold Company.

CECH, J., GILLY, N., HAVEAUX, C., HUART, M. et RIETY, G. (2010). DJ 15/15 : une année particulièrement chaude. *Renouvelle*, 42:11.

CEN (2002). EN 12464-1 : 2011. Light and lighting. Lighting of work places. Part 1 : Indoor work places.

CEN (2007a). EN 15193 : 2008. Energy Performance of Buildings - Energy requirements for lighting - Annex F.

CEN (2007b). EN 15316-1 : 2007. Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 1 : General.

CEN (2009). NBN CEN/TR 15615 - Explanation of the general relationship between various European standards and the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) - Umbrella Document. Rapport technique, Comité européen de normalisation.

CHAPMAN, J. et SCANNELL, B. (2000). The Affordable Warmth Index. *In* RUDGE, J. et NICOL, F., éditeurs : *Cutting the cost of cold : affordable warmth for healthier homes*, pages 107–121. E&F Spon.

CHIRAC, J. (2002). Notre maison brûle et nous regardons ailleurs. *In Assemblée plénière du Sommet mondial du développement durable*, Johannesburg (Afrique du sud).

COLE, R., BROWN, Z. et MCKAY, S. (2010). Building human agency : a timely manifesto. *Building Research & Information*, 38 (3):339–350.

COLEY, D. et KERSHAW, T. (2010). Changes in internal temperatures within the built environment as a response to a changing climate. *Building and Environment*, 45:89–93.

COLIN, Y., BALLAIN, R., ROBERT, C. et DOUTRELIGNE, P. (2013). L'état du mal-logement en France. 18e rapport annuel. Rapport technique, Fondation Abbé Pierre pour le logement des défavorisés.

COLLINS, K. (2000). Cold, cold housing and respiratory illnesses. *In* RUDGE, J. et NICOL, F., éditeurs : *Cutting the cost of cold : affordable warmth for healthier homes*, pages 36–47. E&F Spon.

COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE (2008). Engagements du grenelle environnement.

COMMISSION FRANÇAISE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE (2002). Avis 2002-07 sur la culture et le développement durable.

COMMISSION INTERDÉPARTEMENTALE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE (CIDD) (2000). Plan fédéral pour le développement durable 2000 - 2004. Rapport technique, Service Pubic Fédéral belge.

CONLON, K. C., RAJKOVICH, N. B., WHITE-NEWSOME, J. L., LARSEN, L. et O'NEILL, M. S. (2011). Preventing cold-related morbidity and mortality in a changing climate. *Maturitas*, 69 (3):197–202.

CONSEIL DES MÉTIERS D'ART (2009). Document relatif à l'application du code des marchés publics aux marchés de conservation-restauration de biens culturels. Rapport technique, Ministère de la Culture et de la Communication.

CONSEIL EUROPÉEN (2007). Conseil européen de bruxelles, 8-9 mars 2007, conclusions de la présidence - 7224/1/07 rev 1.

CONTAL, M.-H. et REVEDIN, J. (2009). *Architetures durables - Pour une nouvelle éthique de l'architecture et de la ville*. Le moniteur.

CONTAL, M.-H. et REVEDIN, J. (2011). *Sustainable design II - Vers une nouvelle éthique pour l'architecture et la ville*. Actes Sud.

CORMIER, C. (2013). Scénario de transition énergétique. Rapport technique, Greenpeace.

COÛTEAUX, M., LUYCKX, F., DINAER, L., BÖHLKE, A. et THIELEMANS, B. (2008). L'application des principes de la maison passive en région de bruxelles capitale. Rapport technique, Centre d'Etude, de Recherche et d'Action en Architecture asbl.

CWAPE (2010). L'exécution des obligations de service public à caractère social imposées aux fournisseurs et gestionnaires de réseaux - rapport annuel spécifique 2009. Rapport technique, Commission Wallonne pour l'énergie.

DARTEVELLE, O., DELTOUR, J. et BODART, M. (2011). Coupling thermal and daylighting dynamic simulations for an optimized solar screen control in passive office buildings. *In CISBAT 2011 - CleanTech for Sustainable Buildings - From Nano to Urban Scale*.

DAVIS, M., COONY, R., GOULD, S. et DALY, A. (2005). Guidelines for life cycle cost analysis. Rapport technique, Stanford University Life Cycle Cost Analysis Team.

DCLG (2006). Building A Greener Future : Towards Zero Carbon Development. Consultation documents, UK Department for Communities and Local Government.

DE HERDE, A., BODART, M., WOUTER, P., MARTIN, S., ans DIDIER L'HEUREUX, D. D., DEMOUSELLE, A., DEPRETER, A. et DE WIT, K. (1998). *Passive Low Energy Innovative Architectural Design - Conclusions*. Ministère de la Région Wallonne (DGTRE), Namur.

DEAR (DE), R. J. et BRAGER, G. S. (1998). Developing and adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Transactions*, 104:145–167.

DEAR (DE), R. J. et BRAGER, G. S. (2001). The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment. *International Journal of Biometeorology*, 45(2):100–108.

DEPREZ, B. et CECH, J. (2012). *Les bâtiments exemplaires se racontent... (à Bruxelles)*.

DEPREZ, B. et MORENO-VACCA, S. (2009). Mise au point de critères passifs pour les bâtiments tertiaires en Région de Bruxelles-Capitale. Rapport technique, pmp-php association momentanée.

DESCARTES, R. (1840 (Réed.1637)). *Le discours de la mèthode*. Paris : Hachette.

DETP (2006). English House Condition Survey 2004 - Annual report. Rapport technique, Department of the Environment, Transport and the Regions.

DIAZ, J., JORDAN, A. et GARCIA, R. (2002). Heat wave in madrid 1986-1997 : effects on the health of the elderly. *Int Arch Occup Environ Health*, 75:163–170.

DUIJM, F., HADY, M., GINKEL, J. et van BOLSCHER, G. (2007). Gezondheid en ventilatie in woningen in vathorst ; onderzoek naar de relatie tussen gezondheidsklachten, binnenmilieukwaliteit en woningkenmerken. Rapport technique, GGD Eemland & Ministerie van VROM.

DUMORTIER, C., MEYER, S., HECQ, W., DEMEYER, B. et BACCHUS, K. (2006). Etude comparative des politiques sociales en matière d'énergie. Rapport technique, CEESE-ULB et HIVA-KUL.

DURAND, D. (1979). *La systémique*. Presses Universitaires de France.

ECONOTEC (2009). Projet d'actualisation du plan pour la maîtrise durable de l'énergie (pmde) en wallonie à l'horizon 2020. Rapport technique, Service Public de Wallonie DGO4 - Département de l'Energie et du Bâtiment durable.

ELSWIJK, M. et KAAN, H. (2008). European embedding of passive houses. Rapport technique, ECN.

END-USE EFFICIENCY RESEARCH GROUP (2007). Site du Projet PassiveON (www.passive-on.org).

ERTESVAG, I. S. (2011). Uncertainties in heat-pump coefficient of performance (cop) and exergy efficiency based on standardized testing. *Energy and Buildings*, 43:1937–1946.

ESBENSEN, T. et KORSGAARD, V. (1977). Dimensioning of the Solar Heating System in the Zero Energy House in Denmark. *Solar Energy*, 19:195–199.

EUROPEAN CONCRETE PLATFORM ET ARCHITECTS COUNCIL OF EUROPE (2012). Common language for sustainable construction. www.sccommonlanguage.eu.

FANGER, P. (1970). *Thermal Comfort*. Danish Technical Press.

FAVRAT, D., MARECHAL, F. et EPELLY, O. (2008). The challenge of introducing an exergy indicator in a local law on energy. *Energy*, 33:130–136.

FEIST, W., BAFFIA, E., SCHNIEDERS, J., PFLUGER, R. et KAH, O. (2002). Passivhaus Projektierungs Paket 2002, Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser, 4. Auflage, Fachinformation PHI-2002/1. Rapport technique, Passivhaus Institut, Darmstadt.

FEIST, W., GERBER, A., KUHN, T. et SCHNIEDERS, J. (2001a). Protokollband Nr.15 - Passivhaus-Sommerfall.

FEIST, W., PEPER, S. et M.GÖRG (2001b). CEPHEUS-Projectinformation No. 36, Final Technical Report. Rapport technique, Passivhaus Institut, Darmstadt.

FEIST, W., SCHNIEDERS, J., DORER, V. et HAAS, A. (2005). Re-inventing air heating : Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept. *Energy and Buildings*, 37 (11):1186–1203.

FOUNTAIN, M., BRAGER, G. S. et DEAR (DE), R. J. (1996). Expectations of indoor climate control. *Energy and Buildings*, 24:179–182.

FRAMPTON, K. (2007). *Modern architecture - A critical history*. Thames & Hudson.

FRUERGAARD, T. et ASRUP, T. (2011). Optimal utilization of waste-to-energy in an lca perspective. *Waste Management*, 31:572–582.

G8 (2009). Responsible leadership for a sustainable future - g8 summit 2009.

GAGLIO, G., LAURIOL, J. et TERTRE (DU), C. (2011). *L'économie de la fonctionnalité, une voie nouvelle pour un développement durable ?* Octarès Editions.

GAUZIN-MÜLLER, D. (2005). *25 maisons écologiques*. Le Moniteur.

GAUZIN-MÜLLER, D. (2009). *L'architecture écologique du Vorarlberg*. Le Moniteur.

GAUZIN-MÜLLER, D., CONTAL, M.-H., MAGROU, R. et MÉNARD, J.-P. (2009). *Habiter écologique : Quelles architectures pour une ville durable ?* Actes Sud.

GEORGES, L., MASSART, C., VAN MOESEKE, G. et DE HERDE, A. (2012). Environmental and economic performance of heating systems for energy-efficient dwellings : Case of passive and low-energy single-family houses. *Energy Policy*, 40:452–464.

GEORGESCU-ROEGEN, N. (1976). *Energy and economic myths : institutional and analytical economic essays*. Pergamon Press.

GODIN, C. (2012). *La haine de la nature*. L'esprit libre.

GONCALVES, P., GASPARD, A. R. et da SILVA, M. G. (2012). Energy and exergy-based indicators for the energy performance assessment of a hotel building. *Energy and Buildings*, 52:181–188.

GOODWINN, J. (2000). Cold stress, circulatory illness and elderly. *In* RUDGE, J. et NICOL, F., éditeurs : *Cutting the cost of cold : affordable warmth for healthier homes*, pages 48–61. E&F Spon.

GORETZKY, P. (1989). The computer program "gosol", an instrument to increase passive solar energy use in urban planning. *In Proc. of 2nd European Conference on Architecture. Science and Technology at the Service of Architecture*.

GROUPE D'INTERVENTION ET DE RECHERCHE EN ORGANISATION DES SYSTÈMES (2010). Théorie module 1.

GRULOOS, P. (1996). *Les installations d'irrigation génératrices d'espace architectural*. Thèse de doctorat, Université catholique de Louvain, Faculté de sciences appliquées.

GUERRIAT, A. (2008). *Maisons passives*. l'Inédite.

GUERRIAT, A. (2010). Mission, vision et valeurs de la pmp - synthèse des 4 tables rondes. Rapport technique, Plateforme Maison Passife asbl.

HASTINGS, S. (2004). Breaking the heating barrier : Learning from the first houses without conventional heating. *Energy and Buildings*, 36:373–380.

HENZ, O. (2010). Retour d'expérience après 1 an d'occupation dans une renovation en maison passive qui produit ce qu'elle consomme. *In Passive House 10th symposium*, Brussels, Belgium.

HEPBASLI, A. (2012). Low exergy (lowex) heating and cooling systems for sustainable buildings and societies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16:73–104.

HERNANDEZ, P. et KENNY, P. (2010). From net energy to zero energy buildings : Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB). *Energy and Buildings*, 42:815–821.

HESCHONG, L. (1981). *Architecture et volupté thermique*. Parenthèses.

HILLS, J. (2011). Fuel poverty - The problem and its measurement. Rapport technique, Center for Analysis of Social Exclusion.

HÖÖK, M., SODERBERGH, B., JAKOBSSON, K. et ALEKLETT, K. (2009). The evolution of giant oil field production behaviour. *Natural Resources Research*, 18 :1:39–56.

HOWELL, L., HAYASHI, C., ZWAHLEN, C., GLEICHER, D., RAMSEGER, F., SOO, A., HRUBA, K., CAMPBELL, K. et WRIGHT, A. (2013). Global Risk 2013. Rapport technique, World Economic Forum.

HOWIESON, S. et LAWSON, A. (2000). Dust mite allergens, indoor humidity and asthma. *In* RUDGE, J. et NICOL, F., éditeurs : *Cutting the cost of cold : affordable warmth for healthier homes*, pages 62–77. E&F Spon.

HUMPHREYS, M. (1976). Field studies of thermal comfort compared and applied. *Journal of the Institute of Heating and Ventilating Engineers*, 44:5–27.

HUMPHREYS, M. (1978). Outdoor temperatures and comfort indoors. *Building Research and Practice (Journal of CIB)*, 6:92–105.

HUYBRECHS, F., MEYER, S. et VRANKEN, J. (2011). La précarité énergétique en Belgique - Rapport final. Rapport technique, Université Libre de Bruxelles et Universiteit Antwerpen.

IBN (1991). NBN D 50-001 : 1991. Dispositifs de ventilation dans les bâtiments d'habitation.

IBN (2001). NBN EN 13829 : 2001. Performance thermique des bâtiments - Détermination de la perméabilité à l'air des bâtiments - Méthode de pressurisation par ventilateur (ISO 9972 : 1996, modifiée).

IBN (2007a). NBN EN 13779 : 2007. Ventilation dans les bâtiments non résidentiels - Exigences de performances pour les systèmes de ventilation et de climatisation.

IBN (2007b). NBN EN 15251 : 2007. Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique.

IBO (2011). Guidelines to calculating the OI3 indicators Version 2.2. Rapport technique, Austrian Institute for Healthy and Ecological Building.

ICEDD (2004). La consommation électrique d'un ménage URE. Rapport technique, Institut Wallon.

ICEDD (2011). Bilan énergétique de la Région de Bruxelles-Capitale 2009. Rapport technique, Bruxelles Environnement.

ISO (1997). ISO 14040 : 2006. Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework.

ISO (2008). ISO 13790 : 2008. Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling.

ISO (2009a). ISO 31000 : 2009. Management du risque - Principes et lignes directrices.

ISO (2009b). ISO Guide 73. Management du risque - Vocabulaire.

ISO/IEC (2009). ISO/IEC31010 :2009. Gestion des risques - Techniques d'Èvaluation des risques.

ITARD, L., MAJCEN, D. et VISSCHER, H. (2012). Energy Labels in Dutch Dwellings - A comparison with the actual heating energy consumption. *In PLEA2012 - 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture*, Lima, Peru.

KAYA, Y. et YOKOBORI, K. (1997). *Environment, energy, and economy : Strategies for sustainability*. United Nations University Press.

KEATINGE, W. et DONALDSON, G. (2000). Cold weather, cold homes and weather mortality. *In* RUDGE, J. et NICOL, F., éditeurs : *Cutting the cost of cold : affordable warmth for healthier homes*, pages 17–24. E&F Spon.

KILKIS, S. (2012). A net-zero building application and its role in exergy-aware local energy strategies for sustainability. *Energy Conversion and Management*, 63:208–217.

KRAPMEIER, H. et DRÖSSLER, E. (2001). *CEPHEUS - living comfort without heating*. Springer-Verlag/Wien.

KURNITSKI, J., ALLARD, F., BRAHAM, D., GOEDERS, G., HEISELBERG, P., JAGEMAR, L., KOSONEN, R., LEBRUN, J., MAZZARELLA, L., RAILIO, J., SEPPANEN, O., SCHIDT, M. et VIRTA, M. (2011). How to define nearly net zero energy buildings nZEB - REHVA proposal for uniformed national implementation of EPBD recast. *REHVA Journal*.

LA CECLA, F. (2011). *Contre l'architecture*. Arléa.

LALLEMAND, A. (2007). Energie, exergie, économie, thermo-économie. *In Journées internationales de Thermique*.

LARSSON, N. (2009). The Integrated Design Process : History and Analysis. Rapport technique, International Initiative for a Sustainable Built Environment (iiSBE).

LE MOIGNE, J.-L. (1994). *La théorie du système général, Théorie de la modélisation*. Presses Universitaires de France.

LEBENS, R. (1980). *Passive solar heating design*. Halsted Press.

LEGRIS, C., FERRETTI, N. M. et CHOINIÈRE, D. (2010). Commissioning overview, a report of the cost-effective commissioning of existing and low energy buildings. Rapport technique, International energy Agency - Energy Conservation in Buildings and Community Systems (ECBCS) Program.

LIÉBART, A. et DE HERDE, A. (1996). *Guide de l'architecture bioclimatique - tome 2 : construire avec le climat*. Systèmes solaires.

LÉONIE BEIERSDORF (2007). Henry van de Velde - maître européen de l'Art nouveau. *In conférence internationale "Henry van de Velde - l'art sans frontiere"*, Trzebiechów. lu en ligne le 11 avril 2012 sur http ://www.henryvandevelde.pl/fr/html/konferencja2-3.php.

LOVELOCK, J. (2007). *The Vanishing Face of Gaia : A Final Warning*. Basic Books.

LYSEN, E. H. (1996). The trias energica : Solar energy strategies for developing countries. *In Eurosun Conference*, Freiburg.

MADEC, P. (2001). Esthétiques et qualité environnementale. Exposé aux 2 Jours du P.U.C.A.

MAHAUT, V. (2009). *L'eau et la ville, le temps de la réconciliation. Jardins d'orage et nouvelles rivières urbaines*. Thèse de doctorat, Université catholique de Louvain, Faculté de sciences appliquées.

MAHLIA, T., TAUFIQ, B., ONG, K. et SAIDUR, R. (2011). Exergy analysis for day lighting, electric lighting and space cooling systems for a room space in a tropical climate. *Energy and Buildings*, 43:1676–1684.

MARSZAL, A., BOURRELLE, P. H. J., MUSALLC, E., VOSSC, K., SARTORID, I. et NAPOLITANO, A. (2011). Zero Energy Building - A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*, 43 (4):971–979.

MARTINAITIS, V., BIEKSA, D. et MISEVICIUTE, V. (2010). Degree-days for the exergy analysis of buildings. *Energy and Buildings*, 42:1063–1069.

MAZRIA, E. (1979). *The Passive Solar Energy Book : A Complete Guide to Passive Solar Home, Greenhouse and Building Design*. Rodale Press.

MERCIER, E., VAUTREY, A. S. et RIVOALAN, E. (2011). Observatoire du bilan carbone des ménages. Rapport technique, Ipsos / Logica Business Consulting pour GREEN INSIDE. http ://www.ipsos.fr/sites/default/files/attachments/observatoire-bilan-carbone-menages.pdf.

MILLER, R., SORRELL, S. et SPEIRS, J. (2009). Rapport de l'UKERC sur l'épuisement des réserves mondiales de pétrole. Rapport technique, UK Energy Research Centre.

MINISTÈRE DE LA RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE (2007). Arreté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale déterminant des exigences en matière de performance énergétique et de climat intérieur des bâtiments.

MLECNIK, E., ATTIA, S. et LOON, S. V. (2011). Net zero energy building : A review of current definitions and definition development in Belgium. *In Passive house Symposium*.

MORIN, E. (1990). *Introduction à la pensée complexe*. Seuil.

MORIN, E. (2004). *Pour entrer dans le XXème siècle*. Seuil.

MORIN, E. (2007). *L'an I de l'ère écologique*. Tallandier, Paris.

MUNSTER, M. et LUND, H. (2009). Use of waste for heat, electricity and transport - Challenges when performing energy systems analysis. *Energy*, 34:6366–644.

MYTTENAERE (DE), K. (2006). *Vers une Architecture Soutenable*. Thèse de doctorat, Université catholique de Louvain, Faculté de sciences appliquées.

NAESS, A. (1973). The Shallow and the Deep Long Range Ecology Movement. *Inquiry*, 16 (1-4):95–100.

NICOL, F. et HUMPHREYS, M. (2005). Thermal comfort as part of a self-regulating system. *Building Research and Practice (Journal of CIB)*, 6: 1337–1343.

NORBERG-SCHULZ, C. (1981). *Genius Loci - Paysage, ambiance, architecture*. Pierre Mardaga.

OBYN, S. et van MOESEKE, G. (2012). Comparaison et discussion de systèmes de chauffe dans le cadre d'une rénovation vers le standard passif. *In Symposium PassiveHouse 2012*.

OEKO INSTITUTE (2009). Global emission model for integrated systems (GEMIS) version 4.5.

ORESZCZYN, T., RIDLEY, I., HONG, S. H. et WILKINSON, P. (2006). Mould and Winter Indoor Relative Humidity in Low Income Households in England. *Indoor and Built Environment*, 15:125–135.

PACHAURI, R. et REISINGER, A. (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Rapport technique, GIEC.

PAIGE, M. L., GRATIA, E. et DE HERDE, A. (1986). *Guide d'aide à la conception bioclimatique*. Service de Programmation de la Politique Scientifique.

PAILLARD, C. (2004). Thermochimie appliquée à la combustion. *In Ecole de Combustion*.

PALMER, G. (2012). The Poverty Site - The UK site for statistics on poverty and social exclusion (www.poverty.org.uk).

PARLEMENT EUROPÉEN (2002a). DIRECTIVE 2002/91/CE du Parlement européen et du conseil du 16 dćembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments.

PARLEMENT EUROPÉEN (2002b). Energy Performance of Buildings Directive, directive 2002/91/CE.

PARLEMENT EUROPÉEN (2007). Résolution du parlement européen du 4 février 2009 sur '2050 : l'avenir commence aujourd'hui recommandations pour une future politique intégrée de l'ue en matière de lutte contre le changement climatique' (2008/2105(ini)).

PARLEMENT EUROPÉEN (2008). Proposition de décision du parlement européen et du conseil relative à l'effort à fournir par les états membres pour réduire leurs émissions de gaz à effet de serre afin de respecter les engagements de la Communauté en matière de réduction de ces émissions jusquén 2020.

PARLEMENT EUROPÉEN (2009). Parliamentary proposal : All new buildings to be zero energy from 2019. `http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?language=EN&type=IM-PRESS&reference=20090422IPR54163`.

PARLEMENT EUROPÉEN ET CONSEIL EUROPÉEN (2010). The Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. *Official Journal of the European Union*, 53.

PASSIVHAUS INSTITUT (2004). PHPP 2004. Information PHI-2004/1. Rapport technique, Passivhaus Institut.

PAYLING WRIGHT, G. et PAYLING WRIGHT, H. (1945). Etiological factors in bronchopneumonia among infants in London. *Journal of hygiene*, 44:15–30.

PEARCE, F. (2006). Fuels gold : Big risks of the biofuel revolution. *New Scientist*, 2570:36–41.

PIERET, N. (2009). Le chauffage au bois : polluant, nocif ou pas ? *Silva Belgica*, 116-6.

PLEA2009 DELEGUATES (2009). Plea manifesto - architecture, energy and the occupant perspective.

PREK, M. et BUTALA, V. (2010). Principles of exergy analysis of human heat and mass exchange with the indoor environment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53:5806–5814.

RAMESH, T., PRAKASH, R. et SHUKLA, K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings : An overview. *Energy and Buildings*, 42:1592–1600.

RAPOPORT, A. (1972). *Pour une anthropologie de la maison*. Dunod.

REITER, S. et DE HERDE, A. (2004). *L'éclairage naturel des bâtiments*. Presses universitaires de Louvain.

RIBERON, J., VANDENTORREN, S. et BRETIN, P. (2006). Building and urban factors in heat related deaths during the 2003 heat wave in France. *In Proceedings of Healthy Buildings*, pages 323–326, Lisbon, Portugal.

RIEGL, A. (1984). *Le culte moderne des monuments. Son essence et sa genèse*. Seuil.

RIJAL, H., TUOHY, P., HUMPHREYS, M., NICOL, J., SAMUEL, A. et CLARKE, J. (2007). Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings. *Energy and Buildings*, 39:823 – 8363.

ROSEN, M. A., DINCER, I. et KANOGLU, M. (2008). Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact. *Energy Policy*, 36:128–137.

RUDGE, J. et GILCHRIST, R. (2007). Measuring the health impact of temperatures in dwellings : Investigating excess winter morbidity and cold homes in the London Borough of Newham. *Energy and Buildings*, 39:847–858.

RUDOFSKY, B. (1987). *Architecture Without Architects : A Short Introduction to Non-Pedigreed Architecture*. University of New Mexico Press.

SAIDUR, R., BOROUMANDJAZI, G., MEKHLIF, S. et JAMEEL, M. (2012). Exergy analysis of solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16:350–356.

SAKULPIPATSIN, P. (2008). *Exergy efficient building design*. Thèse de doctorat, Delft University of Technology / Faculty of Architecture.

SANTAMOURIS, M. (2007). *Advances in building energy research*. London : Earthscan.

SARTORI, I., NAPOLITANO, A., MARSZAL, A. J., PLESS, S., TORCELLINI, P. et VOSS, K. (2010). Criteria for definition of net zero energy buildings. *In Proceedings of EuroSun, Austria.*

SCHNIEDERS, J. et HERMELINK, A. (2006). CEPHEUS results : measurements and occupants' satisfaction provide evidence for Passive Houses being an option for sustainable building. *Energy Policy*, 34:151 – 171.

SCHUSTER, H., PERETTI, G. et THÜMMLER, T. (2012). Building Certification 2.0 - The German Sustainable Building Certification System in Practice. *In PLEA2012 Conference : Opportunities, Limits & Needs - Towards an environmentally responsible architecture*, Lima, Perou.

SEGERS, R. (2008). Three options to calculate the percentage renewable energy : an example for a EU policy debate. *Energy Policy*, 39 (9):3243–3248.

SIDLER, O. (2013). *Ecologik 32*, chapitre Rénovation énergétique, une urgence ! - propos recueillis par Dominique Gauzin-Müller. A Vivre Editions.

SOCIÉTÉ NATIONALE DU LOGEMENT (1984). Instructions PO/84 - instructions relatives à l'établissement des projets d'urbanisation de terrains et de construction de logements sociaux.

SPF-ECONOMIE (2009). Enquète sur le budget des ménages.

SPF-ECONOMIE (2012). Permis de bâtir 1996 - novembre 2012 (détails par mois et années).

SPF-FINANCES (2010). Arrêté royal modifiant l'AR/CIR 92 en matière de réduction d'impôt pour des dépenses faites en vue d'économiser l'énergie dans une habitation. *Belgisch Staatsblad - Moniteur Belge*, 10.09.2010: 58621.

STEELE, J. (2005). *Architecture écologique : Une histoire critique*. Actes Sud.

SUGER (1145). *Liber de rebus in administratione sua gestis*.

THE STATIONARY OFFICE (2000). Warm Homes and Energy Conservation Act.

TORCELLINI P., Pless S., D. M. (2006). Zero energy buildings : a critical look at the definition. *In ACEEE Summer Study, 2006 Pacific Grove, California*.

TORIO, H., ANGELOTTI, A. et SCHMIDT, D. (2009). Exergy analysis of renewable energy-based climatisation systems for buildings : A critical view. *Energy and Building*, 41:248–271.

TORIO, H. et SCHMIDT, D. (2011). Annex 49 Summary report : Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities. Rapport technique, ECBCS.

TRACHTE, S. (2012). *Matériau, Matière d'Architecture Soutenable. Choix responsable des matériaux de construction pour une conception globale de l'architecture soutenable.* Thèse de doctorat, Université catholique de Louvain, Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme.

TRACHTE, S. et DE HERDE, A. (2010). *Choix des matériaux - Ecobilan de parois*. Sercive public de Wallonie.

TRACHTE, S. et MASSART, C. (2011). Reducing the environmental impact of new dwellings : Analyse of the balance between heating energy savings and environmental assessment of the building materials. *In PLEA 2011 Conference*.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (1992). Rio Declaration on Environment and Development, United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro.

US GREEN BUILDING COUNCIL (2002). Green building rating system for new construction & major renovations - version 2.1. [online] Available. www.usgbc.org.

VALE, B. et VALE, R. (2002). *The New Autonomous House : Design and Planning for Sustainability*. Thames & Hudson Ltd.

VAN MOESEKE, G. (2006). alter-CLIM : a decision tool for passive and hybrid thermal control strategies. *In PLEA2006, 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Geneva, Switzerland.

VAN MOESEKE, G. (2011a). La complexité comme inspiration - de notions complexes à un discours sur la soutenabilité en architecture. *In UES-EUS, 8ème congrès de systémique*.

VAN MOESEKE, G. (2011b). Sustainable architecture and the Passive House concept : achievements and failures on energy matters. *In PLEA 2011 - 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture*.

VAN MOESEKE, G. (2011c). Turn the gas off - zero-energy achievement based on free floating internal conditions between health-related limits. *In PLEA 2011 - 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture*.

VAN MOESEKE, G. (2012). Solar and internal gains in low-energy and passive houses. *In PLEA2012 - 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture*, Lima, Peru.

VAN MOESEKE, G., ATTIA, S., MASSART, C., DARTEVELLE, O. et DE HERDE, A. (2012a). Proposition de redéfinition pragmatique des bâtiments net zéro-énergie. *In Passive house Symposium*, Brussels.

VAN MOESEKE, G., DELTOUR, J. et DARTEVELLE, O. (2012b). Rapport de recherche intermédiaire - mars 2012 - apport d'architecture et climat, ucl. Rapport technique, Architecture et Climat.

VAN MOESEKE, G. et GOETGHEBUER, T. (2009). Low energy and level of requirements - the example of flexibility in space planning. *In PLEA 2009 - 24th Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Quebec City, Canada.

VANDERHAEGHEN, J.-C., CARETTE, O., HUYTEBROECK, E., DE PAEPE, M., DE BIE, A., MORENO-VACCA, S. et WACHTELAER, P. (19 Octobre 2012). Accord « passif 2015 » signé par la confédération construction bruxelles-capitale, l'union professionelle du secteur immobilier, la passivehuis platform, l'organisation professionnelle des bureaux d'ingénierie et de consultance (ori), la plateforme maison passive, architects in brussels (arib) et la ministre e. huytebroeck.

VERBEECK, G., HENS, H. et ACHTEN, K. (2008). The economics of extremely low energy dwellings : how far can we go ? *In PLEA 2008 - 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture*.

VISIER, J. C. et JANDON, M. (2004). Commissioning tools for improved energy performance - Results of IEA ECBCS ANNEX 40. www.commissioning-hvac.org.

VITRUVE (2004). *De l'architecture : Livre VI*. Les Belles Lettres.

WARGOCKI, P., SUNDEL, J., BISHOF, W., BRUNDRETT, G., FANGER, P. et GYNTELBERG, F. (2002). Ventilation and health in non-industrial indoor environments : report from a European Multidisciplinary Scientific Consensus Meeting (EUROVEN). *Indoor Air*, 12:113–128.

WIKIPEDIA (2012). article 'Vague de froid en Europe (février 2012)'. consulté le 27 février 2013.

WIKIPEDIA (2013). article 'ecologie profonde'. consulté le 27 février 2013.

WILKINSON, P., LANDON, M. et STEVENSON, S. (2000). Housing and winter death : epidemiological evidence. *In* RUDGE, J. et NICOL, F., éditeurs : *Cutting the cost of cold : affordable warmth for healthier homes*, pages 25–35. E&F Spon.

WINES, J. (2002). *L'architecture verte*. Tashen.

WOLKOFF, P. et KJARGAARD, S. (2007). The dichotomy of relative humidity on indoor air quality. *Environment International*, 33:850 – 857.

WOLTON, D. (1999). *Internet et après ? Une théorie critique des nouveaux médias*. Flammarion.

YANNAS, S. (2011). Adaptive strategies for an ecological architecture. *Architectural Design*, 81:62–69.

YOHE, G. W., LASCO, R. D., AHMAD, Q. K., ARNELL, N. W., COHEN, S. J., HOPE, C., JANETOS, A. C. et PEREZ, R. T. (2007). Perspectives on climate change and sustainability. *In Climate Change 2007 : Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pages 811–841. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

ZUMTHOR, P. (2010). *Thinking Architecture*. Birkhäuser Architecture.