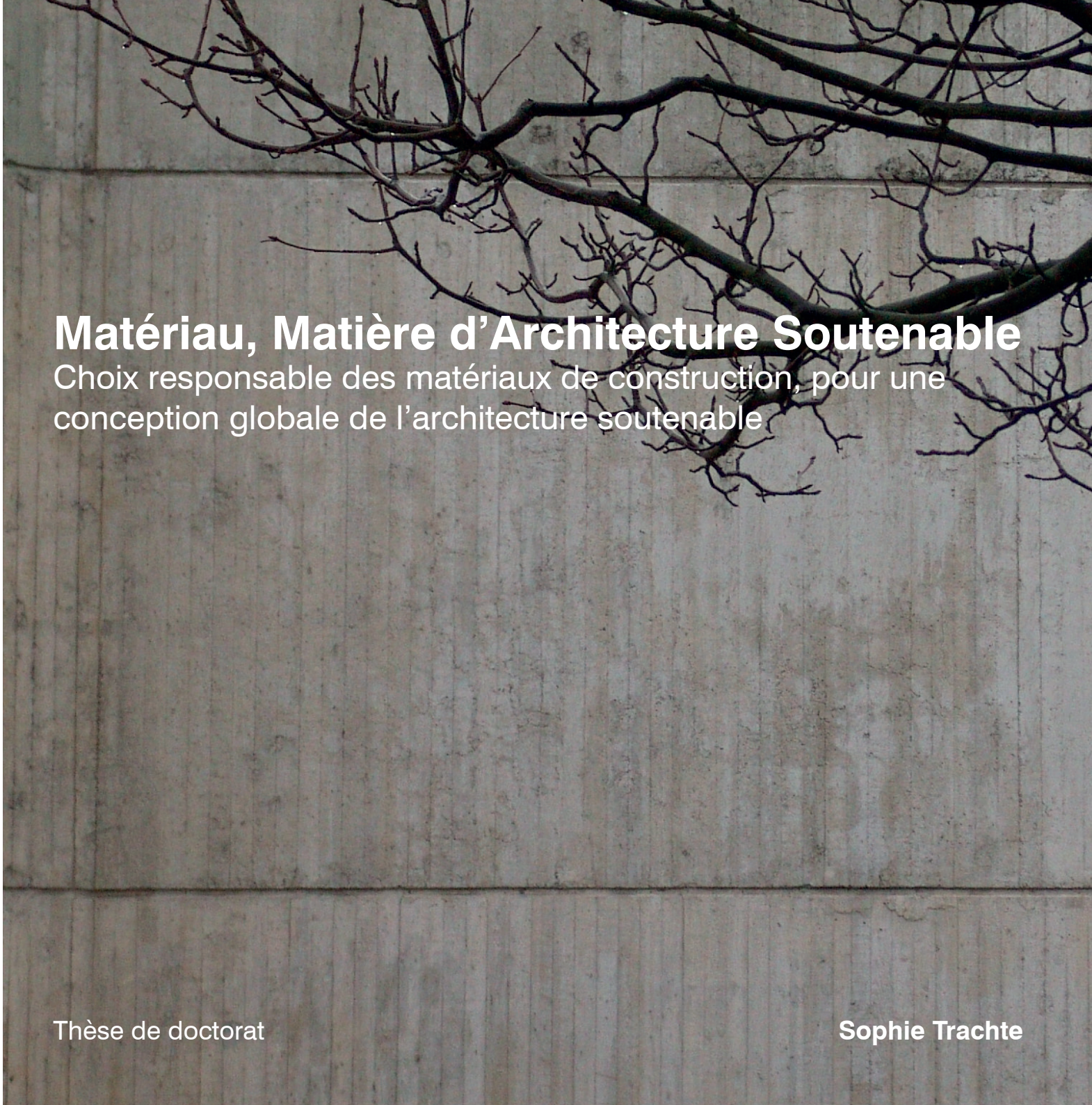


Matériau, Matière d'Architecture Soutenable

Choix responsable des matériaux de construction, pour une conception globale de l'architecture soutenable

Thèse de doctorat

Sophie Trachte

UCL Université catholique de Louvain

Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale et d'urbanisme **LOCI**

Cellule de recherche **Architecture et Climat**

Matériau, Matière d'Architecture Soutenable

Choix responsable des matériaux de construction, pour une conception globale de l'architecture soutenable.

Thèse de doctorat soutenue le 15 juin 2012 par **Sophie TRACHTE** en vue de l'obtention du grade de Docteur en Art de Bâtir et Urbanisme.

UCL Université catholique de Louvain

Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale et d'urbanisme **LOCI**

Cellule de recherche **Architecture et Climat**

PROMOTEUR
Prof. André DE HERDE

MEMBRES DU JURY

Stéphane CITHERLET	(HEIG-VD)
Arnaud EVRARD	(UCL, LOCI)
Jean-Bernard GAY	(LESO, EPFL)
Louis LARET	(SECO)
Jean STILLEMANS	(UCL, LOCI)
David VANDERBURGH	(UCL, LOCI)

À maman,
à mes grands-parents, pour leur affection et leur soutien,
à Félix et Victor, mes enfants, pour le bonheur qu'ils m'apportent au quotidien.

Résumé

Le choix des matériaux est une étape fondamentale dans le processus de conception architecturale d'un bâtiment. Cette étape devient aujourd'hui prépondérante dans la mesure où l'architecte, en matière de choix, fait face à trois problématiques majeures: le foisonnement et la multiplication de nouvelles matières, le désir de dématérialisation engendré par la séparation entre la structure du bâtiment et son enveloppe et le renforcement des exigences énergétiques, environnementales et sanitaires.
Si ces deux derniers siècles ont, dans un esprit de modernité, contribué au développement technologique et chimique des matériaux de construction et à la mutation de l'architecture, ils ont engendré un changement majeur dans la relation que l'homme entretenait avec la nature: l'homme s'est détaché de l'écosystème dont il faisait partie en considérant celui-ci comme un bien de consommation et en exploitant sans retenue les ressources naturelles. Ce faisant, l'homme a d'une part, accentué les phénomènes de pollution et de dérèglements de l'écosystème terrestre et d'autre part a contribué à la détérioration de sa propre santé.
Depuis la publication du Rapport Brundtland en 1987, l'homme reconnaît peu à peu ses responsabilités et prend conscience de l'urgence à réagir efficacement pour freiner voir enrayer le processus enclenché. Si le secteur de la construction n'est pas le seul secteur d'activité responsable de cette situation, il est non seulement un des secteurs qui a le plus de potentialités de changement et d'amélioration tant au niveau de l'utilisation des ressources et que de la réduction des rejets (pollution atmosphérique, qualité de l'air intérieur, production de déchets), mais il est également un secteur qui a le plus d'influence sur notre mode de vie et ce faisant, sur notre mode de fonctionner, de consommer, de penser.

Cette thèse questionne les enjeux de la matière et des matériaux de construction dans la conception de l'architecture soutenable. Le matériau de construction joue un rôle prépondérant dans l'architecture en répondant à des exigences de protection et de confort et de performances techniques tout en favorisant un langage architectural et en éveillant des sensations. Mais le rôle des matériaux dans la conception de l'architecture soutenable dépasse la notion d'image ou de performance : le matériau de construction doit aujourd'hui répondre à des exigences de préservation des ressources, d'impact sur l'environnement, d'impact sur la santé, mais également à des exigences de réutilisation ou de recyclage.
La question du choix est abordée suivant une approche prospective, globale et multidisciplinaire. Prospective, car elle tient compte non seulement des impacts environnementaux et sanitaires scientifiquement avérés, mais également de ceux qui sont « présumés ou pressentis » et cela à chaque étape du cycle de vie du matériau de construction.
Globale, car elle tient compte de l'ensemble des étapes du cycle de vie des matériaux et du bâtiment. Multidisciplinaire, car elle développe autour du matériau de construction, des aspects sensibles, scientifiques, historiques, industriels, techniques, environnementaux, sanitaires, etc.
Cette vision holistique du matériau de construction permet d'élargir le champ des considérations en révélant et en conjuguant, par une utilisation « raisonnée » trois matérialités de celui-ci: la matérialité visible, la matérialité intrinsèque et la matérialité soutenable.

Par l'étude des matériaux de construction, par l'étude de leur évolution et de leurs caractéristiques, par l'identi-

fication des impacts environnementaux et sanitaires engendrés par ceux-ci sur l'ensemble de leur cycle de vie, différentes notions telles que la notion de lien, de cycle et de précaution ont été mises en évidence. Ces notions, si elles sont intégrées en amont du processus de conception et de construction, permettent, non seulement de favoriser une architecture honnête, emplie de sens et en adéquation avec son lieu d'implantation et sa fonction, mais également de réconcilier l'homme avec son environnement et avec lui-même.

Placer les aspects environnementaux et sanitaires tout en haut de la pyramide de critères d'évaluation permettrait de renouer avec un processus de sélection « responsable ». Ce processus responsable mettrait en évidence tout le potentiel technique, énergétique et environnemental des matériaux de construction dans la conception et composition architecturale et cela, sans entraver la créativité et l'innovation de chaque architecte vis-à-vis des spécificités de surface offertes par la matière, par les matières.

Dans le but d'encourager ce processus, cette thèse s'est attachée à développer un outil d'aide à l'évaluation environnementale et sanitaire de composants d'un bâtiment. Cet outil est basé d'une part sur une réflexion prospective qui dépasse le stade des connaissances actuelles et d'autre part, sur une approche globale sur l'ensemble du cycle de vie des matériaux et des systèmes et sur un ensemble cohérent de critères à la fois quantitatifs et qualitatifs.

Remerciements

Je remercie chaleureusement mon promoteur, le Professeur André De Herde pour les responsabilités qu'il me confie au sein de l'équipe Architecture et Climat et pour la confiance et la liberté qu'il m'a témoignées et accordées dans le développement de cette thèse et qu'il me témoigne et m'accorde quotidiennement dans mon travail de chercheur. Ses encouragements constants, son enthousiasme communicatif et sa vision stratégique de la problématique traitée ici m'ont été d'une grande aide et m'ont permis de donner le meilleur de moi-même.

Je tiens également à remercier Messieurs Jean-Bernard Gay et Louis Laret pour leur soutien et leurs conseils avisés tant sur des questions de fond que sur des questions de forme et de structure.

Je suis particulièrement reconnaissante envers Monsieur Sébastien Breels du bureau d'étude MATRIciel pour nos nombreux échanges, tant sur la philosophie à suivre en termes de choix de matériaux que sur les réalités de terrain. Ces aller-retours entre théorie et pratique ont été un appui précieux dans le développement de ce travail.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à tous les fabricants et producteurs de matériaux de construction ainsi que certaines fédérations et sociétés de valorisation des déchets pour leur disponibilité et le partage de connaissances et de points de vue. Je pense notamment à Madame Christine Beunen (PMC), à Messieurs Benoit Misonne (Pierre Bleue Belge), Geoffrey Houbart (Knauf), Vincent Briard (Knauf Insulation), Wim Heijboer (Pavatex), Noël Naert (Febelcem) et Thibault Mariage (Tradecowall)...

Toute ma gratitude va vers ces nombreux chercheurs, qui, en Belgique, en Europe et dans le monde, partagent cette même vision de l'architecture soutenable au travers des matériaux de construction. Je pense plus particulièrement ici en Belgique, à Virginie Lambert et Sophie Duterne (IBGE), Liesbet Temmerman (CERAA), Wim Debacker (VITO), Katrien Putzey, Laetitia Delem et Johan Van Dessel (CSTC) ainsi que Karen Allacker (KUL).

Je remercie également tous les architectes belges dont j'apprécie le travail et qui m'ont permis d'illustrer cette thèse, à travers leur passion pour l'architecture et leurs réalisations. Je pense plus particulièrement à Auffray Deghorain (bureau Calimucho), Benoît De Jonghe (bureau De Jonghe) et Fabienne Gijsels (bureau archi4you).

Cette thèse n'aurait également pas vu le jour sans le soutien et l'aide de nombreuses autres personnes.
Pour les discussions constructives, leurs conseils perspicaces et éclairants et leurs encouragements quotidiens, mes remerciements vont à toute l'équipe d'Architecture et Climat, en particulier Catherine Massart, Sylvie Rouche, Arnaud Evrard, Coralie Cauwert, Geoffrey Moeseke, Cécile Aubecq, Valentine Regnier, Daniella Painemal et Shady Attia.
Pour leur compétence en graphisme et leur collaboration quotidienne à la mise en page et à l'illustration de cette thèse, ma profonde gratitude va à Sylvie Rouche et José Flémal.
Pour leur relecture minutieuse et leur maîtrise de la langue française, mes remerciements vont à Sophie Meerbergen, Marie Evrard, Sylvie Rouche et Catherine Massart.
Pour leurs attentions, leur amitié et leur soutien, je remercie mes grands-parents, mon père et sa compagne, Ivone, Isabelle, Jean-Charles, Didier, Valérie et tant d'autres.

Je tiens à remercier tout particulièrement ma belle-mère, Martine Latapie pour tous les services rendus et l'affection avec laquelle elle a entouré mes garçons pendant ces quatre années.

Et pour terminer, je remercie, avec beaucoup d'émotion, mon compagnon, mais aussi mes deux garçons, Félix et Victor, d'avoir accepté, avec patience et générosité, de partager leur vie quotidienne avec ce troisième «bébé».

Sommaire

Résumé 2

Remerciements 5

Sommaire 7

Introduction 13

Partie A - Architecture et Matériau de construction 23

Chapitre 1 - Matériau, matière d'Architecture Soutenable, tentative de définition 25

Matérialité visible : matériau, surface et architecture 28

Matérialité intrinsèque : réponse aux exigences techniques de l'architecture 32

Matérialité soutenable : intégration des objectifs du développement durable dans la sélection des matériaux de construction 35

Chapitre 2 - Architecture et matériaux de construction au fil de l'Histoire, bref aperçu 38

Pourquoi la sédentarisation comme date de départ? 38

Les lignes du temps 41

Analyse des lignes du temps 58

Chapitre 3 - Caractéristiques des matériaux de construction 59

Caractéristiques et propriétés des matériaux 59

Le bois 70

La pierre naturelle 71

Les matériaux en terre crue 72

La terre cuite ou céramique 73

Les métaux 74

Les liants minérau, mortiers et produits dérivés 75

Le béton 76

Le verre 77

Les plastiques 78

Les matériaux bitumineux 79
Les matériaux isolants 80

Conclusion de la Partie A 81

Partie B - Matériau de construction et cycle de vie 85

Chapitre 1 - Le cycle de vie, de la matière première au déchet 87
Extraction des matières premières 87
Fabrication, procédés de transformation de la matière première 90
Chantier, mise en oeuvre et assemblage 92
Vie en oeuvre 94
Démolition - déconstruction 94
Fin de vie: élimination, valorisation, traitement 95

Chapitre 2 - Les matières premières, exploitation et consommation des ressources 97
Nature de la matière 97
Matières premières et ressources 99
Différentes ressources 99
Disponibilité des ressources 103
Exploitation des ressources 107
Conséquences de l'exploitation des ressources 108

Chapitre 3 - Les processus de fabrication, impacts sur la qualité de l'air, du sol et de l'eau 110
Cycles biogéochimiques 110
Emission de gaz à effet de serre et réchauffement climatique 116
Acidification de l'atmosphère 122
Eutrophisation des écosystèmes 125
Pollutions liées à l'ozone 127

Chapitre 4 - Les matériaux et leur transport, quels impacts? 134
Histoire du commerce et évolution du transport de marchandises 135

Géographie des flx de transport en Belgique 139
Modes de transport alternatifs au transport routier 140
Impacts environnementaux des différents modes de transport 141
Scénarios de transport et analyse des impacts 143
Transport de quelques matériaux sur le cycle de vie 151
Vers un transport de marchandises plus soutenable 154

Chapitre 5 - Les matériaux de construction et la santé 157
Impact sanitaire des polluants atmosphériques 158
Fabrication et mise en oeuvre : produits toxiques et substances nocives 165
Matériaux de construction et qualité de l'air intérieur 169

Chapitre 6 - Les matériaux en fin de vie et la production de déchets 175
Législation européenne en matière de déchets et de déchets de construction 176
Législation belge en matière de déchets et de déchets de construction 178
Classes de déchets de construction 180
Filières d'élimination: description, incidences et coût économique 180
Filières de valorisation 183
Décyclage et recyclage, une nuance importante 184
Implications de la prévention et de la valorisation des déchets dans le projet 185
Conclusion de la Partie B 189

Partie C - Analyse de cycle de vie et outils d'aide existants 197

Chapitre 1 - Analyse de cycle de vie 198
Historique, de l'écobilan à l'analyse de cycle de vie 198
Analyse de cycle de vie et normes en vigueur 199
Qu'est-ce qu'une analyse de cycle de vie 200
Harmonisation européenne de l'évaluation environnementale 204
Analyse de cycle de vie dans le secteur de la construction 206

Chapitre 2 - Labels environnementaux et déclarations environnementales de produit **208**
Labels dits «environnementaux» ou «écologiques» 208
Déclarations Environnementale de Produit (DEP) 211

Chapitre 3 - Outils d'aide pour l'évaluation environnementale **216**
Outils de type «Checklist» 216
Logiciels d'évaluation environnementale 216
Autres outils d'évaluation environnementale 219
Outils d'aide et méthodes d'évaluation environnementale de bâtiments 220

Conclusion de la Partie C **221**

Partie D - Développement d'un outil d'évaluation **225**

Chapitre 1 - L'évaluation environnementale, nécessité, défis et philosophie suivie **226**
Nécessité de l'évaluation environnementale 226
Outil d'évaluation – défis et philosophie recherchée 227

Chapitre 2 - La maison individuelle et ses composants, support de l'outil **231**

Chapitre 3 - Méthodologie **233**
Définition du champ de l'étude 233
Critères et indicateurs considérés 233
Elaboration d'une base de données 235
Durée d'évaluation 240
Unité de comparaison 241
Synthèse et compilation des données 241
Question ouverte: la pondération des critères 242
Arborescence et schémas de fonctionnement 243

Conclusions **245**

Perspectives de recherche **255**

Table des illustrations 259

Bibliographie 271

Annexes 287

Annexe 1 - Caractéristiques des matériaux de construction 289

Annexe 2 - Performances hygrothermiques des matériaux 387

Introduction
Questions, Convictions, Ambitions

Enjeux et objectifs de la thèse

Le sujet de cette thèse, les matériaux de construction, les rôles qu'ils ont à jouer dans l'architecture et leurs impacts sur l'environnement et la santé de l'être humain, s'inscrit d'une réflexion globale sur l'architecture soutenable au sein de l'équipe de recherche « Architecture et Climat », qui est rattachée à la faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale et d'urbanisme (LOCI) de Louvain-la-Neuve.
La politique de cette équipe de chercheurs est de questionner l'architecture, les pratiques architecturales et les procédés de construction afin de proposer aux architectes et aux utilisateurs des lignes de conduite ou des principes de conception, de construction et d'usage en adéquation avec une utilisation rationnelle des ressources (énergétiques et non énergétiques) et en réponse aux enjeux du développement durable.
Deux thématiques sont au cœur de cette politique : le confort et le bien-être de l'être humain ainsi que l'influence du climat. Ces deux « fils rouges » permettent d'orienter les réflexions et sont étudiés à différentes échelles temporelles et spatiales :

- depuis la conception et les premières esquisses d'un projet jusqu'à la démolition du bâtiment arrivé en fin de vie, en passant par la mise en œuvre et la construction ainsi que les phases d'utilisation et de rénovation ;
- depuis l'espace intérieur d'une pièce ou d'une habitation jusqu'à l'échelle globale de la planète en passant par l'espace public et la ville.

Fondée en 1980, dans l'effervescence qui a suivi les chocs pétroliers et les crises énergétiques de 1973 et de 1979, la cellule de recherche « Architecture et Climat » s'est tout d'abord focalisée sur la question de l'énergie et de son utilisation rationnelle principalement dans l'habitat et les immeubles de bureaux, développant ainsi les principes de l'architecture bioclimatique.
Suite au rapport Brundtland (1987) définissant la notion de développement durable et aux vingt-sept principes de la convention de Rio (1992), les recherches se sont élargies aux autres priorités de l'architecture soutenable en étudiant des problématiques telles que la gestion de la lumière naturelle, l'utilisation rationnelle de l'éclairage artificiel, la qualité de l'air et la ventilation, les différents aspects du confort intérieur, l'eau et la gestion de celle-ci dans l'habitat et dans la ville, le microclimat, l'espace public, la conception selon les standards « passif » et « basse-énergie »… ainsi que les matériaux de construction et leur impact sur l'environnement et la santé.

L'idée d'une thèse sur la problématique des matériaux de construction nous est venue après la rédaction en 2003 d'un premier travail de maîtrise concernant la gestion des déchets à réaliser ou à mettre en place sur un chantier de rénovation afin de limiter la production de déchets en favorisant le tri et le recyclage de ceux-ci. La conclusion principale de ce travail était que la gestion des déchets devait être réfléchie, en amont de la phase de chantier, durant la phase de conception du projet. Cette conclusion mettait en évidence le rôle de l'architecte et l'importance du choix du matériau de construction et du système constructif dans l'acte de bâtir.
L'acte de bâtir, de mettre en œuvre et d'assembler des matériaux est, depuis la nuit des temps, l'une des occupations fondamentales de l'homme qui construit avant tout, pour s'abriter et se protéger. En effet, « malgré l'évolution des conditions culturelles, économiques, constructives et énergétiques, le prétexte essentiel de toute activité constructive est toujours et encore la protection de l'homme contre les éléments climatiques, l'ensoleillement excessif, les températures extrêmes, les précipitations et le vent »[1]. Cette notion d'enveloppe protectrice est aujourd'hui encore

1 Source: [SCHITTICH 2005]

intensifiée par les enjeux énergétiques et climatiques auxquels doit faire face notre monde actuel.

Mettre en œuvre et assembler des matériaux pour construire un édifice, préalablement imaginé et pensé, est un acte complexe basé à la fois sur une multitude de contraintes et de connaissances et sur différentes échelles de temps et d'espaces. Cet acte suppose que, lorsque le concepteur, l'architecte ou le bâtisseur met en œuvre un ensemble de matériaux, il a préalablement pris connaissances des spécificités et caractéristiques (physiques, mécaniques, chimiques…) propres à chaque matériau ainsi que des différentes possibilités constructives et de mises en œuvre offertes par ceux-ci. Cela signifie qu'il a également pris en considération l'aspect des matériaux, les spécificités de surface, les textures, les couleurs, etc., et qu'il utilise au mieux ces différentes caractéristiques dans sa composition architecturale. On peut ainsi dire qu'il établit un choix en toute connaissance de cause et/ou qu'il s'est approprié les différentes spécificités des matériaux sélectionnés afin de les exploiter de la meilleure manière qui soit (qualitativement et quantitativement) dans son architecture.
Le choix des matériaux est donc une étape fondamentale dans le processus de conception architecturale d'un bâtiment. Mais aujourd'hui, plus que jamais dans le monde de l'architecture et de la construction, cette étape devient prépondérante dans la mesure où l'architecte, en matière de choix, fait face à quatre questions majeures:

• La diversité et la multiplicité toujours croissantes des matériaux sur le marché de la construction.

Durant des millénaires et jusqu'au début du 19e siècle, il y a eu de grandes constances dans l'utilisation et l'exploitation des matériaux avec une seule règle de sélection : construire avec ce que l'on trouve sous les pieds ou à portée de main, construire avec ce que la nature, son sol et son sous-sol offrent comme matières premières. Les hommes ont sans cesse questionné le potentiel conceptuel de ces quelques matériaux en tirant parti du contexte local et des ressources disponibles. L'utilisation parcimonieuse et constante de quelques matériaux et le peu de moyens technologiques (outils, moyens énergétiques…) n'ont pas entravé la créativité. Au contraire, ils ont donné lieu à une multitude de compositions architecturales et d'architectures différentes.
Aujourd'hui, nous disposons d'une variété incroyable de matériaux de construction provenant du monde entier et cette diversité ne cesse de croître grâce aux nouvelles technologiques, aux avancées industrielles et à la globalisation du commerce et de la communication. Cette diversité « infinie » offre bien entendu des possibilités insoupçonnées et terriblement excitantes pour le concepteur, mais est également source de risque avec en premier lieu la délicate question du choix puisque le concepteur n'a plus à sa disposition toutes les connaissances préalablement acquises par ses prédécesseurs, ni le recul suffisant pour pouvoir juger correctement leurs performances.

• la dématérialisation >< matérialisation de l'architecture

L'architecture, les matériaux et les procédés constructifs font partie intégrante de notre société « virtuelle » de plus en plus dédiée à l'image et aux impressions sensorielles. Incontestablement, on met aujourd'hui l'accent sur la surface. Ceci est sans doute lié à la séparation croissante entre structure portante et enveloppe, mais également aux possibilités technologiques récentes comme les matières synthétiques, l'impression sur différents supports dont le verre ou encore, les applications informatiques et multimédias. Certains architectes intègrent cette politique de l'image aux réalités de la construction et proposent des façades ou des espaces aux images/surfaces multicolores, des façades « écran »… Cette tendance peut parfois avoir comme dérive architecturale que l'image d'un bâtiment devienne plus importante que le bâtiment lui-même.
A contrario, d'autres architectes se cramponnent aux qualités de matériaux « authentiques » tels que la pierre massive, le bois non traité, le béton apparent… pour faire la démonstration de la présence physique d'un ouvrage bâti.

- l'accroissement des exigences en matière de performance énergétique des bâtiments ou la question de la performance de l'enveloppe et de l'énergie grise liée à cette performance

Après vingt années de joyeuse effervescence économique, les chocs pétroliers de 1973 et 1979, ont mis en évidence la « finitude » de certaines ressources naturelles dont notamment les ressources fossiles.
La conséquence majeure de ces crises est l'augmentation significative et constante du prix du pétrole et des autres combustibles fossiles avec une hausse spectaculaire à partir de l'année 2000.
L'augmentation importante du prix des combustibles fossiles et la prise de conscience des enjeux du réchauffement climatique ont fait apparaître dans le secteur de la construction, une volonté de réduire considérablement et progressivement la consommation d'énergie liée à l'utilisation des bâtiments (chauffage, climatisation, éclairage…). La réduction des besoins en énergie dans le bâtiment se marque d'abord essentiellement par un travail important sur l'isolation et l'étanchéité à l'air de l'enveloppe des bâtiments ; ce qui permet d'atteindre certains standards énergétiques comme le standard « basse énergie » ou le standard « passivhaus ».
L'enveloppe est donc devenue un élément à considérer en priorité lorsqu'on veut diminuer sensiblement la consommation d'énergie fossile. Mais augmenter la performance thermique de l'enveloppe d'un bâtiment implique à la fois une multiplication des composants et une augmentation signification de la quantité de matières à mettre en oeuvre.
Nous avons d'ailleurs démontré que lorsqu'on tend à diminuer sensiblement la consommation d'énergie à l'utilisation d'une habitation en travaillant sur la performance de l'enveloppe, on consomme davantage d'énergie grise liée à l'utilisation de matériaux de construction. Cette énergie grise devient, dans certains cas, prédominante dans le bilan énergétique global.
Le choix des composants de l'enveloppe doit donc être considéré avec attention lorsqu'on souhaite diminuer sensiblement le bilan énergétique global d'un bâtiment.

- l'accroissement des exigences en matière de performances environnementales et sanitaires ou la prise en compte de l'environnement et de la santé

En 1983, les Nations-Unies adressent au premier ministre norvégien Gro Harlem Brundtland la responsabilité de mettre sur pied et de présider une commission d'experts internationaux qui a pour but d'analyser les détériorations de l'environnement humain et des ressources naturelles ainsi que leurs conséquences sur le plan économique et social. En 1987, le Rapport Brundtland « Our common future » après avoir établi un constat alarmant de l'état à la fois de l'environnement et du développement au niveau planétaire, de leur interdépendance et de « l'insoutenabilité »de leur évolution, a proposé une nouvelle orientation à la question de développement en le qualifiant de « soutenable ».
Parallèlement à ce rapport, de grandes catastrophes sociales et environnementales, dont notamment famines en Afrique, les fuites de pesticides de l'usine de Bhopal en Inde (1984), la découverte du trou dans la couche d'ozone (1985) ou l'accident nucléaire de Tchernobyl (1986) ont dramatiquement participé à conscientiser l'opinion publique quant à la nécessité d'un changement radical de notre définition des dimensions sociales, politiques, économiques et environnementales.
Depuis cette notion ne cesse de se répandre dans tous les secteurs d'activités et plus encore dans le secteur de la construction, qui, à l'heure actuelle, est toujours un grand consommateur d'énergie et de matières premières, mais également un grand producteur de déchets avec « *50 % du total des ressources naturelles exploitées, 45 % de la consommation totale d'énergie, 40 % des déchets produits, 30 % des émissions de gaz à effet de serre et 16 % de*

la consommation d'eau dont 1 à 2 % pour l'alimentation humaine »[2].
Aujourd'hui, face à la prise de conscience de certains impacts environnementaux tels que le réchauffement climatique, l'acidification de l'environnement, l'épuisement de certaines ressources naturelles (dont les énergies fossiles) et les dommages causés aux écosystèmes terrestres et marins, il devient indispensable et urgent de repenser l'architecture en assumant ses responsabilités sur les plans écologique, social et économique.

Mais la définition du développement durable dépasse la prise en compte des aspects environnementaux , elle englobe également les aspects sociaux liés au confort et à la santé des êtres humains.
Aujourd'hui, le secteur de la construction doit faire face à l'émergence de nouvelles préoccupations liées au confort: le respect du bien-être et de la santé, avec la prise en compte des risques non seulement pour les occupants, mais également pour tous ceux qui prendront part au processus de construction.
La santé de l'être humain est notamment dépendante de l'air qu'il respire. Depuis les années 50[3] , les avancées scientifiques et médicales vont permettre de mettre en évidence la relation « environnement et santé »et de mieux cerner les conséquences de la pollution de l'air sur la santé. Même si des lacunes de taille subsistent encore, on comprend de mieux en mieux les effets des principaux polluants de l'air sur la santé. Au fur et à mesure que cette compréhension augmente, des normes de plus en plus sévères dans les pays occidentaux et européens obligent les industriels à innover.
La qualité de l'air atmosphérique est un bien commun vital pour la santé de l'être humain, mais elle n'est pas la seule. En effet, nous passons 85 % de notre temps dans des environnements « clos » dans lesquels nous sommes exposés à de multiples polluants, qu'ils soient chimiques ou physiques. Ces substances trouvent leur origine notamment dans les matériaux qui composent le bâtiment, dans les revêtements de sols, murs et plafonds, dans le mobilier, dans les équipements, mais également dans les produits d'entretien et d'hygiène.
La considération du bien-être, de la santé et de la qualité de l'air intérieur nécessite donc un travail important sur « l'enveloppe intérieure » afin de réduire sensiblement les émissions liées aux matériaux qui sont en contact permanent et direct avec les occupants ou les utilisateurs du bâtiment.
Si le lien entre qualité de l'air intérieur et santé a été prouvé, peu de données scientifiques sont actuellement accessibles et pratiquement aucune information n'est donnée par les fabricants de matériaux sur la composition de leur produit et sur les éventuelles matières « à risques » utilisées lors de la fabrication ou de la mise en œuvre.

Une dernière problématique, moins importante, mais complémentaire aux quatre précédentes est le « come-back » sur le marché de la construction, des matériaux dits « authentiques » ou « naturels » tels les matériaux d'isolation à base de fibres végétales ou les enduits à base de chaux et d'argile. Ces matériaux ont de plus en plus de succès auprès des particuliers, de certains architectes, mais également auprès des administrations (subsides plus importants octroyés pour l'utilisation d'isolants naturels) qui mettent en avant les matières premières utilisées ainsi que

2 Source: [LIEBARD 2005]
3 En 1952, Londres connait un épisode de pollution atmosphérique majeur qui entraînera la mort d'environ 4000 personnes en une semaine. Cet épisode a pour effet de présenter au grand jour le danger mortel que représente la pollution atmosphérique pour la santé des populations urbaines. Un autre épisode ayant eu lieu en décembre 1930, dans la vallée de la Meuse, à proximité de Seraing compte parmi les plus graves phénomènes de pollution acido-particulaire observés (60 morts). Cette pollution, d'origine industrielle a eu pour cause de très mauvaises conditions de dispersion atmosphérique associées à de fortes émissions de SO2, de particules en suspension et d'aérosols divers.

leur impact sur le confort hygrothermique. Cependant, la réelle question à se poser est de savoir si ces matériaux, selon leur composition, ont réellement un bilan environnemental et santé plus favorable que des matériaux plus communément utilisés en construction ?
Au regard de ces cinq questions, nous pouvons affirmer que l'utilisation « réfléchie » des matériaux qui avait peu à peu été négligée est à nouveau d'actualité : le matériau de construction, sa surface, sa matière et ses propriétés intrinsèques jouent un rôle prépondérant dans l'architecture et la construction en répondant à des exigences de performance, de protection et de confort tout en favorisant un langage architectural et en éveillant des sensations chez l'utilisateur ou l'occupant.
Mais ce traitement réfléchi de la matière dépasse la notion d'image ou de performance énergétique : le matériau de construction doit aujourd'hui répondre à des exigences de préservation des ressources, d'impact sur l'environnement, d'impact sur la santé, mais également à des exigences de réutilisation ou de recyclage.

Placer les aspects environnementaux et sanitaires tout en haut de la pyramide de critères d'évaluation ne permettrait-il pas de renouer avec un processus de sélection « responsable » qui mettrait en évidence tout le potentiel technique, énergétique et environnemental des matériaux de construction dans la conception et composition architecturale sans pour cela entraver la créativité et l'innovation de chaque architecte face aux spécificités de surface offertes par la matière, par les matières ?
Et si tel était l'enjeu des matériaux dans une conception soutenable de l'architecture ?

Questions posées par la thèse

Cette thèse est née, d'une part, de la question du choix des matériaux en matière d'impacts environnementaux et de santé et, d'autre part, de la conviction du rôle fondamental de ceux-ci dans la composition et la réalisation d'une architecture soutenable.
Les matériaux peuvent être définis par différentes matérialités : la matérialité visible qui touche à la question de la texture, de la couleur et du ressenti, la matérialité physique ou intrinsèque qui touche à la question de la composition et des propriétés et des performances liées à celle-ci et la matérialité imaginaire qui touche à la représentation des matériaux dans nos traditions et dans l'imaginaire de notre culture occidentale.
Si l'on se place dans la logique du développement durable, on doit également rajouter une quatrième matérialité, la matérialité soutenable qui touche au respect de l'environnement, du confort et de la santé des êtres humains.
Deux questions sont donc posées par cette thèse :

1. quels sont, aujourd'hui, les enjeux des matériaux de construction dans la composition architecturale vis-à-vis de ces différentes matérialités ?
2. est-il aujourd'hui possible, dans un processus de sélection, de concilier ces matérialités ? Comment choisir un matériau ou un assemblage de matériaux alliant éveil des sens, performance énergétique, respect de l'environnement et de la santé et viabilité économique ?

Fidèles aux principes de l'équipe de recherche « Architecture et Climat », nous positionnerons ces questions par rapport à la notion de confort envisagée sur une échelle spatiale, en questionnant à la fois l'environnement intérieur (qualité de l'air, qualité des espaces), mais également l'environnement extérieur (pollution atmosphérique). Cette notion de confort, élargie aux aspects « santé », « besoins en ressources », est aussi envisagée sur une échelle temporelle, depuis l'extraction des matières premières jusqu'au traitement en fin de vie et au recyclage éventuel.

Très rapidement et durant les nombreuses formations, conférences et séminaires auxquels nous avons participé, nous avons pu établir différents constats qui ont influencé le développement de cette thèse.
Il existe aujourd'hui un énorme fossé entre, d'une part, les avancées et connaissances scientifiques et ,d'autre part, les pratiques des professionnels du secteur de la construction. Peu de maîtres d'ouvrage et d'architectes sont conscients des enjeux environnementaux et sanitaires lorsqu'ils effectuent un choix (matériaux, procédés ou méthodes constructives). Et ceux qui en sont conscients manquent souvent d'arguments scientifiques pour étayer un choix plus « écologique » face à des contraintes urbanistiques ou économiques.
Les architectes, submergés par une charge administrative de plus en plus lourde, n'ont ni le temps ni les ressources nécessaires pour décoder, critiquer et assimiler les informations reçues tant la quantité et les sources d'informations sont nombreuses, parfois même contradictoires, et tant l'évolution du secteur industriel, en termes d'innovation, de procédés et de produits est rapide. De plus, les messages véhiculés par la presse et/ou par les fabricants de matériaux sont simplifiés, réduits à certains critères et sont donc partiellement incomplets.
Il existe sur le marché de nombreux outils d'aide à la décision qui pourraient permettre aux architectes de faire des choix plus responsables, mais jusqu'à présent, aucun d'entre eux n'offre un panel de critères suffisamment large que pour développer une vision holistique sur les impacts environnementaux et sanitaires sur l'ensemble du cycle de vie des matériaux de construction et des bâtiments composés par ceux-ci.
De plus, la plupart des outils sont des outils développés dans d'autres pays (notamment en Allemagne, en Suisse, en Autriche et en France), ayant des traditions et réalités constructives parfois fort différentes ou éloignées du contexte belge.

Apparaît donc une question corollaire aux deux premières : comment aider aujourd'hui le concepteur belge à faire un choix « responsable » ? Comment développer un outil qui soit à la fois accessible, compréhensible, qui permette une réelle prise de conscience et qui soit établi sur base de données scientifiques rigoureuses ? Comment développer un outil basé sur une réflexion globale et prospective allant au-delà des connaissances actuelles ?

Structure et méthodologie

Ce travail se décompose en quatre grandes parties. Les trois premières parties répondent à une question:
- qu'est-ce qu'un matériau de construction, quelle est son évolution historique, quel est son rôle en architecture ?
- quels sont les impacts environnementaux et sanitaires d'un matériau de construction sur l'ensemble de son cycle de vie ?
- comment évalue t'-on les impacts environnementaux et sanitaires, existe t'-il des outils ?

La quatrième est l'aboutissement d'une réflexion menée à partir des réponses données aux trois questions précédentes.

La première partie de la thèse esquisse les différentes matérialités des matériaux de construction ainsi que le rôle joué par ces matériaux et leurs spécificités dans la composition architecturale. Cette première partie se développe en trois chapitres et présente une source importante d'informations sur les matériaux, leurs composants, leurs performances…
Le premier chapitre tente de définir les différentes matérialités des matériaux de construction tout en essayant de dégager un dénominateur commun ou une façon de les rassembler. Ce chapitre est abondamment illustré d'exemples, schémas…

Le deuxième chapitre s'attelle à synthétiser de manière graphique l'évolution et la multiplication des techniques constructives et des matériaux de construction depuis la sédentarisation de l'homme, il y a 10 000 ans. Ce chapitre cherche à mettre en évidence la grande constance dans l'utilisation et l'exploitation des matériaux jusqu'au début du 19e siècle, ainsi que les facteurs économiques et sociaux qui ont permis cette évolution.
Enfin, nous explorons, dans le troisième chapitre et l'annexe 1, les différentes grandes familles de matériaux en mettant en évidence leurs spécificités et caractéristiques, les différents produits présents sur le marché de la construction, les possibilités de mises en œuvre…
À l'issue de ces trois chapitres, plusieurs constats peuvent être établis. Ils mettent en évidence l'importance :

- d'intégrer dans les critères de sélection des matériaux, des critères relatifs au respect de l'environnement et de la santé ;
- d'intégrer la notion de cycle de vie de chaque composant ainsi que la durée de vie typique de ceux-ci;
- de considérer l'édifice comme un « tout » puisqu'il s'exprime comme un système constitué de divers éléments/composants qui interagissent les uns avec les autres et avec l'environnement immédiat ainsi qu'avec les occupants de cet édifice.

Ces différents constats nous permettent d'aborder la deuxième partie qui a comme but de présenter le plus objectivement possible les différentes étapes du cycle de vie d'un matériau ainsi que les différents impacts que les matériaux de construction peuvent avoir sur l'environnement et la santé au cours de leur vie. Cette deuxième partie comporte cinq chapitres.
Le premier chapitre aborde les différentes étapes et/ou phases de transformation que subit le matériau de construction tout au long de son cycle de vie, en mettant en évidence les différentes variantes ou possibilités en termes d'utilisation des ressources ou matières premières, de processus de fabrication ou de traitement en fin de vie.
Le deuxième chapitre développe la notion de ressources – naturelle ou non -, de matières premières et de l'exploitation de celles-ci.
Le troisième chapitre aborde en profondeur les différentes pollutions engendrées par les matériaux de construction et les transformations qu'ils subissent tout au long de leur cycle de vie. Ce chapitre est relativement important, car il permet de relier différentes échelles de temps et d'espaces entre elles et de mettre en évidence le lien de cause à effet à travers les cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote, du phosphore…
Le quatrième chapitre analyse l'impact du transport sur le cycle de vie des matériaux. Ce chapitre se divise en plusieurs parties. La première retrace l'historique du transport en Belgique en mettant en évidence le rôle central joué par la Belgique au niveau du commerce international. La deuxième partie tente, au travers de divers scénarii, d'établir des liens entre distance parcourue et pollution en mettant en évidence le mode de transport et/ou la répartition modale utilisés. La troisième partie se concentre sur la politique de transport de certains fabricants en Belgique.
Le cinquième chapitre aborde la question de la santé, des matières « toxiques » introduites dans les procédés de fabrication, des émissions potentielles des matériaux de construction tout en faisant le point sur les recommandations ou valeurs-guides données par certains organismes.
Le sixième et dernier chapitre traite de la problématique des déchets engendrés par les matériaux en fin de vie et mettant en évidence le potentiel de réutilisation et de recyclage des matériaux et en proposant cette solution comme l'alternative à la production de déchets d'une part et à la surconsommation des ressources d'autre part.
Nous nous attacherons à traiter ces trois derniers chapitres (transport,santé et fin de vie/recyclage) en détail et avec précision afin d'apporter notre contribution à l'approfondissement de ces questions fondamentales pour le secteur

de la construction et à élargir le débat sur d'autres critères que l'énergie et les gaz à effet de serre.
À l'issue de la deuxième partie, nous mettons en évidence les critères environnementaux et de santé qui doivent être pris en compte pour un choix soutenable des matériaux de construction et des systèmes constructifs. Cette mise en évidence se fait sur deux échelles : celle du composant ou du produit de construction et celle du bâtiment.

La troisième partie de ce travail de recherche présente l'analyse de cycle de vie (ACV) et une analyse des différents outils d'aide à la décision. Le premier chapitre aborde l'analyse de cycle de vie comme le procédé normalisé pour l'identification, la quantification et l'évaluation des impacts environnementaux des matériaux et des procédés de construction. Les chapitres suivants passeront en revue les différents outils d'aide : les déclarations environnementales et labels écologiques, les outils dits « checklist » et les logiciels ACV qui permettent l'analyse complète d'un bâtiment.
Les conclusions de cette troisième partie font ressortir les défis, challenges ou objectifs auxquels doit répondre un outil d'évaluation environnementale et sanitaire d'un bâtiment au travers de ses composants.

La quatrième et dernière partie de cette thèse est l'aboutissement et la synthèse des questions posées dans les trois parties précédentes. Elle présente ainsi les prémices d'un outil en développant d'une part une méthodologie et un ensemble de critères d'évaluation et d'autre part, une base de données et des schémas de fonctionnement.
Cette partie fait également le point sur l'influence que peuvent avoir les notions de durée d'évaluation environnementale et de durée typique des matériaux sur l'impact environnemental et sanitaire d'un matériau, d'une paroi ou d'un bâtiment.

Caractère innovant de la thèse

Le caractère innovant de cette thèse réside avant tout dans la **vision prospective, globale et multidimensionnelle de la thématique abordée**. Cette vision se traduit par une diversité importante des critères, tant quantitatifs que qualitatifs pour tenter de répondre aux questions posées par cette thèse.
Cette approche prospective, globale et multidimensionnelle est indispensable, et cela, pour trois raisons.
Premièrement, elle permet d'intégrer un des grands principes de la Déclaration de Rio (1992), à savoir le principe de précaution en tenant compte non seulement des impacts environnementaux et sanitaires scientifiquement avérés, mais également de ceux qui sont « présumés ou pressentis » et cela à chaque étape du cycle de vie du matériau de construction.
Deuxièmement, elle permet de bien saisir les véritables enjeux des matériaux de construction dans une composition architecturale, mais également dans une approche holistique du rapport que l'être humain entretient avec son environnement et son écosystème.
Troisièmement, elle correspond à la manière de travailler de l'architecte qui fait continuellement des allers-retours entre les sciences appliquées (physique du bâtiment, résistance des matériaux…) et les sciences humaines (relation humaine, confort, bien-être, qualité de vie, qualité des espaces…), entre des critères quantitatifs mesurables, rationnels et des critères qualitatifs ou plus subjectifs liés à la personnalité, à la sensibilité et au vécu de chacun.
L'architecte, dans son processus de conception, anticipe les besoins et les attentes de la société et les transcende. Il travaille et développe les aspects du confort et du bien-être en s'engageant dans l'intimité de ceux-ci. Il dialogue, questionne, communique… Il met en œuvre de la matière, il crée de l'espace, il matérialise en réalité tangible le rêve qui nous habite…

Cette vision prospective, globale et multidimensionnelle permettra également de considérer les notions de cycle, de lien, de transformation suivant plusieurs angles de vue: l'économie des ressources, la maîtrise des rejets, le respect de l'environnement, mais aussi le respect de la santé.

Plusieurs autres aspects traités dans cette thèse peuvent être soulignés. Il s'agit de la problématique du transport des matériaux, de la problématique de la santé et de la problématique des déchets qui présentent une innovation puisque ces trois problématiques sont actuellement peu développées et surtout peu intégrées dans le monde de la construction.
En outre, la méthodologie de l'outil et la combinaison de critères à la fois quantitatifs et qualitatifs proposent une originalité ou une évolution par rapport aux outils existants. Cet outil offre aussi l'intérêt d'être basé sur des typologies constructives adaptées au contexte belge.

C'est en tant qu'architecte, chercheur, citoyenne engagée et mère de famille que nous avons voulu mener cette thèse en essayant de rassembler, de comprendre et de concilier différents points de vue et différents aspects - rationnels et subjectifs, quantitatifs et qualitatifs – liés à la matière et aux matériaux de construction.
Cette thèse est le résultat d'un long travail de synthèse et de réflexion autour de nombreux domaines (notamment la physique, la chimie, la biologie, la médecine, mais aussi la technologie de la construction, les procédés constructifs, la connaissance des produits et matériaux de construction). Vu notre manque de spécialisation dans certains domaines parcourus, il peut subsister des imprécisions ou des maladresses, mais cette thèse n'a pas pour objectif d'offrir un savoir « définitif » entièrement cadré, au contraire, elle incite à poursuivre de façon intensive les recherches sur les matériaux de construction, sur leurs possibilités techniques et technologiques ainsi que sur les conséquences de leur utilisation sur l'environnement et la santé.
Ce travail embrasse une large thématique : en amont comme en aval, de l'extraction des matières premières au déchet, du premier coup de crayon jusqu'au dernier coup de marteau, il pose des questions sur l'ensemble du cycle de vie du matériau et au-delà, en incluant la notion de recyclage.
En ce sens, en questionnant un « tout », il a pour objectif d'introduire et d'encourager une certaine « philosophie » chez les praticiens. À savoir, connaître les potentialités réelles d'un matériau pour mieux l'exploiter ; connaître les impacts environnementaux et de santé d'un matériau pour ne pas mal l'utiliser.
Il s'agit de donner aux concepteurs des lignes de conduite ou des outils leur permettant de prendre des décisions et de poser des choix raisonnés, sensés, en favorisant un aller-retour permanent entre une approche globalisante soucieuse des problèmes environnementaux actuels et une approche soucieuse des possibilités constructives, techniques et économiques.
De cette manière, nous espérons pouvoir contribuer au développement d'une architecture soutenable, c.-à-d. une architecture supportable pour l'environnement et la planète, économiquement viable, juste, équitable et respectueuse de la santé pour l'ensemble des citoyens.

Partie A

Architecture et Matériau de construction

TABLE DES MATIERES

Chapitre 1 - Matériau, matière d'Architecture Soutenable, tentative de définition **25**

Matérialité visible : matériau, surface et architecture 28

Matérialité intrinsèque : réponse aux exigences techniques de l'architecture 32

Matérialité soutenable : intégration des objectifs du développement durable dans la sélection des matériaux de construction 35

Chapitre 2 - Architecture et matériaux de construction au fil de l'Histoire, bref aperçu **38**

Pourquoi la sédentarisation comme date de départ? 38

Les lignes du temps 41

Analyse des lignes du temps 58

Chapitre 3 - Caractéristiques des matériaux de construction **59**

Caractéristiques et propriétés des matériaux 59

Le bois 70

La pierre naturelle 71

Les matériaux en terre crue 72

La terre cuite ou céramique 73

Les métaux 74

Les liants minérau, mortiers et produits dérivés 75

Le béton 76

Le verre 77

Les plastiques 78
Les matériaux bitumineux 79
Les matériaux isolants 80

Conclusion de la Partie A **81**

Matériau, matière d'architecture soutenable, tentative de définition

Matériau, matière d'architecture soutenable est le titre de cette thèse. Les différents termes utilisés dans ce titre permettent de clairement identifier la problématique visée par ce travail. C'est pourquoi il est important, dans un premier temps, de les définir.

Matériau

Un matériau est défini comme la matière de base servant à la réalisation d'ouvrages matériels ou intellectuels ou comme l'ensemble des éléments nécessaires à la construction d'un ouvrage. Un matériau est une matière d'origine naturelle ou artificielle que l'homme façonne pour en faire des objets.
La nature chimique, la forme physique (phases en présence, granulométrie et forme des particules...), l'état de surface des différentes matières premières qui sont à la base des matériaux confèrent à ceux-ci des propriétés particulières.
Un matériau est donc une matière de base sélectionnée en raison de propriétés particulières et mise en œuvre en vue d'un usage spécifique.
On distingue ainsi quatre grandes familles de matériaux: les matériaux minéraux, les métaux, les matériaux organiques et les matériaux composites (mélange des trois autres groupes).

Exemples de matériaux : le bois, les papiers et cartons, la chaux, la céramique, le verre, les matières plastiques, les métaux, les matériaux composites comme les bétons, la pierre, le plâtre, etc.

Matière

La matière est définie, en physique, comme la substance qui constitue un corps et qui lui donne une réalité tangible.
Ses trois états les plus communs sont l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux. Lorsque la matière passe d'un état à l'autre, elle effectue une transition de phase. Ce phénomène est étudié en thermodynamique via les diagrammes de phase. La transition de phase se produit lorsque certaines caractéristiques de la matière changent : pression, température, volume, densité, énergie, etc.
La matière occupe de l'espace et se mesure à l'aide de la masse. Ainsi, tout ce qui a une masse est de la matière.
La matière est consituée d'un ensemble de molécules, elles-mêmes formées par un agencement d'atomes et d'éléments chimiques.

Architecture

L'architecture, terme issu du latin «architectura» désigne une discipline qui associe art et science de construire des bâtiments terrestres ou navals et des structures.
C'est un métier multi-disciplinaire qui ne peut ignorer la philosophie, la socio-psychologie, le droit ou la politique car l'architecte est avant tout le concepteur de notre manière de vivre.
Cette discipline concerne la conception et la construction d'espaces (que ce soient des villes, des bâtiments, des intérieurs, des paysages etc).
Le terme «architecture» désigne également l'étude et la classification des constructions, que leur conception ait été réfléchie ou non.
D'après le traité «De Architectura» de Vitruve, l'architecture repose sur une combinaison harmonieuse et équilibrée de trois principes :
- *Venustas*: principe lié à la beauté et l'esthétique
- *Firmitas*: principe lié à la solidité
- *Utilitas*: principe lié à l'habitabilité (fonction et confort)

Cette association de termes est restée au fil du temps, bien que, suivant les époques, les termes aient changé de signification:
- Venustas : beauté, volupté, décoration, agrément, sentiment, forme...;
- Firmitas: solidité, commodité, construction, solidité, logique, structure, production etc;

- Utilitas: utilité, nécessité, distribution, commodité, harmonie, fonction, perception...

L'architecture se caractérise aussi par un processus de «conception/construction» partant d'une intention établie dans le « projet », lequel se définit par des plans et des représentations diverses qui lui feront par la suite intégrer temps de construction et d'usage.
Cet effort conscient et préalable est propre au processus de conception architecturale et a pour objectif de concilier l'utilité, l'usage, la fonction avec la beauté de formes, de matières, d'espaces et de structures.
C'est d'ailleurs cet objectif fonctionnel, cet aspect pratique lié à l'usage dont découle l'aspect économique qui distingue l'architecture des autres arts dits décoratifs que sont le dessin, la gravure, la peinture et la sculpture.

Selon ces trois premières définitions, le matériau de construction pourrait donc être considéré comme la matière de base, la substance qui va donner, par la main de l'homme, forme et corps à l'architecture.
On pourrait même insister en disant que *sans matériau, sans substance concrète et réelle, il n'y a pas d'architecture, ou alors celle-ci demeure à l'état de concept, d'idée, de rêve et parfois d'utopie*[1].
En effet, si on analyse les différentes étapes du processus de conception et de construction d'un projet d'architecture, on comprend que ce processus est avant tout l'évolution de l'idée abstraite d'un bâtiment jusqu'à sa réalisation concrète dans un environnement donné et à un moment donné.
Réaliser, construire un bâtiment, c'est faire en sorte que le rêve qui nous habite se matérialise en une réalité tangible.
En effet, dans un premier temps, l'architecte imagine, conçoit et dessine un édifice qui n'existe pas encore réellement : on ne peut pas encore l'habiter ou l'occuper.

1 Source: [NORMAN 2003]

L'édifice, une fois l'esquisse bien entamée, est ensuite présenté dans toutes ses dimensions : graphiquement sur papier, par des dessins et des textes (plans masses, élévations, coupes, perspectives, images 3D…). Sa volumétrie est présentée en maquette. *Tout est là mais rien n'est présent*[2].
A ce stade du projet, rien n'est encore palpable et perceptible par l'ensemble de nos sens. On peut seulement imaginer comment sera le bâtiment mais on ne peut pas encore le toucher, le ressentir…
Le passage de cette idée abstraite à la réalité construite et tangible est à la fois déterminé par le choix des matériaux et des procédés constructifs mais également par leur mise en œuvre.

Aujourd'hui, plus que jamais, le choix des matériaux de construction est une préoccupation majeure du monde de l'architecture et de la construction.
D'une part, l'architecture et la construction font partie intégrante d'une société «virtuelle» de plus en plus dédiée à l'image et aux impressions sensorielles. Dans ce monde «multimédia», deux tendances architecturales se confrontent: la matérialisation et la dématérialisation. Certains architectes intègrent cette politique de l'image aux réalités de la construction et proposent des façades ou des espaces aux images/surfaces multicolores, des façades «écrans», alors que d'autres architectes prônent toujours l'utilisation de matériaux «authentiques», «traditionnels» ayant une «substance» , une présence réelle et concrète comme le bois, la pierre naturelle massive, la brique, le béton...
D'autre part, les années 90 ont mis en avant de nouvelles exigences pour les bâtiments et leurs composants, à savoir les économies d'énergie ainsi que le respect de l'environnement et de la santé.

2 Source: [HEGGER 2007]



Illustration A1.01: Confrontation entre moellons de pierre et vitrage



Illustration A1.02: Façade vitrée et reflets - Munich



Illustration A1.03: Association de chaume et de vitrage - Japon
Architecte: Kengo Kuma

Les chocs pétroliers de 1973 et 1979 suscitèrent la prise de conscience du caractère non renouvelable de certaines ressources, notamment les ressources fossiles.
Parallèlement à ces chocs, les catastrophes telles que les famines en Afrique, les fuites de pesticides de l'usine de Bhopal en Inde (1984), la découverte du trou dans la couche d'ozone (1985) ou l'accident nucléaire de Tchernobyl (1986) ont participé à conscientiser l'opinion publique quant aux dangers de la pollution engendré par nos modes de fonctionnement et à la nécessité d'un changement radical dans nos rapports aux dimensions sociales, politiques, économiques et environnementales.
L'utilisation «réfléchie» des matériaux qui avait peu à peu été négligée[3] par certains est à nouveau d'actualité: le matériau de construction, sa surface, sa matière et ses propriétés intrinsèques jouent un rôle prépondérant dans l'architecture et la construction en répondant à des exigences de performances en termes de protection et de confort tout en favorisant un langage architectural et en éveillant des sensations chez l'utilisateur ou l'occupant.
Mais ce traitement réfléchi de la matière dépasse la notion d'image ou de performance énergétique: le matériau de construction doit aujourd'hui répondre à des exigences d'utilisation rationelle des ressources, d'impact sur l'environnement et d'impact sur la santé.
Ainsi, nous pouvons affirmer que trois matérialités se font face: la matérialité liée à l'image, la matérialité liée à la substance et la matérialité «soutenable»
Nous tenterons dans ce chapitre de démontrer que choisir un matériau de manière soutenable et responsable se fait en conciliant les différentes matérialités de celui-ci et en intégrant différents angles de vue de la matière.
Le premier angle de vue consiste à considérer le matériau de construction comme étant la matière qui va donner forme, vie et sens à l'architecture.
Le matériau est considéré ici comme un élément indispensable, faisant partie intégrante du projet d'architecture et donnant lieu à un langage architectural qui renseigne sur la construction, la structure, la fonction tout en éveillant des sensations. Cet angle de vue aborde la « matérialité visible » ou la matière en tant que surface avec sa texture, sa couleur… ainsi que l'effet produit par celle-ci sur l'utilisateur au travers de la vision, du toucher, du ressenti, de l'ouïe et de l'odorat.
Le deuxième angle de vue est de considérer le matériau de construction comme un élément spécifique faisant partie d'un tout mais ayant une fonction particulière. Le matériau de construction peut ainsi être défini comme un élément fonctionnel et technique mis en œuvre pour satisfaire certaines exigences liées à l'occupation.
Cet angle de vue aborde la « matérialité intrinsèque» et traite le matériau en tant que corps constitué de matière(s) ou de substance(s) qui lui confèrent certaines propriétés.
La notion de la conservation des performances et des fonctions ainsi que la durabilité des matériaux sont également abordées.
Le troisième et dernier angle de vue pose la question de l'intégration des principes du développement durable dans les critères de sélection des matériaux de construction.
Cet angle de vue aborde la « matérialité soutenable » dans le sens où le matériau de construction est remis dans un contexte environnemental, social et écono-

3 La révolution industrielle et l'avènement du chemin de fer vont entraîner un changement profond dans la relation que l'homme entretient avec les ressources naturelles depuis son origine. Ce changement va s'accentuer avec la période de croissance économique après la seconde Guerre Mondiale où l'évolution des modes de vie va entraîner une dépense énergétique croissante, non seulement dans l'habitat mais également dans les modes de fonctionnement et de déplacement.

mique global sur tout son cycle de vie.
Ces trois visions de la matière forment un « tout », définissant réellement la matérialité d'un bâtiment et qui, à cet égard, doit être pris en considération dans le choix que le concepteur effectue dans l'immense palette des matériaux disponibles.
Dans ce chapitre, nous n'aborderons pas le quatrième angle de vue qu'est la dimension imaginaire liée à la matière et aux matériaux de construction bien que celle-ci soit relativement importante en architecture et fortement liée à la matérialité visible.

1. Matérialité visible : matériau, surface et architecture

Chaque matériau, quel qu'il soit, possède une surface, définie par une texture, une structure et une couleur. Une fois mis en œuvre, chaque matérieu est en contact de par sa surface avec l'espace, l'ambiance intérieure ou extérieure et dans certains cas, l'occupant.
La surface joue un rôle déterminant dans la perception de l'architecture: c'est au travers de la surface que nous voyons, ressentons, percevons l'architecture dans sa substance. Dès que l'homme s'est mis à construire, et cela dans chaque culture, il a accordé une attention particulière aux surfaces de sa maison et de ses espaces intérieurs, en leur donnant une forme et en les décorant. Grâce à sa surface, le matériau de construction va imprégner l'espace intérieur, l'espace extérieur et/ou la façade. Les matériaux de finition intérieure, tels que les matériaux utilisés pour les revêtements de sol, de plafonds ou de murs jouent un rôle essentiel en termes de création d'ambiances ou d'atmosphères en imprégnant l'espace de manière décisive. Cet ensemble de matériaux a également la particularité d'être en contact direct avec l'occupant qui peut les voir de très près, les toucher, les sentir, les ressentir. Dans ce cas précis, les matières provenant de la nature comme le bois, la pierre, la chaux, l'argile apportent une matérialité chaleureuse et sensuelle. Des matières industrielles, plus façonnées, présenteront une matérialité plus froide, rigide, plus formelle.
Les matériaux de l'enveloppe, eux aussi, jouent un rôle important dans l'expression d'un bâtiment : un matériau, comme le verre, va ouvrir le bâtiment vers l'extérieur, le rendre léger et transparent ; un autre matériau peut, à l'inverse, lui donner une apparence fermée, massive et monolithique.
Toujours grâce à leur surface, les matériaux de construction permettent aux concepteurs d'exprimer certaines symboliques en suscitant des associations d'idées. L'exemple le plus flagrant en est les quartiers d'affaires, les immeubles de banques et assurances ou encore les bâtiments d'Etat dans lesquels la pierre naturelle, omni-



Illustration A1.04: Texture de l'acier Cor-ten - Anvers



Illustration A1.05: Textures, briques anciennes et enduit

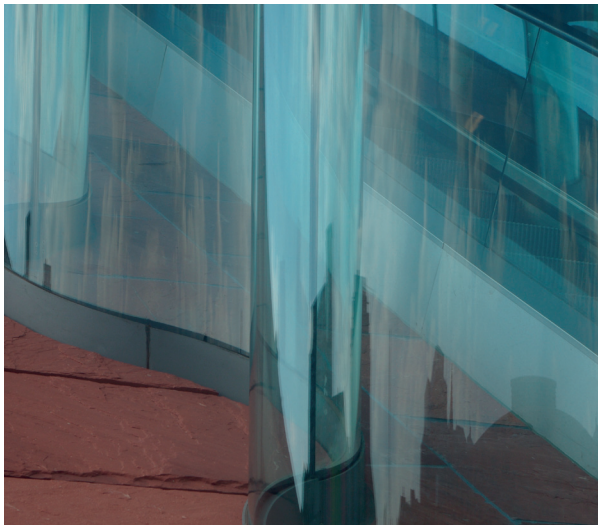


Illustration A1.06: Texture lisse et réfléchissante des vitrages



Illustration A1.07: Texture de pierre naturelle - Thermes de Vals - Architecte: Peter Zumthor - Photo: A. De Herde

présente, symbolise la solidité, la force, la richesse ou encore le pouvoir.
Qu'il s'agisse de matériaux naturels ou plastiques, transparents, translucides ou opaque, susceptibles de se modifier, de se patiner, de s'oxyder ou au contraire inertes; qu'il s'agisse de matériaux monochromes ou de teintes variées et variables, le thème de la surface en architecture connaît aujourd'hui un engouement jamais inégalé auparavant.
Partout, on observe un plaisir particulier à expérimenter, à franchir des frontières, à remettre en question des habitudes visuelles dépassées, à mettre à l'essai d'autres matériaux et concepts[4].
Cet intérêt est sans nul doute lié à la séparation croissante entre structure portante et enveloppe, mais également à la multitude de nouvelles possibilités «matérielles» et techniques (matières synthétiques, impression sur diverses matières, béton translucide...) qui s'offrent aux concepteurs.
Cet intérêt croissant pour la surface va également de pair avec l'évolution et l'importance croissante des médias dans notre société.
Certains architectes ont d'ailleurs intégré cette notion «d'image » dans leur architecture: images multicolores sérigraphiées sur verre, implantation de façades «multimédias» ou écrans rétro-éclairés...
Cette tendance se développe rapidement dans le milieu de l'architecture et cette focalisation sur la surface présente également un risque de superficialté: l'image d'un bâtiment devient parfois plus importante que le bâtiment lui-même.
D'autres architectes, au contraire, affirment leur préférence pour des matériaux authentiques ou traditionnels tels que la pierre naturelle, le béton apparent, le bois non traité, la maçonnerie en briques apparentes... comme la démonstration de la présence physique du bâtiment face à un monde de plus en plus virtuel. Cet état d'esprit est clairement illustré dans les projets des architectes Peter Zumthor ou Tadao Ando qui tous deux n'utilisent que quelques matériaux authentiques.
Avec la surface et son intérêt croissant dans le monde de l'architecture et de la construction, le matériau se retrouve dans la ligne de mire de tous les concepteurs et mis en scène, exposé à tous les regards.
Le matériau de construction, qu'il soit tradionnel ou industriel, qu'il soit mis en œuvre tel quel avec avec un traitement, va une fois mis en œuvre, imprégner les différents espaces avec sa surface et ses caractéristiques propres. C'est ainsi que le projet d'architecture prend réellement forme, génère des espaces, des ambiances, se différencie de son environnement mais avant tout, interagit avec le corps humain en éveillant des sensations.

1.1. Perception des matériaux

L'espace construit et ses surfaces deviennent la scène de l'ensemble des interactions dynamiques[5] entre l'homme, la matière et la lumière. Ces interactions influencent notre perception et constituent réellement l'architecture.
La perception des espaces et de la matière se fait au travers des matériaux, de leur surface, de leur texture, de leur couleur et de leur relation avec la lumière. Au travers de ses cinq sens, l'homme perçoit les effets produits par le matériau ou la matière. Il est stimulé par les différentes ambiances produites (lumineuses, tactiles, thermiques, auditives, olfactives…). Il reçoit un ou plusieurs stimuli, éléments déclenchant une réaction dans l'organisme.
La perception de la matière est une notion terriblement subjective, liée à l'inconscient, à la personnalité et au

4 Source: [HEGGER 2009]

5 Source: [BIRON 2008]

vécu de chacun. L'utilisation de la matière ou d'un matériau est également influencée par les traditions ou la culture architecturale locale.
L'homme aborde prioritairement l'espace, l'architecture et la matière par la vue et le regard. La perception de l'espace dépend fortement des mécanismes de perception visuelle – plus de 90% des informations reçues sont perçues par nos yeux.
Il faut également préciser que dans le choix des matériaux, la perception ou la sélection visuelle est aussi un des premiers critères à être utilisé.
La vue se base sur la transmission d'un rayonnement lumineux. Le rôle de la lumière dans la perception des espaces construits est donc primordial puisqu'elle contribue à la définition des ambiances. *En effet, sans la lumière, il n'y aurait aucune information visuelle sur l'espace et les objets qui nous entourent*[6] . C'est par la lumière, les contrastes, les jeux d'ombres que l'on perçoit clairement l'espace, les formes, les textures, les couleurs…
La capacité du matériau à répondre à ce rayonnement se traduit par la réflexion de ce rayon sur la surface de celui-ci. *L'impact visuel d'un matériau diffère selon son degré de préfabrication, sa texturisation, la taille de ses composants, leur assemblage et les autres traitements de surfaces*[7] .

Transparence

La transparence est un thème cher à l'architecture des dernières décennies par son symbole d'ouverture et de communication[8] .
La transparence de la matière, essentiellement le verre, permet de transformer, de mettre en scène la surface et l'espace en fonction de l'angle de vue, de l'heure du jour ou de la nuit et du rayonnement lumineux : la surface peut briller, refléter, dévier puis s'opacifier… les contours peuvent s'estomper, la surface se dématérialiser…
La petite fenêtre traditionnelle dans la construction en pierre ou en brique – reflet d'un souhait de protection et de sécurité – a évolué au cours des siècles tant au niveau de la taille qu'au niveau des matériaux utilisés: vitraux des églises gothiques, les serres du 19e siècle, le mur rideau, la double peau…
Des avancées technologiques de plus en plus performantes, tant sur la matière transparente ou translucide (verre, plastique…), sur les modes de fixation de plus en plus fins et légers que sur les améliorations des propriétés (thermique et transmission lumineuse) ont permis et permettent encore à tout concepteur de jouer avec cette particularité de l'architecture.

Couleur

L'influence des couleurs sur la perception de l'espace est significative: les couleurs chaudes donnent une sensation de rétrécissement de l'espace, les couleurs froides donnent la sensation d'un volume plus grand.
Les couleurs font appel à notre inconscient et nos émotions : elles nous attirent ou nous repoussent…
Les teintes – du très clair au très foncé – influent également sur la perception de l'espace : un matériau de teinte claire sera perçu en volume car l'œil humain saisit le contraste ou la différence de luminosité tandis qu'un matériau de teinte foncée sera, par manque de contraste, plutôt perçu en deux dimensions.

Taille, échelle, texture et mise en œuvre

La taille et l'échelle du matériau mais également de la surface de paroi influence l'effet produit sur l'être humain : une paroi composée de petits éléments paraîtra plus grande ; à l'inverse une paroi composée de grands éléments paraîtra plus petite.

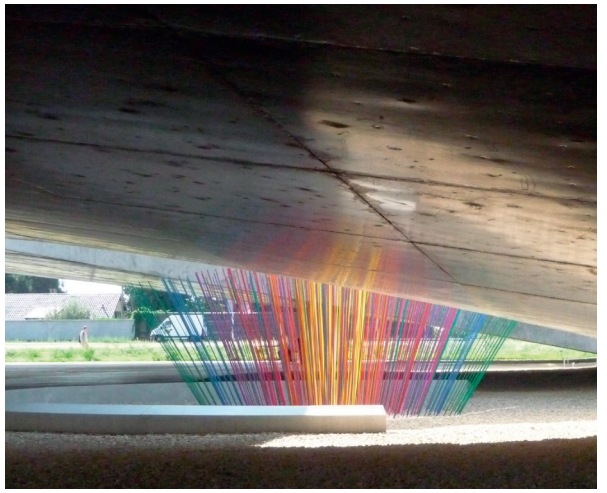


Illustration A1.08: Rolex Learning Center conçu par Sanaa, EPFL, Lausanne



Illustration A1.09: Casa Neruda - Chili - Photo: Sylvie Rouche

6 Source: [BIRON 2008]
7 Source: [HEGGER 2007]
8 Source: [HEGGER 2009]

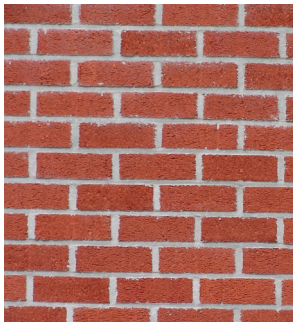
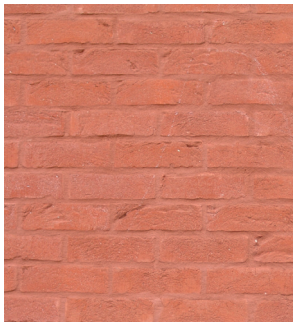



Illustration A1.10: Maçonneries de briques




Illustration A1.11: Matière rugueuse et matière lisse

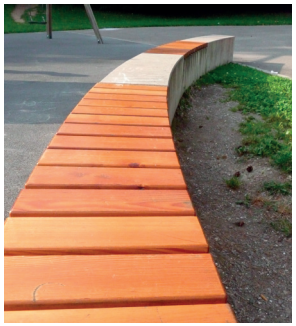



Illustration A1.12: Matière chaude et matière froide

Les différentes textures agissent également sur notre perception : les textures brillantes reflètent le rayonnement ou les images, les textures rugueuses absorbent… La mise en œuvre des matériaux peut également modifier la perception de l'espace ou de la surface. Comme l'illustrent les deux figures A1.10, la manière de mettre en œuvre le joint entre des briques de parement aura une influence sur la perception de la surface de ce parement : on perçoit plus l'élément que l'ensemble, on perçoit une masse uniforme...

Le premier regard que l'homme pose sur la matière va lui donner l'envie – ou non – de toucher, de poser sa main sur la matière, d'être en contact avec elle.
Cette envie de « toucher » va d'abord induire un mouvement : la main se tend pour toucher ou pour saisir la matière puis une sensation ou un ressenti lié aux propriétés de la matière – chaud ou froid, dur ou mou, lisse structuré ou inégal, satiné ou rugueux…
Certaines matières sont utilisées en particulier pour la sensation tactile qu'elles procureront, comme un tapis de sol moelleux dans une chambre d'hôtel, un banc en bois plutôt qu'en pierre, une main courante en bois plutôt qu'en métal…
La température de surface d'un matériau ainsi que le rayonnement et la réflexion des matières stimulent également la perception thermique de la peau. La sensation ressentie sera agréable et chaude si le matériau en contact avec la peau ou le corps n'absorbent pas la chaleur de celle-ci ou celui-ci. C'est le cas du bois, des matières végétales, des revêtements textiles… D'autres matières, comme les métaux ou la pierre polie, en absorbant la chaleur du corps humain, vont au contraire, procurer une sensation désagréable de froid[9] .

9 Il est à noter que des surfaces massives (pierre ou béton) ayant été exposées au soleil, seront perçues le soir ou la nuit comme une source de chaleur

Ce principe de perception thermique fonctionne aussi sans le toucher. En effet, l'être humain perçoit naturellement les différences de température entre l'air ambiant et les surfaces qui l'entourent, comme le montre le schéma A1.13 ci-dessous.
La perception thermique de l'être humain dépend de quatre facteurs : la vitesse de l'air, la température de l'air, la température et le rayonnement des parois et l'humidité. Ces quatre facteurs vont également fortement influencer le climat intérieur d'un bâtiment et nous verrons au chapitre suivant comment le choix et l'utilisation de certains matériaux permet d'améliorer celui-ci par la régulation de l'humidité et de la température.
Dans une moindre mesure, l'ouïe et l'odorat vont également influencer la perception de l'architecture : l'écho, la résonnance d'une cathédrale, le crissement de certaines matières sous nos pieds, l'odeur du bois, l'odeur des matériaux fraîchement mis en œuvre...
Il est important de souligner que plus un matériau sollicite l'ensemble de nos sens, plus la sensation ou le ressenti de la matière et donc de l'espace est global et complet. La persistance du souvenir qu'on en tire sera

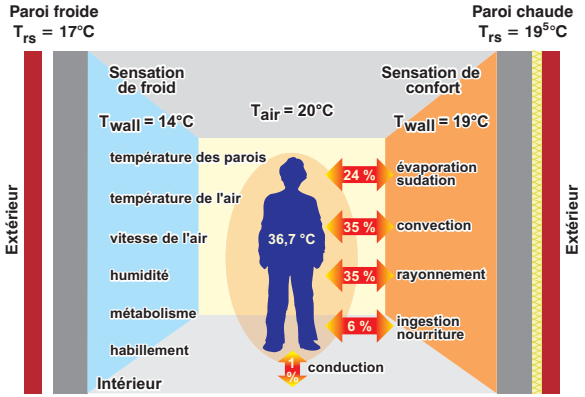


Illustration A1.13: Principes de la perception thermique de l'être humain

également favorisée par la simulation de plusieurs sens.

2. Matérialié intrinsèque: réponses aux exigences techniques de l'architecture

La plupart du temps, la définition, la sélection et la perception de la matière, des matériaux de construction ou de la matérialité d'un bâtiment se rapportent à la surface.
Or, chaque matériau de construction est composé d'une ou plusieurs substances ayant des caractéristiques spécifiques dont le reflet est justement la surface.
Ces différentes propriétés permettent aux matériaux de construction de remplir une fonction dans le bâtiment : certains auront une fonction structurelle, d'autres une fonction de protection, d'autres encore une fonction décorative…
« Chaque matériau doit remplir sa fonction en répondant à des exigences et des besoins spécifiques[10] » .
Les performances que le matériau atteint lors de son utilisation – grâce à ses qualités intrinsèques – lui confèrent une valeur d'usage.
Une fois mis en œuvre dans le bâtiment, les matériaux, répondent à trois types d'exigences : des exigences de protection contre les intempéries et les éléments climatiques défavorables ; des exigences de confort qui peuvent être définies par un bien-être ressenti tant d'un point de vue hygrothermique qu'acoustique, que visuel ou même olfactif et des exigences liées à la conservation de la fonction et de leurs performances et des exigences de sécurité.
On pourrait également rajouter une exigence qui est aujourd'hui devenue une contrainte incontournable dans le secteur de la construction: la rentabilité économique: le matériau doit remplir sa fonction, le plus longtemps possible et pour un coût minimum.
Cependant, il est important de remarquer que le coût économique qui est actuellement pris en compte est uniquement le coût d'investissement, à savoir le coût d'achat et de mise en œuvre augmenté de la TVA. Peu de commanditaires ou de concepteurs tiennent compte du coût réel des matériaux sur tout le cycle de vie, en intégrant les coûts de maintenance, d'entretien, de remplacement voire de démolition et de traitement en fin de vie.
Lorsqu'on aborde un sujet tel que les exigences de performance, il est important de préciser qu'on ne parle plus aujourd'hui de paroi « monocouche » constituée d'un matériau spécifique mais bien d'un ensemble, d'une composition ou d'une juxtaposition de plusieurs matériaux répondant chacun à certaines exigences.
Exemple :
Un mur de façade est aujourd'hui composé de plusieurs couches ayant chacune sa spécificité :
- le revêtement extérieur: protection contre le vent et les intempéries;
- les couches d'étanchéités (eau/air): protection contre la pénétration d'air et d'humidité…;
- la couche isolante: protection contre les températures extérieures extrêmes…, protection contre le bruit extérieur;
- la structure ou l'élément porteur: fonction structurelle;
- le ou les éléments de second-œuvre: régulation hygrothermique…;
- l'élément châssis/vitrage: éclairage naturel, apport solaire, liaison visuelle avec l'extérieur...

2.1. Exigences de protection

« Depuis des millénaires, l'être humain, espèce biologique vivant dans un gradient de température corporelle très étroit entre 36,5°C et 37,2°C (en deçà il tombe en léthargie, au-delà il fait de la fièvre) a dû inventer différentes peaux pour se protéger du froid et des intempéries et, à l'autre extrême, des températures et des sécheresses excessives. Ne disposant ni d'une lourde pelisse, ni d'écailles, ni de plumes, pour survivre le bipède humain a dû « s'inventer des peaux » au risque

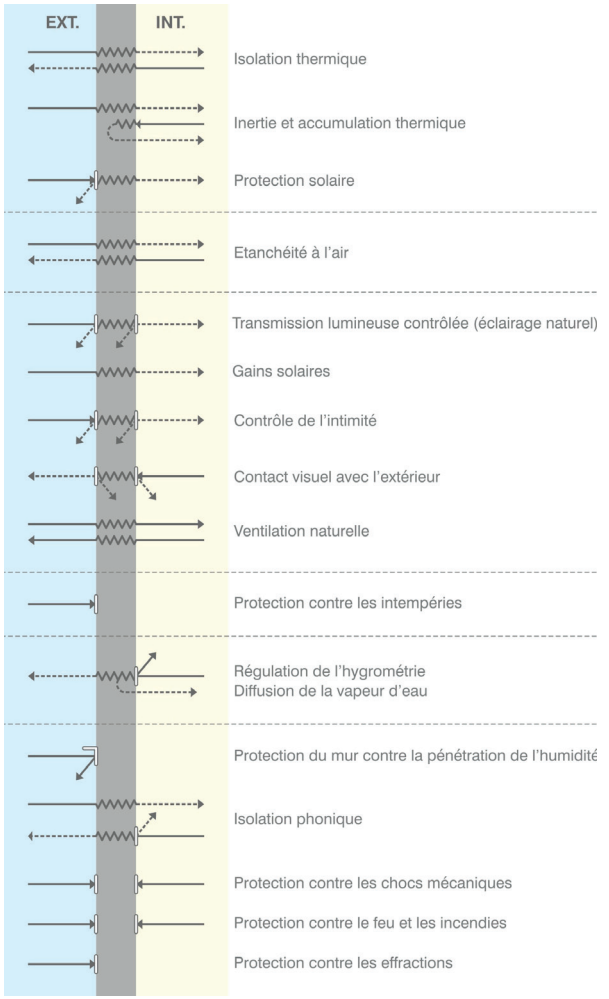


Illustration A1.14: Rôles joués par l'enveloppe du bâtiment

10 Source: [HEGGER 2007]

de ne pas survivre. Si la première de ces peaux protectrices est constituée par le vêtement, la seconde couche protectrice l'est par tous les espaces architecturaux que l'homme a conçus à travers l'histoire. *Accaparant dans un premier temps la pelisse protectrice des animaux et cherchant refuge dans les cavités naturelles, l'humain a de plus en plus développé son inventivité pour parfaire et donner forme et vie à ces deux peaux protectrices*[11].

De tout temps, les bâtiments ont rempli une fonction protectrice, contre la nature inhospitalière et la faune environnante, contre les peuples voisins mais tout particulièrement contre les intempéries et les éléments climatiques défavorables. Les premières surfaces à jouer ce rôle font partie de l'enveloppe du bâtiment, principalement les murs de façade et les toitures et dans une moindre mesure la dalle de sol. L'enveloppe, *en tant qu'interface entre l'intérieur et l'extérieur*[12] , a une importance particulière puisqu'elle doit répondre à de nombreuses exigences liées à l'occupation d'un bâtiment tout en ayant un rôle culturel et esthétique par rapport à l'espace public et à la ville.
Les performances que l'enveloppe doit atteindre aujourd'hui en termes de protection et de confort sont d'autant plus importantes que l'on tend, dans le secteur de la construction, à atteindre des standards de performances énergétiques tels que le « passishaus standard» ou le « net zero energy standard ».

Protection contre le chaud et le froid

Le bâtiment et plus particulièrement l'enveloppe de celui-ci a pour objectif premier de créer une barrière contre les températures extrêmes (trop basses ou trop élevées) selon un lieu, un climat ou une saison donnée, de manière à conserver un climat intérieur confortable caractérisé par une certaine température et humidité relative.
Il est à noter que depuis le début de l'ère industrielle, aux environs de 1860, la température intérieure dite de confort a fortement évolué. Au début du 20e siècle, on préconisait, pour des raisons d'hygiène et de confort une température intérieure tournant autour de 15°C. Cette température était atteinte principalement grâce à l'orientation des façades et au potentiel passif de l'enveloppe : parois d'épaisseur importantes, massives, espace tampon du grenier et de l'étage de service, mise en place de lambris ou tissus épais sur l'intérieur des murs…
Aujourd'hui, on préconise une température entre 20°C et 25°C (été et hiver) avec une humidité relative entre 30 et 70 %. Cette température de confort est atteinte grâce au système de chauffage central dont les habitations sont équipées depuis les années 60 mais également grâce aux propriétés de certains matériaux qui constituent la paroi.
De matériaux dits « isolants » empêchent ou limitent les pertes d'énergie du bâtiment, limitant ainsi à la fois la baisse de température des surfaces et de l'air au-delà du seuil de confort et la demande en énergie de chauffage et donc les coûts d'exploitation.
D'autres matériaux, grâce à leur masse, par effet d'accumulation thermique, régulent la température ambiante (parois et air) et l'amplitude thermique d'une pièce, limitant ainsi les pics de température ou les surchauffes.
De plus, des membranes d'étanchéité à l'air empêchent ou limitent les déperditions thermiques par ventilation (entrées ou sorties d'air par les interstices des parois) et réduisent ainsi les variations de température.
Les différences de température ont également une influence sur le comportement des matériaux. Ceux-ci, sous l'effet de la chaleur, vont réagir et se dilater. La dilatation thermique est une propriété des matériaux qui joue également un rôle important dans le choix, l'usage et la mise en œuvre[13] d'un matériau. En effet, suivant la température, le matériau de construction se rétracte – sous l'action du froid – ou se dilate – sous l'action de la chaleur. Dans le cas de la dilatation, si le matériau n'a pas la place suffisante pour se dilater, il va exercer un contact puis une contrainte ou une pression sur les matériaux adjacents. Si deux matériaux ayant une dilatation thermique différente entrent en contact, le matériau le plus fragile risque d'être endommagé.

Protection contre l'eau et l'humidité

Les matériaux soumis aux intempéries (façades et toitures) ou soumis à une humidité importante (cuisine, salle de bain) doivent être protégés contre l'humidité et/ou contre le gel.[14]
En effet, la tension superficielle relativement élevée de la molécule d'eau permet le phénomène de remontée capillaire. Il est donc important de protéger les parois verticales en contact avec l'humidité du sol en utilisant certains matériaux étanches à l'eau.
Les ponts thermiques, liés à une mise en œuvre de faible qualité ou ancienne peuvent entraîner l'apparition de condensation. Celle-ci peut influer sur le climat intérieur (formation de moisissure) et sur la durabilité des parois extérieures. Deux principes permettent d'éviter ces condensations : une isolation thermique continue et la juxtaposition de matériaux allant du moins perméable à la vapeur d'eau à l'intérieur vers le plus perméable à la vapeur à l'extérieur.

11 Source: [NORMAN 2003]
12 Source: [SCHITTICH 2005]
13 La mise en œuvre de plusieurs matériaux ayant chacun une dilatation thermique différente peut engendrer l'utilisation de joints dits de dilation : espace vide laissé entre deux matériaux pour éviter qu'ils se touchent.
14 L'eau gonflant en gelant, l'infiltration d'humidité au sein d'un matériau peut provoquer des tensions voire la destruction de celui-ci. C'est notamment le cas dans les anciennes briques de terre cuite, poreuses et gélives.

Protection contre la lumière et le soleil

Selon certaines expositions et à certains moments de l'année, l'enveloppe du bâtiment devra, grâce à des dispositifs placés au niveau des ouvertures, protéger l'occupant du rayonnement solaire trop important.
S'ils sont bien conçus, ces dispositifs de protection permettent également une protection de l'intimité de l'occupant.
Il est également important de préciser que certains matériaux résistent mal aux attaques du rayonnement solaire principalement le rayonnement ultra-violet.

Protection contre l'incendie

En cas d'incendie, l'ensemble des parois d'un bâtiment doit empêcher ou retarder la propagation du feu tout en assurant la capacité portante du bâtiment pour un temps déterminé et en contribuant à la protection et la santé des occupants.
En termes de protection d'incendie, il faut distinguer la « réaction au feu » et la « résistance au feu ». Ces notions sont codifiées au niveau national et européen de manière très réglementée. La réaction au feu est la représentation d'un matériau en tant qu'aliment du feu (combustibilité, inflammabilité). La résistance au feu est le temps durant lequel l'élément de construction joue son rôle de limitation de la propagation.

2.2. Exigences de confort

Les matériaux doivent répondre à des exigences de confort et plus particulièrement si leur surface est en contact direct avec l'utilisateur : les surfaces de sol, de mur, de plafond mais également les menuiseries (portes, fenêtres) et le mobilier.
Les matériaux participent au bien-être thermique, hygrothermique et acoustique d'un bâtiment.
Les matériaux isolants et les étanchéités limitent les pertes énergétiques d'un bâtiment et les baisses de température de surface des parois. Les matériaux dits « massifs », grâce à leur inertie thermique, régulent l'amplitude thermique d'une pièce et les matériaux dits « perspirants » régulent le taux d'humidité dans l'air…
En termes de confort acoustique, l'objectif est de limiter les émissions sonores gênantes ou désagréables : la propagation du bruit dans l'air (bruit aérien) est réduite par l'utilisation de matériaux à pores ouverts (laine de roche, laine de verre, laine végétale) qui atténuent la réverbération du bruit. Les matériaux denses limitent la transmission des bruits aériens. Les matériaux élastiques empêchent la transmission des ondes au travers des éléments structurels.
En termes de confort visuel, l'objectif est d'apporter suffisament de lumière naturelle sans toutefois provoquer de nuisances comme l'éblouissement, les reflets... En termes de confort visuel, il est également essentiel et appréciable d'offrir des vues et des perspectives vers l'extérieur.
En termes de qualité d'air intérieur, l'objectif est de limiter au maximum les émissions nocives par une utilisation réfléchie des matériaux de second-œuvre et de finition, par une mise en œuvre adéquate et également par une ventilation suffisante des espaces de vie.
La notion de « confort » est une notion subjective liée à la sensibilité (aspect psychosociologique et aspect physiologique), au métabolisme et aux activités de chaque individu.
Il est difficile de cerner cette notion sur quelques paramètres techniques même si ceux-ci permettent une première approche.

2.3. Conservation de la fonction et des performances dans le temps

Les propriétés et les performances de la plupart des matériaux de construction sont aujourd'hui testées et vérifiées en laboratoire.
Les matériaux ayant satisfait aux exigences obtiennent un agrément technique (ATG , ETA…), certificat de performance incluant une description et des caractéristiques techniques.
Toutefois, il est essentiel que les matériaux remplissent correctement leur(s) fonction(s) une fois mis en œuvre, dans l'usage quotidien du bâtiment.
La conservation des performances d'un matériau nécessite un choix adapté, tenant compte d'une part des propriétés de celui-ci et d'autre part de mesures spécifiques lors de la mise en œuvre.
Ces mesures sont souvent préconisées par le fabricant et reprises dans les fiches techniques du produit, mais également dans divers documents techniques tels que les notes d'informations techniques du CSTC (NIT).
La conservation des fonctions d'un matériau est une condition «sine qua none» au maintien dans le temps et à la durée de vie des bâtiments et des matériaux.

Entretien et maintenance

Afin de conserver leurs performances, certains matériaux de construction, une fois mis en œuvre, nécessitent un entretien ou une maintenance plus ou moins régulière.
L'entretien et la maintenance peuvent également solliciter le matériau : utilisation de produits mordants, abrasion des surfaces,… et avoir un impact important sur le coût d'exploitation du bâtiment.

Vieillissement et usure des matériaux

Certains matériaux vieillissent, changent de teinte ou de texture ou montrent des traces d'usures… C'est le cas par exemple du bois qui prend une teinte gris argent lorsqu'il est placé à l'extérieur et qu'il subit les intempéries, les métaux qui se patinent ou encore certaines pierres qui noircissent sous l'effet de la pollution.
Ces processus de vieillissement sont le reflet de l'écoulement du temps sur la matière. Ils mettent ainsi en avant le caractère « éphémère » de celle-ci. Si certains vieillissements ne sont pas acceptés, d'autres par contre sont



Illustration A1.15: Vieillissement du bois qui prend une teinte grisâtre



Illustration A1.16: Vieillissement des bétons, mise à nu des armatures

souhaités et attendus car ils conditionnent l'aspect du matériau.
Il faut également préciser que certains matériaux, comme la pierre polie ou le verre, montrent rarement un signe de vieillissement.

Durée de vie ou durabilité

Une fois mis en œuvre, les matériaux de construction doivent assurer leur(s) fonction(s) le plus longtemps possible. Sur le plan technique, cette propriété particulière est appelée « durée de vie » ou « durabilité ».
Le choix d'une durée d'utilisation courte ou longue pour un bâtiment dépend clairement de sa fonction : un pavillon d'exposition, un hall de stockage, un immeuble de bureau, un immeuble de logement, un équipement culturel…
Excepté quelques fonctions particulières, on vise aujourd'hui une durabilité élevée pour tous les matériaux de construction, hormis les matériaux de finition intérieure.
Cette exigence soulève également la question de la juxtaposition ou stratification de matériaux dans la composition actuelle de parois : la paroi n'est plus composée d'un seul matériau mais bien de couches successives de matériaux aux propriétés différentes.
Il est donc important, lors de la conception de directement faire le lien entre choix des matériaux, mise en œuvre et procédé constructif, afin de faciliter le montage et le remplacement éventuels des matériaux ou éléments à durée de vie plus courte.

2.4. Propriétés techniques des matériaux

Les matériaux de construction répondent à des exigences/performances par des propriétés ou des caractéristiques techniques. Ces caractéristiques sont un des critères décisifs dans le choix des matériaux.
Ce choix tient compte de la performance « technique » ou de la « valeur intrinsèque » au travers des paramètres physiques, mécaniques et chimiques.
Ces différents paramètres seront pris en considération au chapitre 3 « Caractéristiques des matériaux de construction ».

3. Matérialié soutenable: intégration des objectifs du développement durable dans la sélection des matériaux de construction

En 1987, en réponse à la demande des Nations-Unies de former une commission d'experts internationaux et d'analyser les détériorations de l'environnement humain et des ressources naturelles ainsi que leurs conséquences sur le plan économique et social, le Rapport Brundtland « Our common future », après avoir établi un constat alarmant de l'état à la fois de l'environnement et du développement (social, économique, culturel et politique) au niveau planétaire, de leur interdépendance et de « l'insoutenabilité » de leur évolution, a proposé une nouvelle orientation à la question de développement en le qualifiant de « soutenable ».
Depuis, la notion de développement durable ne cesse de faire parler d'elle dans tous les domaines (économique, social, politique) et dans tous les secteurs industriels, y compris dans le secteur de la construction.

3.1. Principes d'application de la définition

En 1992, la déclaration de Rio a proposé 27 principes d'application de la définition de Gro Harlem Brundtland comme conditions nécessaires au respect mutuel, présent et à venir. De ces 27 principes, cinq points essentiels sont à retenir :

Le principe d'intégration des dimensions environnementales, sociales, économiques et politiques.
Pour parvenir à un développement durable, la protection de l'environnement fait partie intégrante du processus de développement et ne peut pas être considéré séparément

Le capital environnemental comprend l'environnement, y compris la diversité biologique et les réserves de ressources naturelles épuisables et renouvelables. Le capital social comprend la santé, les capacités, les connaissances, le savoir-faire, la formation, la culture, l'expérience des populations, les rapports qu'une société propose à ses membres. Le capital économique comprend le capital financier mais également le capital physique ou matériel tels que les infrastructures techniques, les machines, les bâtiments,... Le capital politique comprend les coutumes, les lois, les différentes catégories d'organismes institutionnalisés aux différents niveaux de pouvoir.
L'architecture soutenable est donc une architecture qui possède toutes les qualités usuelles d'une architecture traditionnelle (fonctionnalité, performances, techniques,...) mais des conditions telles que ses impacts sur l'environnement, l'économie et le social sont minimisés à long terme:

- à toutes les échelles: depuis la qualité et le confort des espaces intérieurs jusqu'à l'échelle planétaire en passant par les espaces extérieurs autour du bâtiment;
- à toutes les époques: depuis l'extraction des matières premières nécessaires à la construction du bâtiment jusqu'à la démolition et au traitement des matériaux devenus « déchets ».

Le principe d'équité inter et intra générationnelle

Nous avons tous droit à un environnement sain, quantitativement et qualitativement aussi bien aujourd'hui et partout dans le monde de demain

Ce principe signifie que nous devons considérer l'ensemble et l'équilibre des quatre capitaux définis ci-dessus comme un patrimoine: on a le droit d'en hériter et donc d'en jouir équitablement au sein de notre génération, mais on a également l'obligation de le transmettre aux générations futures sans le dilapider, et mieux encore, en l'ayant enrichi.

Une architecture soutenable est une architecture qui va prendre en compte les besoins d'habitabilité d'aujourd'hui, tout en ayant la capacité de satisfaire les besoins du futur et cela sans générer de nuisances majeures pour les générations actuelles et futures .
En termes de consommation de matériaux ou de ressources, nous devrions considérer les ressources que nous utilisons non pas comme un acquis mais plutôt comme un emprunt : on nous prête une certaine quantité de matières premières, d'énergie ou d'eau à un moment donné et après usage, il y a lieu de pouvoir les rendre ou les remettre – en état d'utilisation – sans impacts sur l'environnement, l'économie ou le social.

Le principe de précaution et de reconnaissance de l'incertitude scientifique

Nous devons limiter les risques hypothétiques et/ou potentiels

Ce principe dépasse largement la notion de prévention qui se contente de limiter les risques avérés. En d'autre terme, il s'agit de penser les conséquences de nos actions; notre responsabilité cesse d'être rétrospective, elle devient prospective.
Ce principe sera plusieurs fois évoqué tout au long de ce travail. Une architecture soutenable est une architecture qui va limiter les risques tant au niveau de la santé des travailleurs et des utilisateurs qu'au niveau de l'environnement global, et cela en tenant compte des différentes phases de la vie d'un bâtiment: fabrication, mise en œuvre, vie en œuvre et élimination.

Le principe de responsabilité collective

Nous, citoyens de la terre, nous sommes tous responsables de son avenir

Ce principe affirme notre responsabilité commune et universelle vis-à-vis des enjeux du développement durable, tout en mentionnant que si cette responsabilité est universelle, elle est toutefois différenciée: les pays occidentaux ont une responsabilité plus grande face à la détérioration des capitaux environnementaux et sociaux et ils ont le capital économique et politique le plus apte à inverser les tendances.
Une architecture soutenable est une architecture qui va tenir compte des quatre dimensions citées plus haut, en tenant compte des besoins actuels et à venir, et cela sur les différentes phases du projet de construction.
Un concepteur responsable est un concepteur qui va également limiter les impacts de son projet, tant au niveau de l'environnement immédiat (biodiversité, ressources en eau,...) qu'au niveau de l'environnement général (consommation énergétique, implantation, émission de polluants…).

Le principe de participation et de bonne gouvernance

Nous devons être informés pour prendre position et d'agir en connaissance de cause. L'accès à l'éducation et l'information est cruciale.

La participation des citoyens (re)localise les décisions à l'échelle du milieu dont ils deviennent ainsi les acteurs. Elle facilite la prise en compte des particularités locales; elle permet l'appropriation de choix devenus collectifs; elle garantit la pluralité des solutions et des points de vue. L'architecture soutenable ne peut fonctionner sans la conscientisation et la participation active de ses occupants.

3.2. Une définition de l'architecture soutenable

Nous n'avons pas la prétention de donner **LA définition** de l'architecture soutenable. Cependant, en intégrant les cinq grands principes du développement durable décrits ci-dessus, on peut s'en rapprocher en qualifiant l'architecture soutenable comme étant:

Une architecture bénéficiant des avantages de son milieu, de tous ses milieux.

Il s'agit des milieux climatique (orientation, gains so-

laires, ventilation, ombrage...), géologique (terre, sols, altitudes...), hydrique (ressources, traitement, distribution, conservation...), végétal (arbres, cultures...), institutionnel (modes de vivre ensemble), infrastructurel (réseaux...), technologique (technologies, matériaux...), programmatique (mixité sociale, mixité fonctionnelle...), patrimonial (bâtiments, paysages...).

Une architecture protégeant ses occupants des agressions du milieu dans lequel elle s'implante

Il s'agit de se protéger du froid, du chaud, de la pluie, du bruit, de la pollution, du risque d'inondation mais aussi de l'insécurité, du manque d'eau potable, du mono-générationnel, du monofonctionnel, du manque de transport en commun, des matériaux nuisibles...

Une architecture apportant des améliorations durables à l'environnement dans lequel elle s'insère

Construire un bâtiment qui, s'il devait disparaître, ne ferait rien perdre à l'environnement dans lequel il se trouve, n'est pas un bâtiment durable. Ainsi l'architecture doit s'inscrire dans un triple horizon d'un passé dont elle hérite, d'un présent qu'elle construit et d'un futur qu'elle transmet.

Une architecture protègeant le milieu environnant de ses propres nuisances

Il s'agit des pollutions atmosphériques et hydriques liées à la fabrication des matériaux constitutifs, de la production de déchets (domestiques, démolition,…), des nuisances sonores... du trafic supplémentaire, de l'imperméabilisation du sol, des matières écotoxiques...

Une architecture protégeant de ses propres nuisances le milieu dans lequel elle s'intègre

Il s'agit des pollutions atmosphériques et hydriques liées à la fabrication des matériaux constitutifs, de la production de déchets (domestiques, démolition,…), des nuisances sonores... du trafic supplémentaire, de l'imperméabilisation du sol...

L'intégration de la notion de développement durable au sein du secteur de la construction est aujourd'hui d'autant plus importante que le bilan actuel du secteur de la construction en Europe est loin d'être réjouissant.
En effet, ce secteur d'activité est responsable de 50 % du total des ressources naturelles exploitées; de 45 % de la consommation totale d'énergie; de 40 % des déchets produits; de 30 % des émissions de gaz à effet de serre et de 16 % de la consommation totale en eau[15] .
Suivant les principes du développement durable et la définition donnée ci-avant, l'architecture, pour être soutenable, doit mettre en application des priorités en termes de qualité de vie et de confort, de consommation de ressources (énergie, matières premières, eau), de consommation d'espaces et de territoire et de production de déchets.
Les matériaux de construction doivent donc remplir leur fonction en satisfaisant à deux exigences supplémentaires : le respect de l'environnement et le respect de la santé des êtres humains – tant l'occupant que l'ouvrier du secteur de la construction.

Choisir un matériau de construction en respectant l'environnement et la santé signifie concrètement:

- tenir compte d'un bilan environnemental de celui-ci sur toute sa durée de vie;
- tenir compte d'une consommation parcimonieuse des ressources au sens large;
- tenir compte du devenir en fin de vie en privilégiant le recyclage;
- tenir compte des nuisances environnementales (pollution, dégradation de l'écosphère…);
- tenir compte du caractère inoffensif et/ou hygiénique du matériau en privilégiant le principe de précaution[16].

15 Source: [LIEBARD 2005]

16 Les effets sur la santé des matériaux à risque (comme l'amiante) sont souvent perçus et redoutés longtemps avant d'être prouvés scientifiquement.

Architecture et matériaux de construction au fil de l'Histoire, bref aperçu

« Le milieu du XX siècle a ouvert l'ère des matériaux nouveaux. Une prolifération qui bouscule le vieux monde prospère de la matière. Chaque société et chaque époque ont incarné dans une matière une image dominante : le Moyen Age a exprimé son éternité dans la pierre, les Modernes, leur dépassement dans l'acier, le monde contemporain semble avoir affolé la boussole et provoqué une frénésie de matériaux dits nouveaux. Pourtant à y regarder de plus près, la matière demeure la matière. Nous composons toujours avec les mêmes atomes, ceux-là que Mendeleïev avait recensés dans son toujours célèbre tableau périodique des éléments. La matière ainsi décrite semblait être un ensemble fini, mais c'est aussi de ce tableau d'atomes rassemblés à la manière d'un meccano que l'on attiré par combinatoires le nouveau monde infini de matériaux de plus en plus performants. »
Source : [KULA 2009]

Au cours de l'histoire de l'architecture, les matériaux et les techniques de construction utilisés par l'homme ont été sans cesse améliorés, corrigés, perfectionnés.
Si aujourd'hui tout concepteur est face à une immense palette de matériaux et d'éléments de construction, ce phénomène d' « hyper-choix » n'a pas toujours existé.
Au contraire, durant des millénaires et jusqu'au début du 19e siècle, il y a eu de grandes constances dans l'utilisation et l'exploitation des matériaux avec une seule règle de sélection: construire avec ce qui se trouve sous ses pieds ou à portée de main, construire avec ce que la nature et l'environnement immédiat, son sol et son sous-sol offrent comme matières premières.
Jusqu'à la fin du 18e siècle, l'architecture est dépendante des matériaux offerts par la nature. Les constructions sont en bois, en argile et en pierre. La forme architectonique est imposée par les propriétés des matériaux et par la force limitée de l'homme. La pierre et l'argile ne peuvent être soumises qu'à la compression, l'architecture est dominée par les murs massifs.[17]
Ce n'est que très récemment, dans l'histoire de l'humanité, que l'homme s'est mis à « fabriquer » des matières et que sont ainsi apparues de nombreuses innovations sur le marché des matériaux de construction.
L'objectif de ce chapitre n'est pas de retracer en détail l'histoire de l'architecture, des différentes époques ou courants ainsi que leurs constructions « phares », mais plutôt de présenter graphiquement l'évolution de l'utilisation des matériaux et des techniques constructives mises au point par l'homme.
L'objectif est également de comprendre et mettre en avant les causes ou les facteurs qui ont permis une telle évolution/prolifération des matériaux de construction.
Et enfin essayer de comprendre l'engouement actuel pour les matériaux traditionnels tels que la chaux, l'argile ou certains isolants à base de fibres végétales.

17 Source: [SCHITTICH 2001]

L'évolution des matériaux et des techniques constructives sera présentée sous forme graphique au moyen d'une ligne du temps.
Cette ligne du temps débute vers 10 000 ans av JC., au début de l'agriculture et de la sédentarisation et se prolonge jusqu'à aujourd'hui, à travers les grandes civilisations qui ont marqué l'Europe.

1. Pourquoi la sédentarisation comme date de départ?

Vers 10 000 av. J.C naissent les prémices de l'agriculture. Le développement de l'agriculture, dans les plaines et delta des grands fleuves (Nil, Tigre, Euphrate) va entraîner une nouvelle organisation de l'espace et de l'activité humaine, donnant lieu d'abord à un habitat permanent et solide et ensuite au développement de villes et des premières grandes civilisations.
C'est en effet à partir de 10 000 av J.C que débute l'holocène, période caractérisée par un ensemble de phénomènes climatiques qui ont permis, d'une part, le développement d'une faune et d'une flore adaptées à l'agriculture et l'élevage et, d'autre part, le développement des cycles biogéochimiques[18] qui sont à la base de la régulation du système terrestre.

1.1. Quelques rappels historiques

L'étude des fossiles montrent que l'Homo sapiens moderne apparaît en Afrique il y a quelque 200 000 ans, après une longue période d'évolution. Cette époque appelée Paléolithique, est caractérisée par le développement du langage et la généralisation des rites mortuaires et des sépultures.
Les hommes de cette époque se parent d'objets divers pour rehausser leur apparence. Ils vivent de chasse et de cueillette et sont en général nomades. Leurs habitats sont donc démontables et transportables car ces

18 Voir partie B, chapitre 3

hommes parcourent de grands territoires à la recherche de nourriture. Les matériaux qui les constituent sont formés par un assemblage d'os, de branchages, de boue et de peaux. Ces matériaux dits « naturels » proviennent d'organismes vivants (faune et flore) issus de l'environnement immédiat et local.
À la fin de la dernière glaciation, il y a quelque 12 000 ans, l'homme est installé dans la quasi-totalité des zones non gelées du monde.
L'apparition de la sédentarisation, il y a environ 10 000 ans, pendant la période du Néolithique, va sensiblement modifier la vie humaine. Cette période est caractérisée par une diminution progressive de l'importance de la chasse, de la cueillette et de la pêche au profit de la production de nourriture par l'agriculture et l'élevage et par le début du travail des métaux.
Le développement de l'agriculture débute chez les Sumériens[19], vers 9500 av. J.C. En 7000, la pratique est répandue dans la vallée de l'Indus ; en 6000, en Égypte; en 5000, en Chine.
Le développement de l'agriculture va avoir des implications non seulement sur le mode de construction mais plus encore sur le développement de civilisations.
Des constructions « permanentes » apparaissent, en torchis et en pierre, remplaçant les huttes de peaux des chasseurs-cueilleurs.
Quand ces constructions se regroupent, naît alors le village. L'une des plus anciennes agglomérations est celle de Jéricho : les premières constructions de pierre y sont datées d'environ 9 000 ans av. J.-C.
Le développement des villes débouche à terme sur ce qu'on appelle la civilisation. Les premières sont :

- la civilisation sumérienne dans la vallée du Tigre et de l'Euphrate (vers 3500 av. J.C.);
- la civilisation égyptienne (vers 3300 av. J.C.) dans la vallée du Nil;
- la civilisation de la vallée de l'Indus (vers 3300 av. J.C.).

Le rapprochement entre ces grands fleuves et ces civilisations n'est pas anodin. En effet, le sol des vallées de ces grands fleuves est constitué de terres riches et naturellement irriguées, propices au dévelopement de l'agriculture. Le sol de ces vallées est également constitué d'argile et de glaise en abondance, matériaux facile à mettre en œuvre.
Une civilisation est caractérisée par:

- cinq critères primaires (organisation): la sédentarisation des populations et la présence de ville(s), la spécialisation du travail à temps plein, le stockage du surplus de production (agriculture), la structure sociale (hiérarchie/classes) et l'organisation étatique;
- cinq critères secondaires (réalisations): les travaux publics et monuments, le commerce à longue distance, le développement de l'Art, le développement de l'écriture, les connaissances scientifiques (médecine, arithmétique, géométrie, astronomie…)

1.2. Les grandes civilisations

La ligne du temps reprend les civilisations qui ont influencé le développement du continent européen c.-à-d. les civilisations de Mésopotamie, les civilisations égyptienne, égéenne et grecque ainsi que la civilisation romaine.
Les premières civilisations se développent dans le Croissant fertile, région qui comprend les territoires des États actuels du Liban, de Chypre, du Koweït, d'Israël, de Palestine ainsi que des parties de la Jordanie, de la Syrie, de l'Irak, de l'Iran, de l'Égypte et le sud-est de la Turquie.
Cette région est naturellement fertile grâce à la présence de plusieurs grands fleuves: le Tigre l'Euphrate, le Nil e le Jourdain. La fertilité naturelle de la région a été grandement augmentée par les travaux d'irrigation développés par les premières civilisations. Autre facteur de développement: le Croissant fertile était l'habitat de quatre des cinq plus importantes espèces d'animaux domestiqués: la vache, la chèvre, le mouton, et le porc, et a probablement été le foyer de leur domestication. La cinquième espèce, le cheval, vivait à proximité.
Cette région permit donc le développement de l'agriculture de céréales et de l'élévage.
Les rendements de ceux-ci étant bons, les premières civilisations dégagèrent des surplus alimentaires et grâce à ceux-ci, purent poser les bases d'une société ayant des activités séparées, libérées des contraintes alimentaires.
La métallurgie se développa et la maîtrise du métal permit la fabrication d'armes. Les guerriers purent ainsi envahir les peuplades voisines et capturer des esclaves et des terres.
Le rendement agricole augmenta ce qui permit de complexifier encore plus l'organisation de la civilisation.
Dans ces premiers millénaires est également apparue la religion. Les prêtres qui n'étaient plus attachés aux contraintes alimentaires purent consacrer beaucoup de temps à l'observation du ciel et ils purent mieux prédire le moment des semailles.
Parallèlement à l'observation du ciel les hommes ont développé les mathématiques et l'écriture qui améliorèrent la transmission du savoir.

1.3. Les grandes civilisations et les matériaux de construction

Sans être exhaustifs, nous passerons rapidement en revue les principaux matériaux de construction utilisés

19 Sumériens: Sumer est une civilisation et une région historique située dans le sud de l'Irak, la Mésopotamie. Elle a duré de la fin du VIe millénaire av. J.-C.) jusqu'à la montée de Babylone au début du IIe millénaire av. J.-C. Sumer constitue la première civilisation véritablement urbaine et marque la fin de la Préhistoire au Moyen-Orient. Source: Wikipédia

par les différentes civilisations.

- la civilisation sumérienne utilisait principalement la terre crue sous forme de briques dont la mise en œuvre se faisait sans mortier ni ciment. Les maçons remplissaient les joints avec du bitume, de la paille, des roseaux et du foin.
  Les bâtiments en brique crue se détérioraient inévitablement, ce qui entraînait la démolition des bâtiments et le nivellement des débris sur le sol avant la reconstruction au même endroit. Ces reconstructions incessantes ont graduellement élevé le niveau du sol des villes qui se sont alors progressivement élevées au-dessus des plaines environnantes. Ce phénomène a eu pour résultat la formation de petites collines, appelées « tels », que l'on trouve à travers tout le Proche-Orient. Parmi leur réalisations architecturales, on trouve notamment les ziggourats, hauts bâtiments en briques crues mais dont certains éléments structurels sont réalisés en terre cuite (escaliers, sols, pilastres...)
- la civilisation égyptienne utilisait la pierre (grès, calcaire, albâtre, granit rose...) pour la construction des temples et pour certains éléments des constructions citadines (seuils, base de colonne...). Parfois, les Égyptiens se servaient de briques de terre crue séchées au soleil, mais seulement pour les constructions de moindre importance. Le bois (cèdre, acacia, sycomore) et le métal (électrum, bronze, cuivre) n'étaient guère utilisés que pour les portes des grands temples. Le bois servait également avec la brique à construire les kiosques et les habitations de campagne. Des troncs de dattiers et de crucifères étaient quelquefois, pour leur donner plus de solidité, disposés dans l'épaisseur des larges murailles de briques servant de parois aux forteresses ou d'enceintes aux cités
  Les Égyptiens ont été les premiers à utiliser des colonnes et les piliers. La plupart de leurs constructions étaient en toiture plate, soutenues par des colonnes. La plupart du temps, ces colonnes étaient gravées ; elles racontaient une histoire.
- C'est à la civilisation mycénienne que les Grecs empruntèrent la forme du temple dérivé du megaron (entrée et porches). C'est au début du VIIe siècle av. J.-C. que furent bâtis les premiers temples, constructions faites en brique, d'argile et de poutres en bois, posées sur des soubassements en pierre et coiffées de toitures plates recouvertes de chaume.
  Lorsque la pierre remplaça l'argile et le bois, l'architecture grecque devint originale. Profitant de la solidité de ce matériau, les architectes soucieux de la symétrie et de l'harmonie, firent reposer le toit des temples sur des colonnes. Au long de l'histoire de la Grèce, trois ordres; l'ordre dorique, l'ordre ionique et l'ordre corinthien, caractériseront l'ensemble formé par les colonnes, l'entablement et le fronton.
  Le marbre était un matériau assez cher en Grèce. Il était utilisé pour les sculptures décoratives, mais pas pour les structures, à l'exception des grands bâtiments de l'ère classique.
  Les Grecs couvraient leurs bâtiments avec des poutres en bois couvertes de tuiles de terre cuite.
- le Livre II «techniques d'édifications et matériaux, origine de l'architecture» du traité d'architecture de Vitruve décrit de manière assez détaillée les différents matériaux de construction ainsi que les techniques constructives utilisés par la civilisation romaine: sable, chaux, pouzzolane, pierres, briques de terre crue et terre cuite et bois. Cette civilisation développa également de nombreuses techniques de construction. Tout d'abord, l'héritage grec et l'héritage étrusque les ont naturellement conduits à utiliser la pierre de taille employée à sec, sans «ciment». L'assemblage des blocs taillés dans le tuf, soit régulièrement (opus quadratum) soit irrégulièrement (opus siliceum) était réalisé par des tenons, des agrafes, des crampons scellés, en métal.
  Lorsque ces blocs étaient de grande taille et donc d'un grand poids, l'emploi des tenons ne s'avérait pas nécessaire.
  L'essor de la construction romaine a été consécutif à une découverte technique, mise au point dès le 2ème siècle av. J.-C., l'opus caementicum, c'est à dire l'appareillage à base de ciment assurant le blocage parfait et définitif des blocs entre eux.
  La maçonnerie consistait, pour l'élévation des murs, à construire un coffrage en planches à l'intérieur duquel on coulait le mortier, alternativement avec des couches de pierres de rebut, des éclats inutilisables, répandus à l'aide d'une pelle, jusqu'à la hauteur nécessaire. La méthode était particulièrement efficace mais également économique, puisque l'on pouvait se contenter de pierrailles et rapide. Une fois édifié, le mur devait recevoir son revêtement. On employait, pour ce faire, les moellons ou les briques, suivant les époques. Les deux types d'appareillages par moellons étaient l'opus incertum, jusqu'au 2ème siècle av. J.-C. qui assemblait de petits moellons irréguliers posés un à un et l'opus réticulatum, notamment sous Auguste, à partir du milieu du 1er siècle av.J.-C. qui utilisait des petits blocs réguliers imitant les mailles d'un filet formant un quadrillage.
  Un autre type d'appareillage, l'opus latericium utilisé ensuite, était constitué de briques, faciles à manipuler, sur lesquelles les enduits tenaient aisément ainsi que les moulages décoratifs.
  La brique cuite, fut alors le matériau le plus employé mais sous l'empereur Auguste, l'emploi du marbre comme matériau de parement pour les façades des temples changea la physionomie de Rome.Les Romains ont également développé la technique de l'arche et de la voûte en berceau qui permit de renoncer progressivement aux charpentes en bois, non seulement coûteuses, mais de plus, propagatrices d'incendies.

2. Les lignes du temps

Les grandes familles de matériaux reprises dans ces lignes du temps sont le bois (et ses dérivés), la pierre naturelle, la terre crue et la terre cuite, les métaux (essentiellement fonte, fer, acier et aluminium), le béton, le verre et les plastiques.
Chaque famille est représentée par une couleur. L'évolution dans le temps de chaque famille de matériaux, tant au niveau des découvertes que des avancées techniques sont présentées sur deux lignes du temps :

2.1. Une ligne du temps générale

Une ligne du temps générale reprenant une période allant de 10 000 av. J.C jusqu'à 2000 ap.J.C.
Celle-ci reprend les civilisations décrites au point 1.2. ainsi que les différentes périodes (Moyen Âge, Epoque Moderne...), les différents Âges: Âge de la pierre, du cuivre, du bronze et du fer, ainsi qu'une dernière période appelée «Âge du pétrole» car caractérisée par l'utilisation des combustibles fossiles ainsi qu'une courbe d'évolution de la population.

2.2. Une dilatation allant de 1800 à 2000 ap. J.C

Une dilatation de la première ligne du temps, allant de 1800 à 2000, s'est avérée nécessaire vu le développement fulgurant des technologies et des découvertes scientifiques durant ces deux derniers siècles.
Cette dilatation reprend, en outre, cinq différentes courbes d'évolution:

- l'évolution de la population mondiale, réalisée sur base de la synthèse du Bureau du recensement des États-Unis[20] pour la période allant de -10000 à 1940 et et pour les années antérieures sur les données de l'Organisation des Nations Unies[21];
- l'évolution de la consommation mondiale en combustibles, réalisée sur base d'informations récoltées sur les sites de l'Agence Internationnale à l'Energie[22], de l'Organisation des Nations Unies et de Jean-Marc Jancovici[23];
- l'évolution de la consommation mondiale en eau, réalisée sur base des graphiques de l'Atlas Mondial de l'Eau[24] (Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE)
- l'évolution de la production mondiale de ciment depuis 1913, réalisée par le CEMBureau - World Cement Market;
- l'évolution de la production mondiale d'acier depuis 1950, selon les chiffres de l'International Iron and Steel Institute.

Ces cinq courbes sont significatives car elles sont le reflet du développement démograpique et industriel de ces deux derniers siècles.

Extrapolation de la courbe de consommation des matériaux de construction

Sur base des courbes d'évolution de la population, de la consommation mondiale en combustibles et en eau, ainsi que de l'évolution de la production de ciment et d'acier, nous avons extrapolé une dernière courbe de consommation des matériaux de construction. Cette extrapolation s'est également basée sur les graphes repris dans le rapport européen The European Environment, State and outlook 2010, Material resource and waste.
Cette courbe d'évolution suit la même tendance que les autres courbes même si à partir de 1800, celle-ci est supérieure à celles de la consommation en combustibles et en eau et ce pour les raisons suivantes:

- la population, en pleine croissance démographique, doit répondre à un besoin en logements;
- les industries en plein développement doivent répondre à un besoin en infrastructure;
- le transport «longue distance» augmente sensiblement; de nouveaux matériaux sont accessibles et cette accessibilité crée une demande.

Les périodes de guerre vont entraîner d'importantes démolitions dans les villes européennes et ont ainsi provoqué un besoin massif en reconstruction et en matériaux de construction. L'augmentation la plus importante se situe après la seconde guerre mondiale, dans les années 50 qui marquent également un changement de mentalités et le début de l'ère de la consommation.
Ce besoin en matériaux, en énergie et en eau se matérialise par un

Non-exhaustivité des lignes du temps

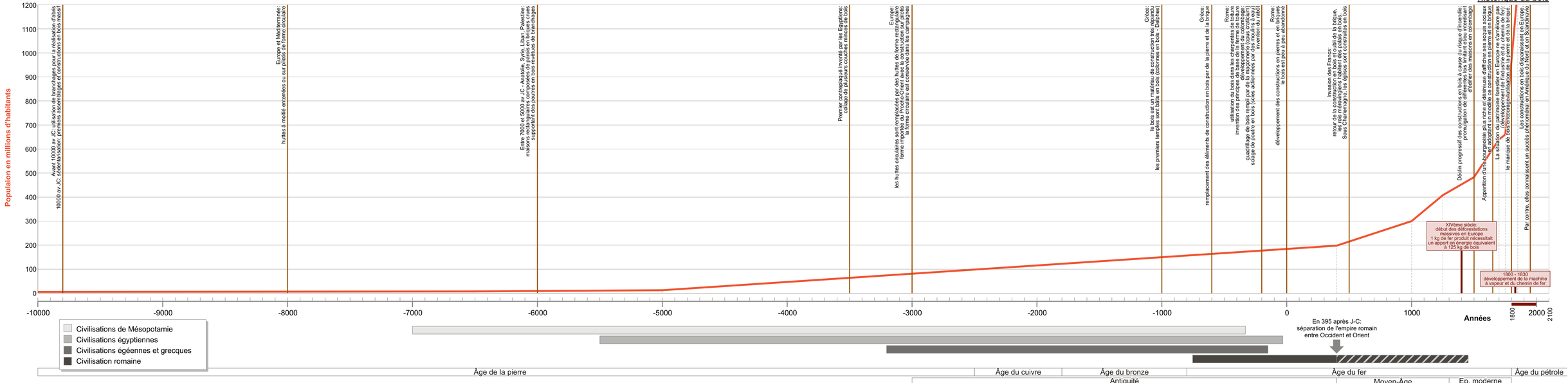
Ces lignes du temps ne se veulent pas exhaustives. La recherche d'informations concernant l'évolution des produits de construction, des matériaux et des technologies associées est une recherche complexe. Les informations relatives à l'historique des matériaux sont fortement dispersées: ouvrages historiques sur les civilisations, ouvrages spécifiques à certains matériaux, ouvrages sur les pratiques constructives...
C'est pourquoi il faut considérer ces ligne du temps comme une première ébauche et non pas comme un travail complet et fini.

2.3. Compilation des différentes lignes du temps

Une dernière ligne du temps ainsi qu'une dernière compilation «1800-2000», présentées ci-après par les illustrations A3.13 et A3.14, reprennent l'ensemble des informations récoltées pour toutes les grandes familles de matériaux.
Elles permettent de mettre en évidence, les périodes d'évolution technologique mais également les périodes de déclin technologique ou industriel.

20 Source: Historical Estimates of World Population, Bureau du recensement des États-Unis, 16 juillet 2007.
21 Source: ONU - www.un.org/fr
22 Source: Agence Internationale à l'Energie - www.iea.org
23 Source : www.manicore.com
24 Source: http://www.vitalgraphics.at.rezo.net/

Historique du bois



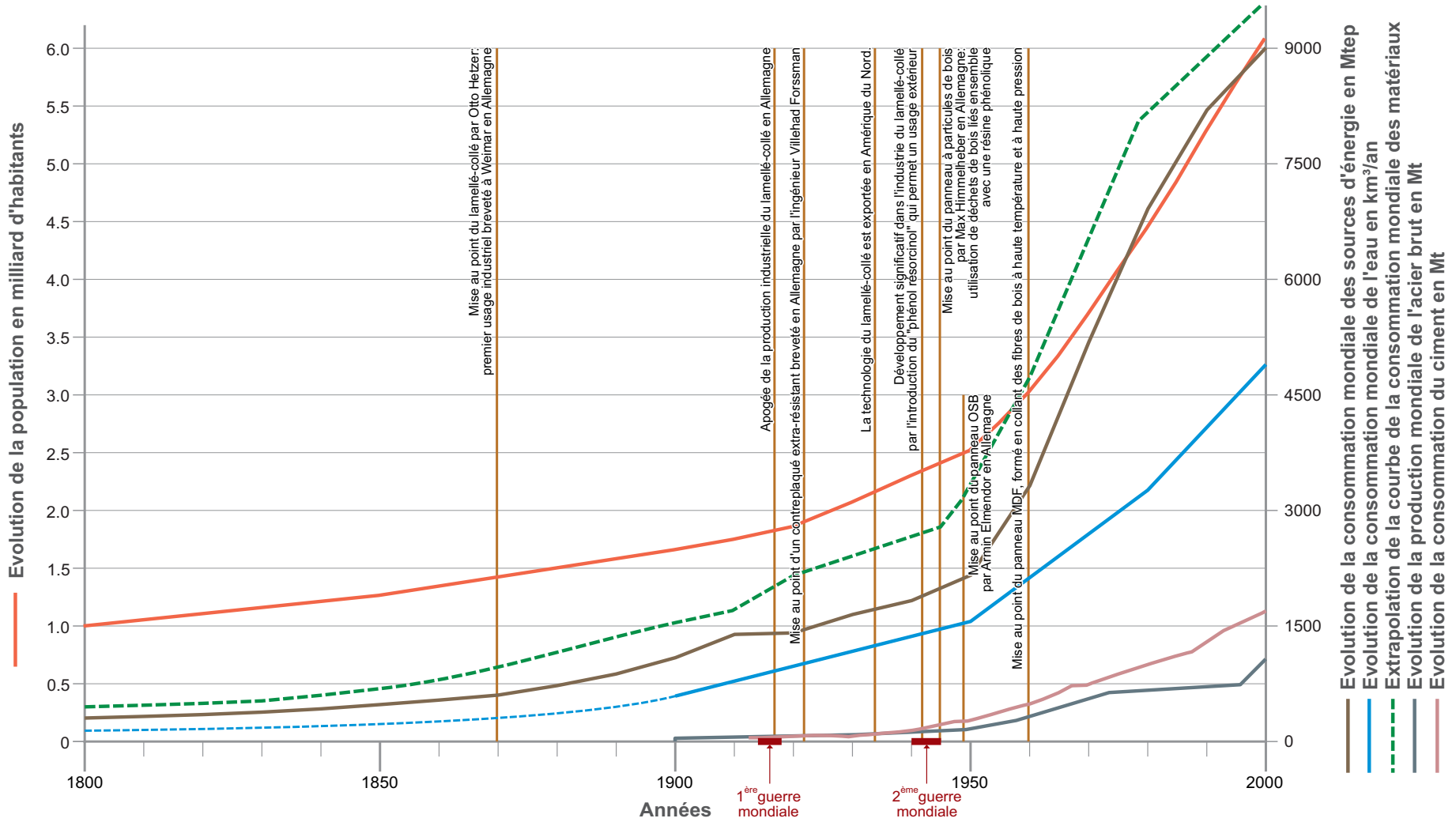
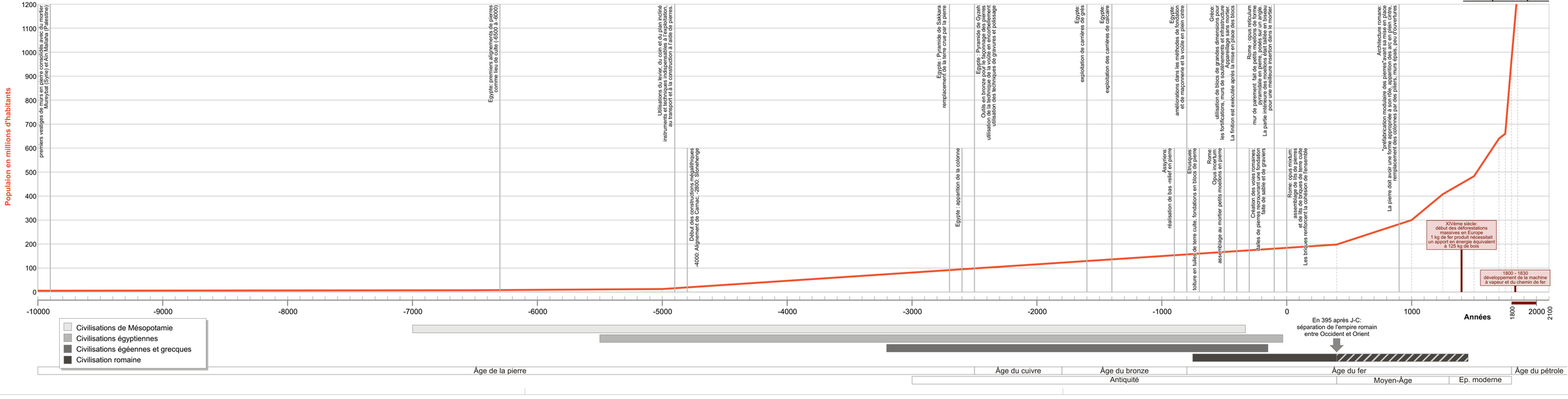
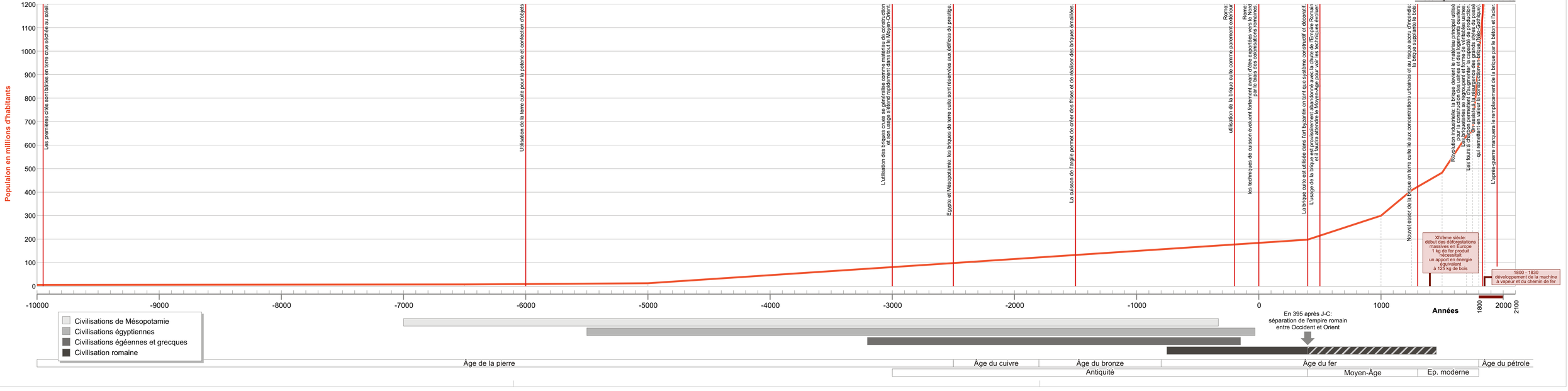


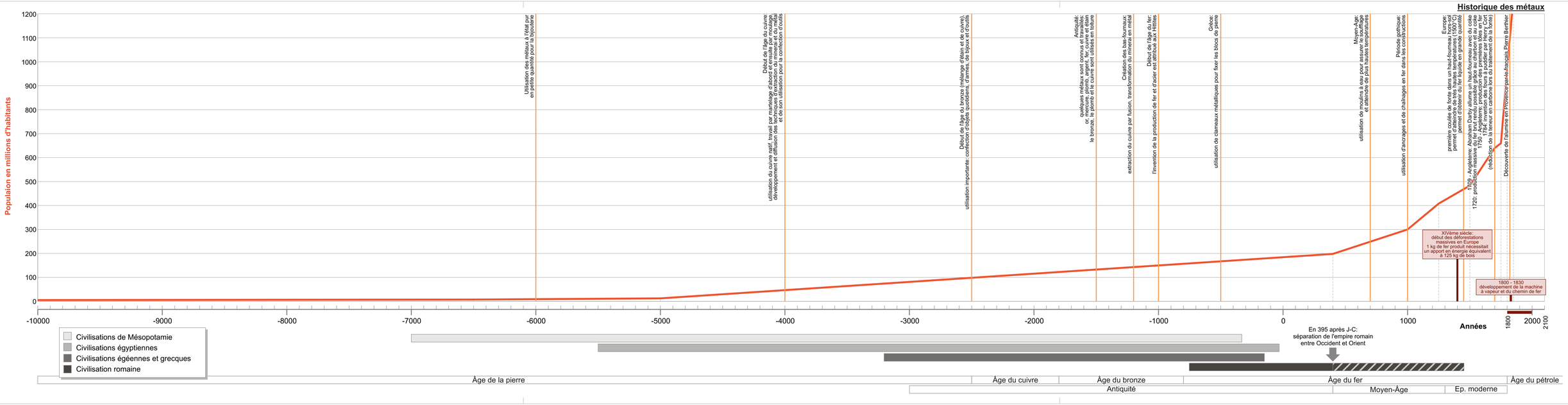
Illustration A2.2: Ligne du temps - matériau bois - dilatation 1800/2000

Historique de la pierre



Historique de la terre cuite




Historique des métaux
Populaion en millions d'habitants
1200
1100
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
-10000
-9000
-8000
-7000
-6000
-5000
-4000
-3000
-2000
-1000
0
1000
1800
2000
2100
Années
Utilisation des métaux à l'état pur en petite quantité pour l'époque
Début de l'âge du cuivre: utilisation du cuivre natif, travail par martelage, d'abord à froid puis à chaud, puis par moulage. Cette période correspond au développement et diffusion des techniques de métallurgie et de son utilisation pour la confection d'outils
Début de l'âge du bronze (mélange d'étain et de cuivre): utilisation importante: confection d'objets quotidiens, d'armes, de bijoux et d'outils
Antiquité: quelques métaux sont connus et utilisés: or, mercure, plomb, argent, fer, cuivre et étain. le bronze, le plomb et le cuivre sont utilisés en toiture
Création des bas-fourneaux: extraction du cuivre par fusion, transformation du minerai en métal
Début de l'âge du fer: l'invention de la production de fer et d'acier est attribué aux Hittites
Grèce: utilisation de clameaux métalliques pour fixer les blocs de pierre
Moyen-Age: utilisation de moulins à eau pour assurer le soufflage et atteindre des plus hautes températures
Période gothique: utilisation d'ancrages et de chaînages en fer dans les constructions
Europe: première coulée de fonte dans un haut-fourneau avec du coke permet d'atteindre de très hautes températures (1500° C) permet d'obtenir du fer liquide en grande quantité
1709 - Angleterre: Abraham Darby allume un haut-fourneau avec du coke
1720: production massive du fer commence grâce au procédé de Darby
1750 - Angleterre: production des premières tôles en fer
1784 - Angleterre: Henry Cort crée un four à puddler et un laminoir (redécoupe de la teneur en carbone, lors du traitement de la fonte)
Découverte de l'alumine en Provence par le français Pierre Berthier
XIVème siècle: début des déforestations massives en Europe
1 kg de fer produit nécessitait un apport en énergie équivalent à 125 kg de bois
1800 - 1830 développement de la machine à vapeur et du chemin de fer
Civilisations de Mésopotamie
Civilisations égyptiennes
Civilisations égéennes et grecques
Civilisation romaine
En 395 après J-C: séparation de l'empire romain entre Occident et Orient
Âge de la pierre
Âge du cuivre
Âge du bronze
Âge du fer
Âge du pétrole
Antiquité
Moyen-Âge
Ep. moderne

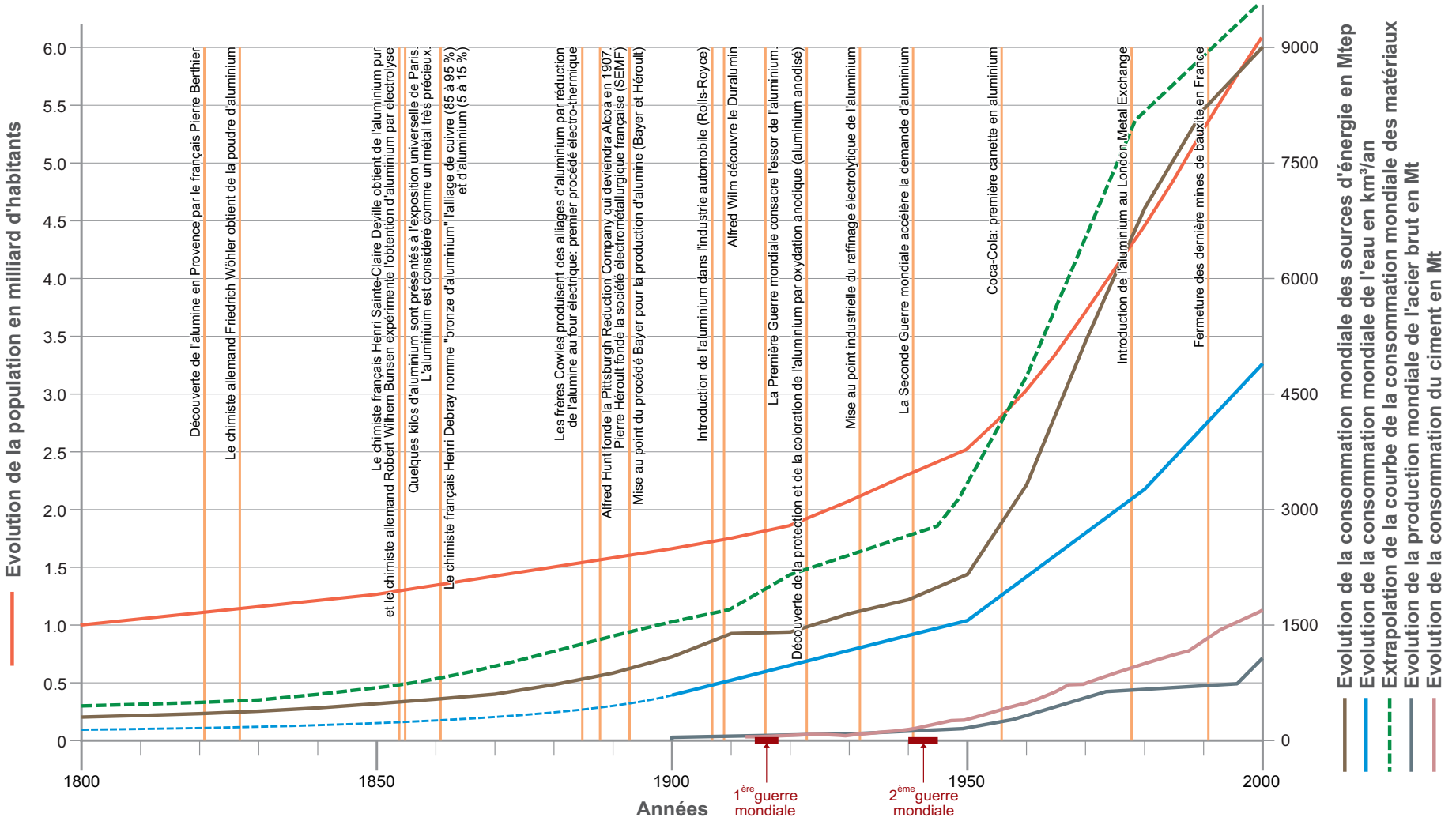
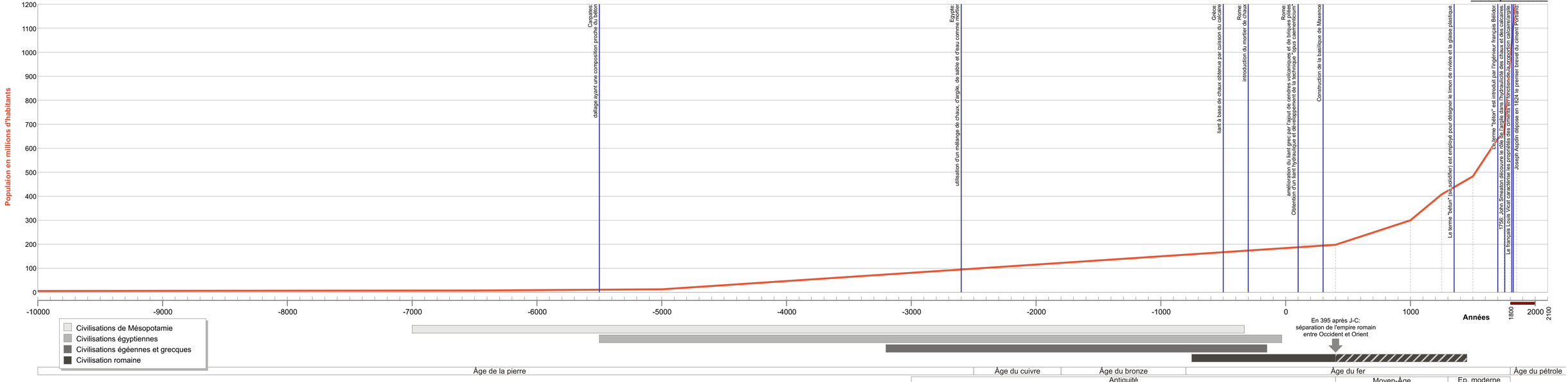


Illustration A2.6: Ligne du temps - matériau métal - dilatation 1800/2000

Historique du béton



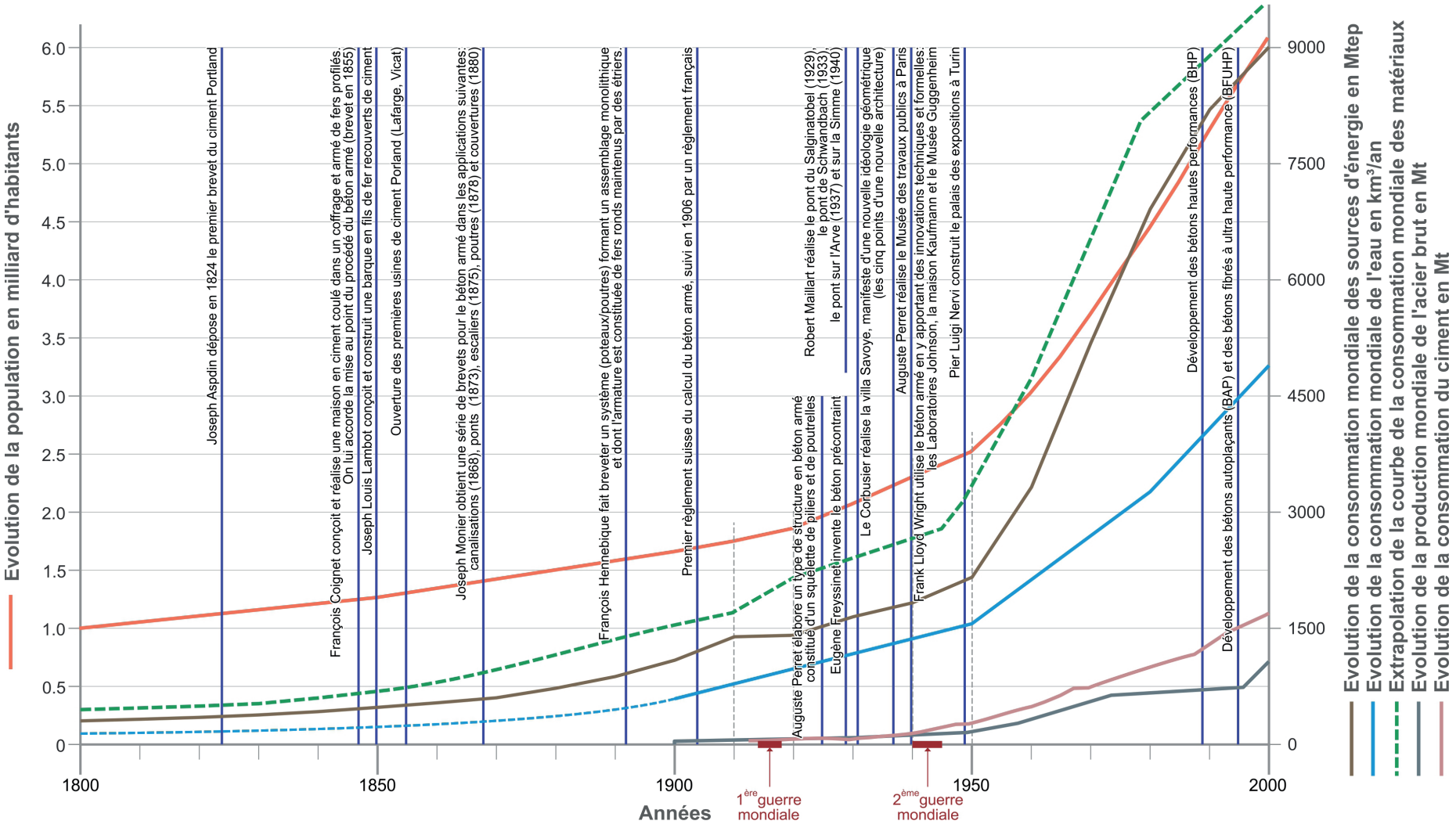
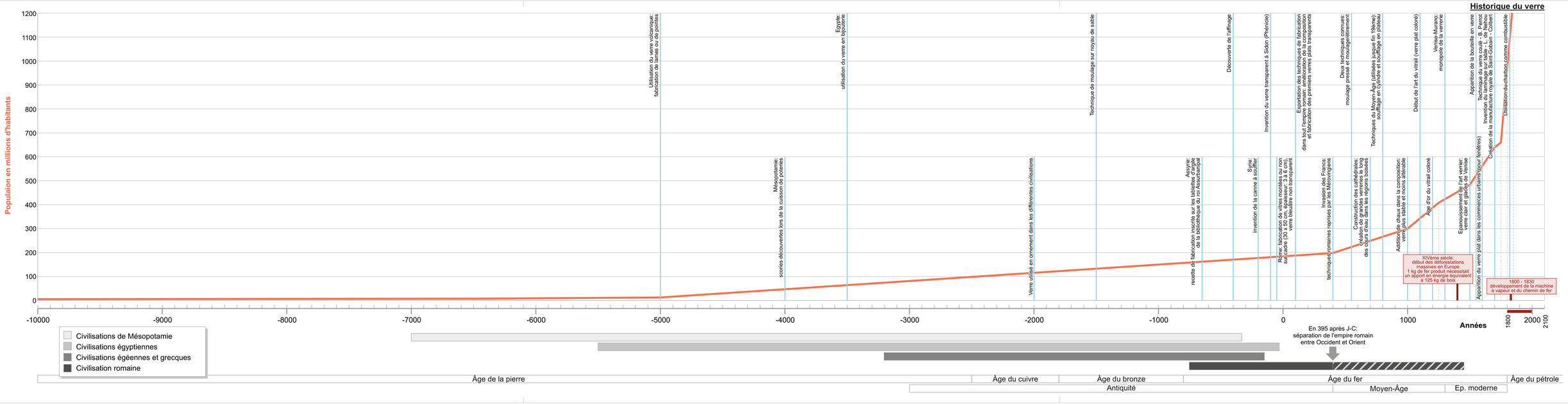


Illustration A2.8: Ligne du temps - matériau béton - dilatation 1800/2000


Historique du verre
Populaion en millions d'habitants
1200
1100
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
-10000
-9000
-8000
-7000
-6000
-5000
-4000
-3000
-2000
-1000
0
1000
1800
2000
2100
Années
Utilisation du verre volcanique: fabrication de lames, vases et parures
Egypte: utilisation du verre en bijouterie
Technique de moulage sur noyau de sable
Découverte de l'affinage
Invention du verre transparent à Sidon (Phénicie)
Exportation des techniques de fabrication dans tout l'empire romain: extension de la production et fabrication des premiers verres plats transparents
Deux techniques connues: moulage pressé et moulage coulé
Techniques du Moyen-Âge (utilisées jusque fin 19ème): soufflage en cylindre et soufflage en plateau
Début de l'art du vitrail (verre plat coloré)
Vénise-Murano: monopole de la verrerie
Apparition de la bouteille en verre
Technique du verre coulé - B. Perrot: invention du laminage - Fabrication à la manufacture royale de Saint-Gobain - Colbert
Utilisation du charbon comme combustible
Mésopotamie: scories découvertes lors de la cuisson de poteries
Verre utilisé en ornement dans les différentes civilisations
Assyrie: recette de fabrication inscrite sur les tablettes d'argile de la bibliothèque du roi Assurnipal
Syrie: invention de la canne à souffler
Rôme: fabrication de vitres montées ou non parquets ou cristallisées à 4 cm; verre bleuâtre non transparent
Invention des Francs: techniques romaines reprises par les Mérovingiens
Construction des cathédrales: création de grandes verrières le long des murs et non plus dans les regions basses
Addition de chaux dans la composition: verre plus stable et moins altérable
Âge d'or du vitrail coloré
Epanouissement de l'art verrier: verre clair et gloire de Venise
Apparition du verre plat dans les commerces urbains (pour fenêtres)
Création de la manufacture royale de Saint-Gobain
XIVème siècle: début des déforestations massives en Europe 1 kg de fer produit nécessitait un apport en énergie équivalent à 125 kg de bois
1800 - 1830 développement de la machine à vapeur et du chemin de fer
Civilisations de Mésopotamie
Civilisations égyptiennes
Civilisations égéennes et grecques
Civilisation romaine
En 395 après J-C: séparation de l'empire romain entre Occident et Orient
Âge de la pierre
Âge du cuivre
Âge du bronze
Âge du fer
Âge du pétrole
Antiquité
Moyen-Âge
Ep. moderne

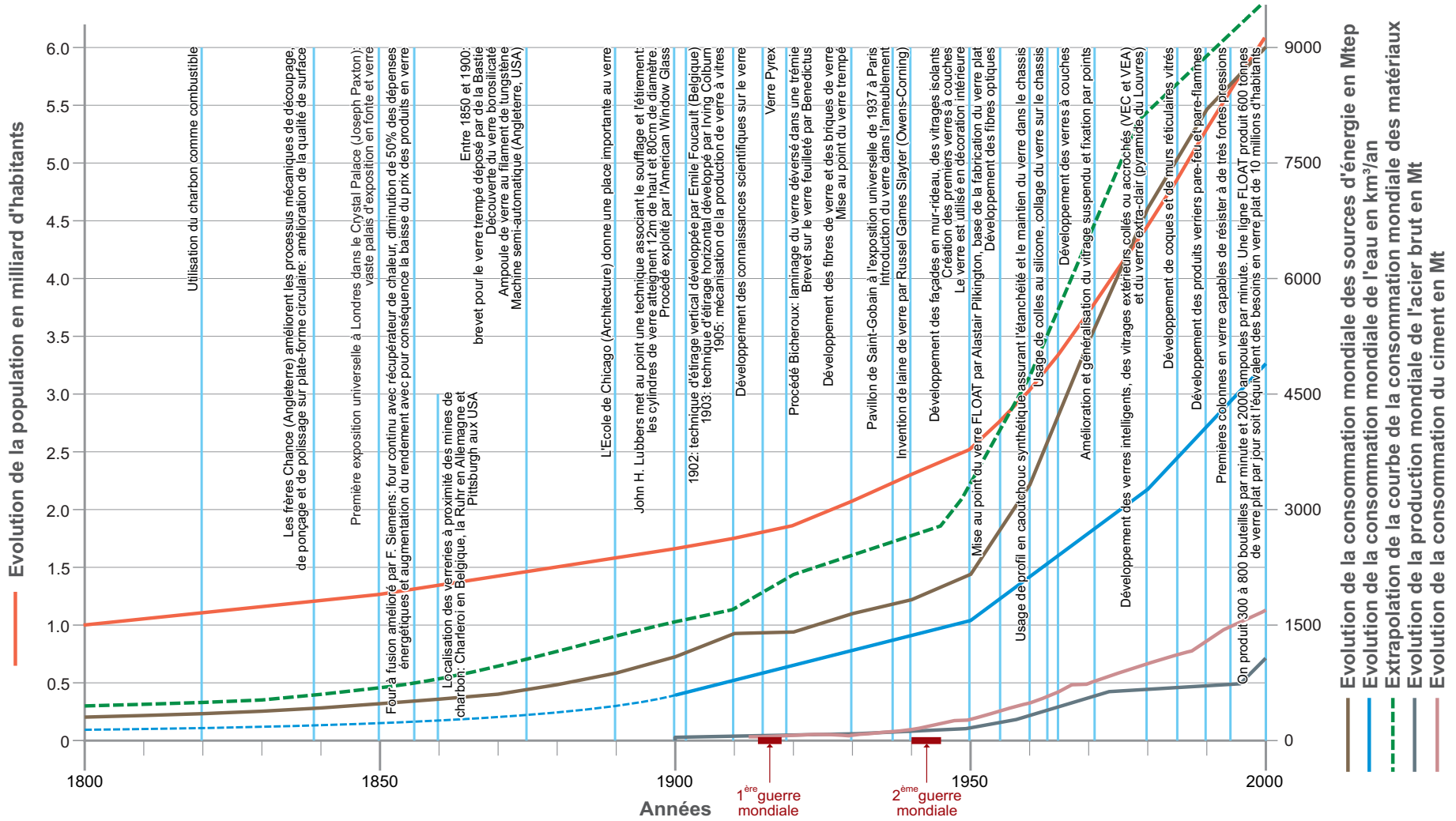
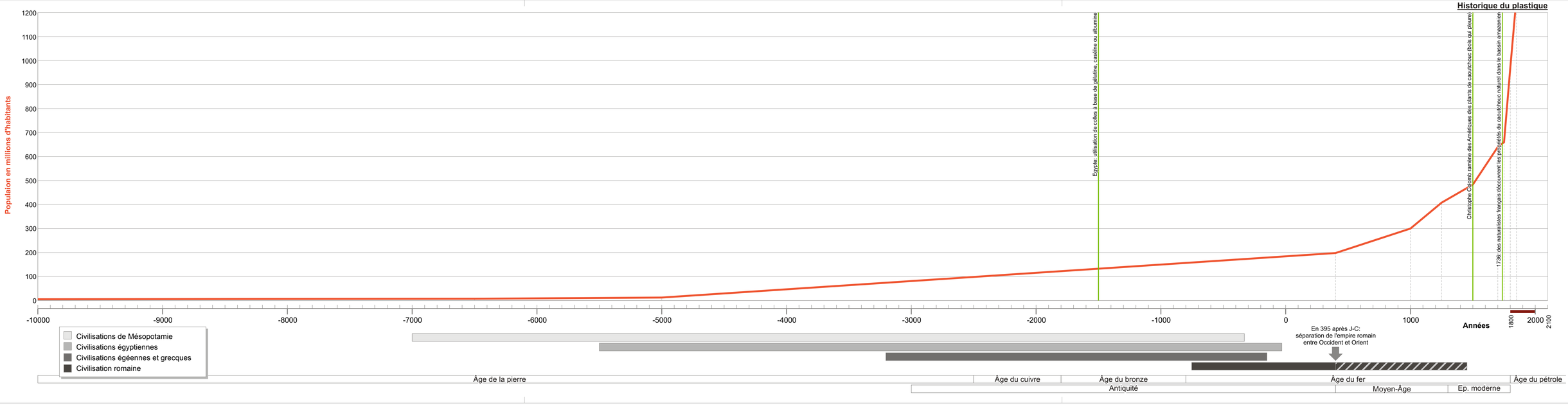


Illustration A2.10: Ligne du temps - matériau verre - dilatation 1800/2000


Historique du plastique
Populaion en millions d'habitants
1200
1100
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
-10000
-9000
-8000
-7000
-6000
-5000
-4000
-3000
-2000
-1000
0
1000
1800
2000
2100
Années
Egypte: utilisation de colles à base de gélatine, caséine ou albumine
Christophe Colomb ramène des Amériques des plants de caoutchouc (bois qui pleure)
1736: des naturalistes français découvrent les propriétés du caoutchouc naturel dans le bassin amazonien
En 395 après J-C: séparation de l'empire romain entre Occident et Orient
Civilisations de Mésopotamie
Civilisations égyptiennes
Civilisations égéennes et grecques
Civilisation romaine
Âge de la pierre
Âge du cuivre
Âge du bronze
Âge du fer
Âge du pétrole
Antiquité
Moyen-Âge
Ep. moderne

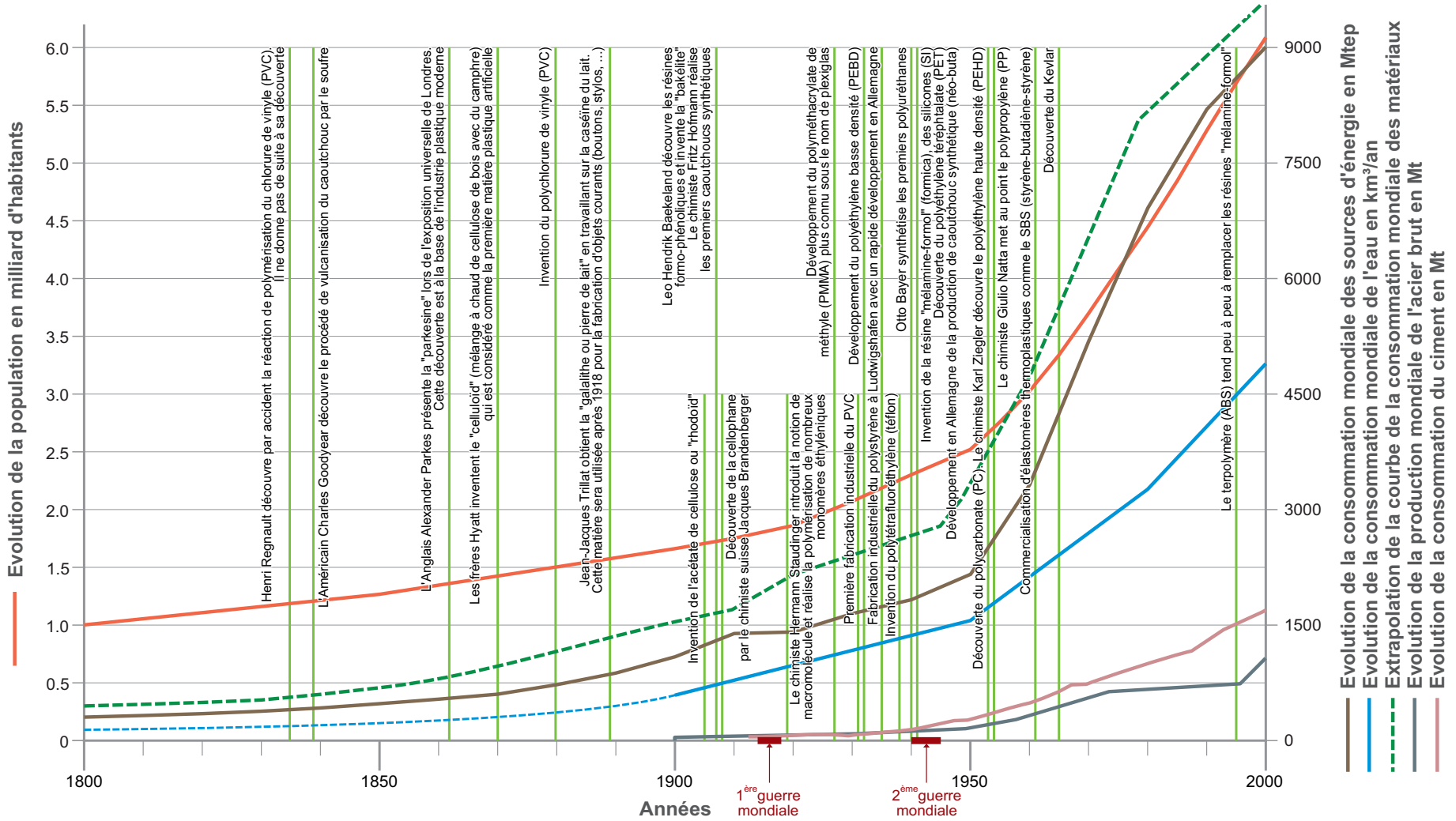
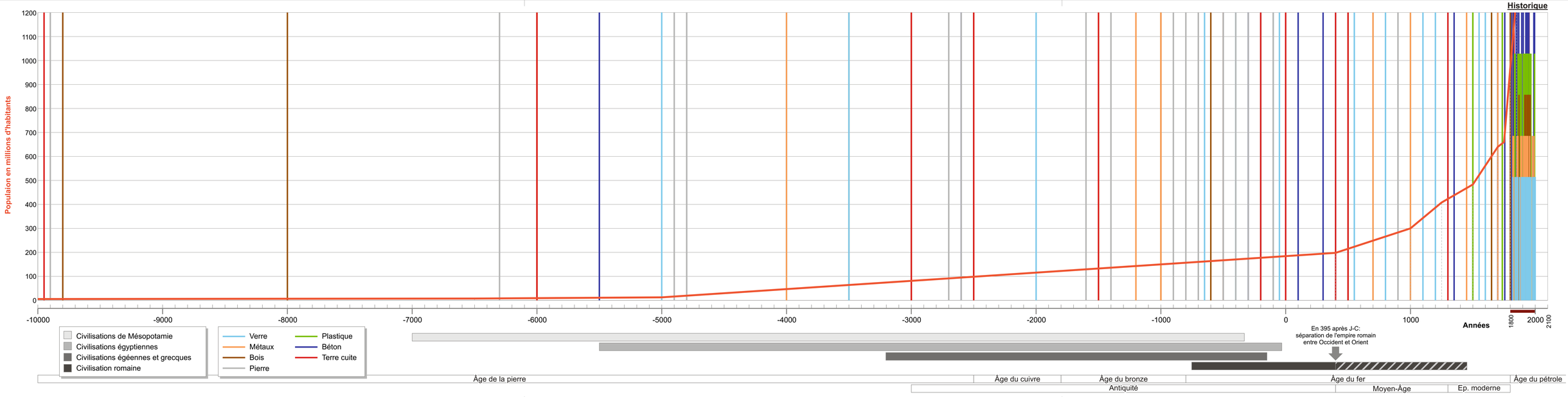


Illustration A2.12: Ligne du temps - matériau plastique - dilatation 1800/2000


Historique
Populaion en millions d'habitants
1200
1100
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
-10000
-9000
-8000
-7000
-6000
-5000
-4000
-3000
-2000
-1000
0
1000
1800
2000
2100
Années
Civilisations de Mésopotamie
Civilisations égyptiennes
Civilisations égéennes et grecques
Civilisation romaine
Verre
Métaux
Bois
Pierre
Plastique
Béton
Terre cuite
En 395 après J-C:
séparation de l'empire romain
entre Occident et Orient
Âge de la pierre
Âge du cuivre
Âge du bronze
Âge du fer
Âge du pétrole
Antiquité
Moyen-Âge
Ep. moderne

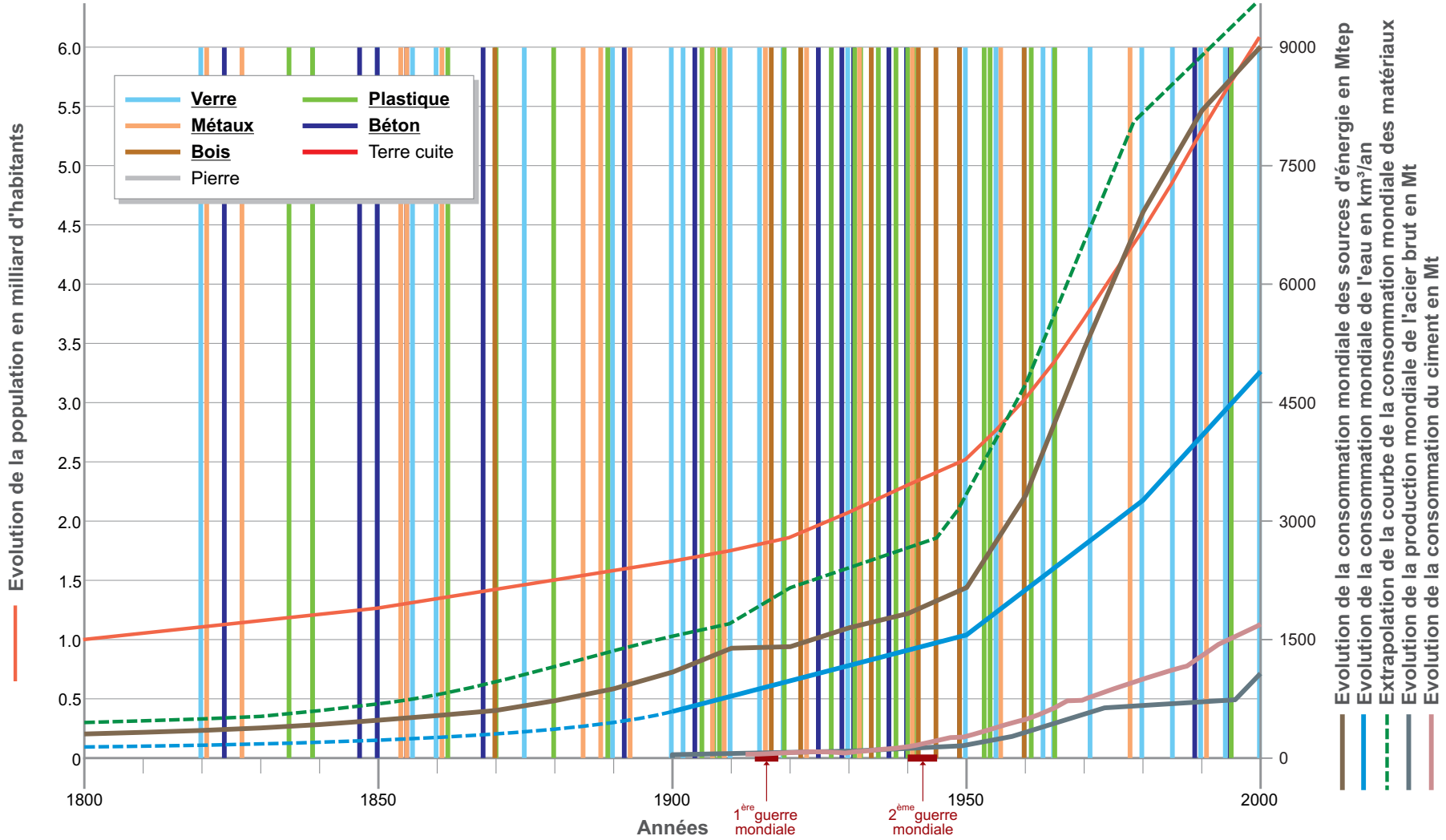


Illustration A2.14: Ligne du temps - compilation - dilatation 1800/2000

3. Analyse des lignes du temps

Lorsqu'on analyse les différentes lignes du temps, les dilatations et les compilations de celles-ci, on constate une grande constance dans l'utilisation de certaines matières ou matériaux et cela jusque 1800.
Le bois, la pierre naturelle, la terre crue et la terre cuite sont des matières utilisées depuis des milliers d'années et dont les techniques de mise en oeuvre se sont améliorées avec la succession des civilisations.
On remarque que le bois, matière propice à la construction d'habitat nomade par sa grande disponibilité et sa facilité à être façonné et manipulé, a très vite été abandonné au profit de matériaux plus durs, plus solides, plus massifs et surtout incombustibles.
Il reviendra en force en Europe lors des Grandes Invasions Barbares puis sera à nouveau délaissé au profit de la brique et de la pierre lors de l'expansion et densification des villes au Moyen-Âge.
Il est à nouveau fortement utilisé en Europe, notamment dans les constructions à ossature en bois, en structure et sous forme de panneaux, en revêtement intérieur et extérieur...
La plupart de ces «premiers» matériaux se sont adaptés à l'évolution des civilisations et des exigences. Ils sont toujours fort présents dans le secteur actuel de la construction.
On remarque aussi que plusieurs périodes ont été propices au développement et à la prolifération de nouvelles techniques de construction, de découvertes ou d'améliorations de matériaux:

- la période de stabilité de l'Empire Romain a permis le développement de nouvelles techniques de maçonnerie et de construction de murs avec l'amélioration notable des liants et mortiers. Vu l'emprise territoriale de l'Empire Romain, il est clair que cette période a sans doute mis à profit l'expérience des peuples colonisés en termes de matériaux et de techniques constructives;
- le Moyen-Âge, après une période de régression en termes de construction et d'architecture, voit réapparaître l'utilisation de la terre (torchis), de la brique et de la pierre ainsi que les premiers balbutiements de l'industrie (verrerie, métallurgie...);
- le développement des grandes routes maritimes aux 15è et 16è siècle permet le développement de certains produits de construction ainsi que certaines techniques: l'Europe va chercher partout dans le monde ce qu'elle a besoin pour développement de son industrie naissante mais également certaines techniques industrielles et constructives;

Certains matériaux se développent réellement à partir de cette dernière période. C'est le cas du verre, de la fonte et du fer et ensuite de l'acier. On commence à parler de béton également sans toutefois produire le matériau qu'on connaît aujourd'hui.

A partir de 1800 et jusqu'aux années 2000, il y a une accélèration dans les découvertes de nouveau matériaux ou techniques de fabrication. Cette accélèration est principalement due à l'utilisation de nouveaux combustibles (coke, charbon et pétrole) mais à l'essor du chemin de fer et au développement du commerce à grande échelle.
On remarque que les deux Guerres mondiales et la période de l'entre-deux-guerres ont été propices au développement de nouveaux produits de construction, notamment les panneaux dérivés du bois et les matières plastiques. Ces trois périodes du 20è siècle sont en effet marquées par des progrès techniques et industriels considérables mais également par le développement massif des moyens de transport, essentiellement routiers et aériens.

Les dilatations «1800/2000» montrent également une augmentation exponentielle de la population: en deux siècles, celle-ci est passée d'un milliard à presque sept milliards d'habitants.
La consommation en combustibles fossiles, en eau et en matériaux a suivi la même tendance avec une augmentation plus importante à partir des années cinquante. Ceci s'explique sans doute par la mise en place des réseaux d'eau, de gaz et des systèmes de chauffage individuel ou autres techniques (éclairage, climatisation...) dans la plupart des pays occidentaux qui sont également, à cette époque et encore aujourd'hui, les plus grands consommateurs d'eau et de ressources fossiles mais aussi par le besoin de reconstruction massive et la nécessité de disposer de grandes quantités de matériaux de construction.
Il est, en outre, étonnant de constater que les crises pétrolières des années 70 n'ont influencé ni la courbe de consommation de combustibles ni celle de consommation de matériaux.
On constate aussi une réflexion récurrente en termes d'innovation. L'homme ne se contente pas de ce qu'il a, il cherche sans cesse de nouvelles matières.
Ce fut une constante tout au long de l'histoire humaine mais c'est encore le cas ces vingt dernières années. Les procédés industriels se sont sensiblement améliorés en terme de réduction de besoin énergétique et de pollution mais aussi en termes de consommation de ressources naturelles et de recyclage.
Les produits verriers, les aciers, les bétons sont sans cesse en train d'évoluer.
De nouveaux matériaux apparaissent: aérogels, matériaux isolants composites...
Cet état de fait nous place aujourd'hui, en tant qu'architecte et concepteur dans une situation d'hyperchoix qu'il va falloir gérer de manière soutenable.

Caractéristiques des matériaux de construction

Devant la grande diversité des matériaux de construction, il nous semble judicieux de pouvoir les classer ou les catégoriser.
Classer les matériaux de construction peut se faire de différentes façons ou selon plusieurs axes. On peut par exemple classer les matériaux en fonction du type de matières premières qui les composent (matériau organique, minéral ou synthétique).
On peut également classer les matériaux selon l'origine de leur principal(aux) composant(s), leur fin de vie (classe et type de déchet), leur mode de fixation…
On peut aussi les classer selon les performances qu'ils permettent d'atteindre : performance structurelle, performance d'isolation, résistance au feu…
Ces différents classements permettent souvent d'accélérer le processus de sélection et ainsi l'élaboration de solutions alternatives.
Dans ce chapitre, nous avons choisi de les classer selon leur composition ou leur « matérialité intrinsèque». En effet, ce sont les composants d'un matériau qui lui confèrent des propriétés particulières mais aussi une texture, une couleur et un aspect distinctifs.
Connaître les propriétés techniques d'un matériau permet à l'architecte ou au concepteur de mieux comprendre son comportement une fois mis en œuvre ainsi que le rôle qu'il va jouer dans le maintien des exigences de confort, de protection, de sécurité…
En outre, la connaissance et la maîtrise des phénomènes microscopiques liés à la matière offrent aux scientifiques et aux industriels la possibilité d'élaborer d'une part des nouveaux matériaux et, d'autre part des matériaux aux propriétés et aux performances déterminées.
Les principaux matériaux qui seront décrits dans ce chapitre sont le bois et les dérivés du bois, la pierre naturelle, les matériaux en terre crue, les matériaux en terre cuite, les liants minéraux, les mortiers et les produits dérivés, le béton, les métaux, le verre, les matières plastiques, les matériaux bitumineux et les isolants.
Dans ce chapître, nous nous contenterons d'énumérer et de décrire brièvement les différentes propriétés des matériaux.
Une propriété est définie comme étant une grandeur physique, souvent quantitative, associée à une unité de mesure qui peut être utilisée comme métrique de la valeur pour comparer les avantages d'un matériau plutôt qu'un autre dans un processus de sélection.
Nous nous attacherons plus particulièrement aux propriétés hygrothermiques puisqu'un des objectifs de cette thèse est de développer un outil d'aide sur base de performances thermiques déterminées.
L'ensemble des propriétés présentées ci-après peuvent être déterminées en laboratoire par des méthodes de test standardisées ou des protocoles normalisés, chaque matériau obtenant alors une valeur qui lui est propre.
Les principaux matériaux de construction et leurs dérivés seront décrits en annexe 1 selon le canevas suivant:

- Description et composition ;
- Propriétés du(es) matériau(x): physiques, chimiques, mécaniques et environnementales ;
- Procédé de fabrication et types de « produits » ;
- Mise en œuvre et aspects techniques ;

Tout au long de la description, des exemples de réalisations et d'utilisation des matériaux permettront d'intégrer l'expression architecturale de ceux-ci et d'illustrer la perception que l'on en a.
Un tableau reprenant l'ensemble des propriétés hygrothermique des principaux matériaux de construction sera donné en annexe 2.

1. Caractéristiques et propriétés des matériaux de construction

De par leurs propriétés, les matériaux et produits de construction répondent à une fonction ou un usage dans

le bâtiment mais également à des exigences en termes de structure, de confort hygrothermique, de sécurité, de résistance dans le temps et de résistance au feu. Ce chapitre décrira de manière succincte l'ensemble de ces exigences et les critères de performances.

1.1. Propriétés physiques

Masse volumique

La masse volumique est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume. Elle est déterminée par le rapport $\rho = m / V$, où m est la masse de la substance homogène occupant un volume V.

L'unité de mesure de la masse volumique dans le système international est le kilogramme par mètre cube (kg/m^3), mais on utilise couramment le g/cm^3 ou la t/m^3.

Densité

La densité ou densité relative d'un corps est le rapport de sa masse volumique à la masse volumique d'un corps pris comme référence.

Le corps de référence est l'eau pure à 4 °C pour les liquides et les solides. Dans ce cas, la masse volumique de l'eau est prise égale à 1 000 kg/m^3.

Dans le cas de gaz ou de vapeur, le corps de référence gazeux est l'air, à la même température et sous la même pression. La densité est une grandeur sans dimension et sa valeur s'exprime sans unité de mesure.

Porosité

La porosité est la propriété d'un matériau qui contient des pores ou cavités de petite taille et pouvant contenir des fluides (liquide ou gaz).

Une structure poreuse peut être :

- fermée, lorsque les pores ne sont pas reliés entre eux (exemple : le verre cellulaire),
- ouverte, lorsque les pores sont reliés entre eux (exemples: brique, béton) et forment des canaux très fins.

Lorsque la structure est ouverte, elle permet :

- l'absorption d'eau : les canaux se comportent comme des tubes capillaires. On parle de matériaux capillaires;
- la progression de la vapeur d'eau : on parle de matériaux perméables à la vapeur d'eau;
- le passage de l'air : on parle de matériaux perméables à l'air.

1.2. Propriétés chimiques

Résistance à la corrosion

La corrosion désigne l'altération d'un matériau par réaction chimique avec un oxydant. La corrosion peut se combiner avec les effets mécaniques et donner de la corrosion sous contrainte et de la fatigue-corrosion ; de même, elle intervient dans certaines formes d'usure des surfaces dont les causes sont à la fois physicochimiques et mécaniques.

Les exemples de corrosion les plus connus sont les altérations chimiques des métaux à l'air ou dans l'eau, telles la rouille du fer et de l'acier ou la formation de vert-de-gris sur le cuivre et ses alliages (bronze, laiton). Cependant, la corrosion est un domaine bien plus vaste qui touche toutes sortes de matériaux (métaux, céramiques, polymères) dans des environnements variables (milieu aqueux, atmosphère, hautes températures).

Pour éviter la corrosion, un premier pas est de choisir un matériau qui ne se corrode pas dans l'environnement considéré. On peut utiliser des aciers inoxydables, des aluminiums, des céramiques, des polymères... Le choix doit aussi prendre en compte les contraintes de l'application. Dans l'absolu, il n'existe pas de matériau réellement inoxydable.

Il existe donc deux moyens d'empêcher la réaction chimique d'avoir lieu.

On peut tout d'abord isoler la pièce ou le produit de l'environnement (par une couche de peinture, de matière plastique, ou par un traitement de surface : nitruration, chromatation, projection plasma).

Il est également possible d'introduire une autre pièce ou produit pour ralentir ou empêcher la réaction ; c'est le principe de la protection cathodique.

Un premier moyen de la réaliser est d'utiliser une «anode sacrificielle ». Cette nouvelle pièce, souvent en zinc ou magnésium, abaisse en effet le potentiel électrochimique de la pièce protégée en dessous du potentiel où il peut s'oxyder, et va se corroder à la place de la pièce à protéger.

Un deuxième moyen de réaliser la protection cathodique est d'abaisser le potentiel du métal avec une source électrique externe, en imposant un potentiel ou un courant entre la pièce et une anode externe positionnée au regard de la surface, mais sans contact direct avec le métal. Dans ce cas, l'anode ne se consomme pas et n'a pas besoin d'être remplacée.

Hygroscopicité - teneur en humidité hygroscopique

Un matériau donné, poreux et à pores ouverts, placés dans un air humide va absorber une certaine quantité d'humidité qui dépend uniquement de l'humidité relative (φ) de l'air et qui lui est proportionnelle.

Ainsi, un matériau tout à fait sec placé dans l'air humide voit sa masse augmenter. Un état d'équilibre s'établit après un certain temps.

La teneur en humidité hygroscopique (W^h) d'un matériau poreux dans un air à une humidité relative donnée, est la teneur en eau par unité de volume de matériau sec (en kg/m^3) qu'il contient à l'équilibre dans cette ambiance.

C'est la teneur en humidité minimale contenue dans un matériau poreux.

- Courbe hygroscopique d'un matériau - Matériau hygroscopique

La décomposition du mécanisme d'hygroscopicité

lorsque l'humidité relative augmente tel que présenté par l'illustration A3.5, explique la courbe en «S» de la courbe hygroscopique d'un matériau. Celle-ci donne la teneur en humidité hygroscopique d'un matériau en fonction de l'humidité relative.

1.3. Propriétés thermiques et hygrothermiques

La conception de l'enveloppe est une étape importante car celle-ci joue un rôle important tant en termes de confort intérieur (été comme hiver) qu'en termes de protection contre les effets négatifs du climat extérieur.
Lorsqu'on veut définir la performance de l'enveloppe, il faut analyser ses propriétés hygrothermiques c.-à-d. les transferts de chaleur, d'humidité et d'air au travers des parois de celle-ci.

Tranfert de chaleur

L'enveloppe d'un bâtiment doit limiter à la fois les pertes de chaleur en hiver et permettre de maîtriser les gains solaires en été. Les matériaux dits « isolants » permettent de freiner la chaleur qui traverse les parois extérieures par conduction.
Il faut faire également la distinction entre les performances relatives à chaque matériau, aux couches d'une paroi et la paroi dans son ensemble.

• Conductibilité thermique d'un matériau [λ]

La conductivité thermique est une caractéristique spécifique à chaque matériau. Elle indique la quantité de chaleur qui se propage en 1 seconde, à travers 1 m² d'un matériau épais d'un 1 m, lorsque la différence de température entre les deux faces est de 1 K (1 K = 1°C).
La conductivité thermique renseigne sur la capacité d'isolation d'un matériau : plus la conductivité thermique est faible, meilleure est la capacité d'isolation.
La conductivité thermique est exprimée en W/mK.

• Résistance thermique d'une couche [R]

La résistance thermique de chaque couche d'un élément de paroi dépend de son épaisseur et de la conductivité thermique qui la compose. C'est la mesure de performance de la couche isolante :

$$R = d / \lambda$$

où d = épaisseur de la paroi

Plus la résistance thermique est élevée, plus la couche est isolante. Elle s'exprime en m²K/W.

• Coefficient de transmission thermique [U]

Pour qualifier la performance thermique d'une paroi, on utilise en général le coefficient de transmission thermique U.
La valeur U définit la quantité de chaleur qui traverse 1m² d'un élément de construction lorsque la différence de température des couches d'air qui se trouvent de part et d'autre de l'élément est de 1K et que les résistances de transmission thermique entre les couches d'air sont prises en compte.
La valeur U est exprimée en W/m²K.
Plus la valeur U est faible, plus la paroi est thermiquement isolante. Cependant ce coefficient ne permet pas d'exprimer le comportement hygrothermique dynamique de la paroi.

Nœuds constructifs et ponts thermiques

La rencontre entre deux parois et/ou un percement au sein d'une paroi peuvent engendrer des détails de construction devant être analysés distinctement du reste de la paroi pour évaluer la performance d'ensemble d'un local ou d'un bâtiment. Il s'agit des nœuds constructifs et ponts thermiques.
Les nœuds constructifs se situent à la rencontre entre deux parois ou au niveau d'un percement ou d'une irrégularité de paroi. Ils sont le siège de transferts thermiques spécifiques. Ceux-ci doivent, lorsqu'on établit la performance d'ensemble d'un local ou d'un bâtiment, être additionnés ou soustraits des transferts propres

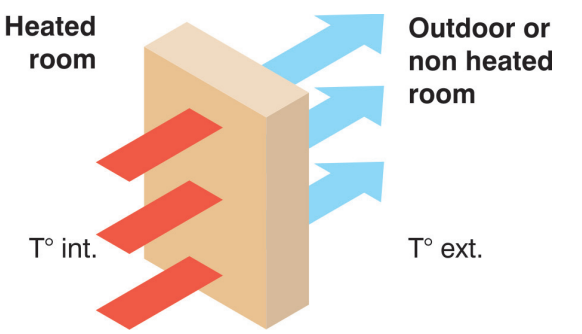


Illustration A3.1: Illustration de la conductivité thermique

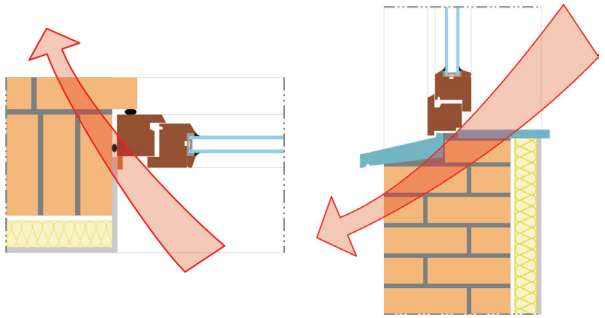


Illustration A3.2: Nœuds constructifs linéaires

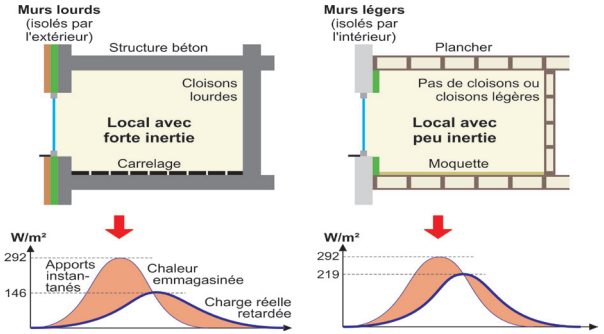


Illustration A3.3: Influence de l'inertie sur le lissage de température

aux parties homogènes des parois.
Ces nœuds constructifs sont appelés « ponts thermiques » quand ils occasionnent des déperditions thermiques plus importantes. Les ponts thermiques sont des « défauts » de conception ou de réalisation de l'enveloppe du bâtiment entraînant des discontinuités de l'isolation. L'influence relative d'un pont thermique est d'autant plus importante que la performance thermique des parois avoisinantes est élevée
Les ponts thermiques peuvent être de deux types :

- linéaires lorsqu'ils de produisent à la jonction de deux éléments (le cas des exemples repris par l'illustration A3.2 ci-contre);
- ponctuels lorsque la paroi isolée est perforée par un élément ayant une conductivité thermique élevée (cas d'un ancrage métallique traversant la couche isolante).

Outre les déperditions thermiques, les ponts thermiques peuvent entraîner des problèmes de condensations superficielles provoquant ainsi la formation de moisissures qui elles-mêmes auront un impact sur la qualité de l'air intérieur.

Stockage de chaleur

L'inertie thermique d'un bâtiment est sa capacité à stocker et à restituer de la chaleur avec un déphasage de temps (voir illustration A3.3 ci-contre).
Une inertie thermique importante a un effet positif sur le confort climatique intérieur car elle permet d'aplanir les pics de chaleur (en été, combinée avec une ventilation) et aide à éviter les grandes variations de températures (en hiver, combinée avec les gains solaires).
L'inertie d'une paroi dépend des caractéristiques des matériaux qui la composent.
Les paramètres utiles pour quantifier l'inertie des matériaux sont repris ci-dessous :

- Chaleur spécifique ou capacité thermique spécifique [c]

La chaleur spécifique d'un matériau indique la quantité de chaleur nécessaire pour chauffer 1kg de ce matériau de 1K. Grâce à la chaleur spécifique, on peut constater si un matériau a la capacité d'emmagasiner de la chaleur : plus la valeur de « c » est grande, plus le matériau sera capable de stocker de la chaleur.
La chaleur spécifique est exprimée en J/kgK.

- Capacité thermique volumique [ρc]

La capacité thermique volumique d'un matériau représente la quantité totale de chaleur qu'un volume de 1m³ de ce matériau est capable de stocker pour une augmentation de température de 1°C.
Elle est définie par le produit de la densité du matériau (ρ en kg/m³) et de sa chaleur spécifique (c en J/kgK).
Elle est exprimée en KJ/m³K. Plus la capacité thermique volumique d'un matériau est élevée, plus le matériau est capable de stocker de la chaleur.

- Diffusivité thermique

La diffusivité thermique d'un matériau est associée à la vitesse à laquelle celui-ci monte en température lorsqu'il est soumis à une source de chaleur. Elle se calcule par le rapport λ/ρc et s'esprime en m²/s.
Plus la diffusivité thermique est élevée, plus la température du matériau évoluera rapidement.

- Effusivité thermique

L'effusivité thermique d'un matériau est associée à la quantité de chaleur que celui-ci est capable d'emmagasiner lorsqu'il est soumis à une source de chaleur pendant un certain temps. Elle est calculée par la relation (λ/ρc)½ et s'exprime en J/m²K s-½.
Plus l'effusivité thermique est élevée, plus la quantité de chaleur (énergie) absorbée par le matériau en un certain temps est grande.
L'effusivité est également liée à la température de contact : un matériau ayant une effusivité faible sera « chaud » au toucher.
Ainsi l'inertie thermique d'une paroi sera principalement déterminée par les propriétés des couches superficielles. Ces couches offriront une inertie élevée si les matériaux qui les composent ont une effusivité élevée et une diffusivité faible.
En effet pouvoir échanger de grandes quantités de chaleur ne présente pas d'intérêt si ces échanges sont trop rapides. La notion de temps et de déphasage est fondamentale, c'est pourquoi on parle de comportement dynamique.
Remarque:
Quantifier l'effet de l'inertie est donc relativement complexe. C'est pourquoi, nous avons considéré ici que l'inertie thermique était définie par la capacité de stockage de chaleur ou la capacité des matériaux à emmagasiner la chaleur. Elle se calcule à partir du produit de la chaleur spécifique « c », de la densité « ρ » et de l'épaisseur « d » du matériau observé.
La capacité de stockage de la chaleur s'exprime en kJ/m²K.

Transfert et stockage d'humidité

La majorité des matériaux poreux sont capables de contenir de l'humidité (stockage) selon des conditions ambiantes dans lesquelles ils sont placés.
L'eau peut être présente sous différentes formes au sein des pores du matériau :

- eau de constitution : les molécules d'eau sont chimiquement intégrées à la structure poreuse;
- eau adsorbée : une pellicule d'eau se dépose sur la surface des pores;
- eau capillaire : certains pores se remplissent d'eau;
- eau libre : l'eau est présente dans les pores mais circule librement à travers ceux-ci (sous forme liquide ou de vapeur).

- Teneur en eau et courbe de rétention d'humidité

La teneur en eau d'un matériau évolue principalement en fonction de l'humidité relative de l'ambiance dans

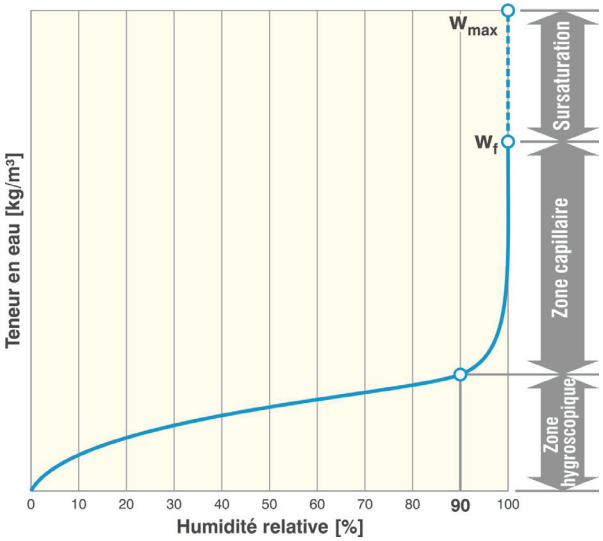


Illustration A3.4 : Courbe de rétention d'humidité

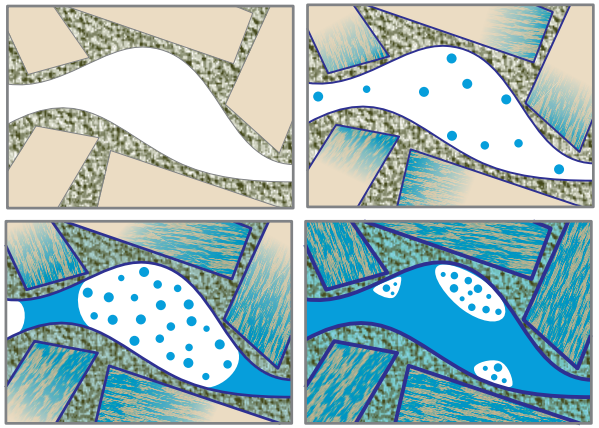


Illustration A3.5 : Teneur en eau des matériaux et zonage

laquelle il est placé (voir illustrations ci-contre).
La teneur en eau est notée w et s'exprime en kg/m³ (ou en % de masse).
La teneur en eau des matériaux est toujours égale à 0kg/m³ à 0% d'humidité relative.
Elle évolue lentement jusqu'à 80 ou 90%, voire plus selon les caractéristiques des matériaux (composition, porosité), en définissant plusieurs zones :

- Zone hygroscopique : l'eau est principalement absorbée. La teneur en eau dans cette zone est modérée, très basse pour certains matériaux (brique, béton cellulaire…) et plus élevée pour d'autres (cellulose, bois…);
- Zone capillaire : de 80% à 100% d'humidité relative (saturation). La teneur en eau augmente rapidement et peut atteindre des valeurs élevées ; A 100% d'humidité relative, on atteint la « saturation libre (wf) » où les pores du matériau ne sont pas encore complètement remplis d'eau;
- Sursaturation : la teneur en eau peut encore augmenter si le matériau est plongé dans l'eau, longtemps, sous vide ou sous pression.

En pratique, il est rare d'atteindre la teneur en eau maximale (wmax) où tous les pores sont remplis d'eau.
La teneur en eau des matériaux influence les paramètres hygrothermiques de ceux-ci : capacité thermique, conductivité thermique…
Elle ne peut donc pas être négligée lors de la conception de l'enveloppe.
Un autre point important à considérer sont les transferts d'humidité. Plusieurs phénomènes doivent être analysés : les transferts de vapeur et les transferts d'eau liquide.

• Transfert de vapeur

Le transfert de vapeur d'eau est provoqué par une différence de pression partielle de vapeur d'eau entre les deux faces d'un matériau ou d'une paroi. Comme l'air chaud est capable de contenir plus de vapeur d'eau, le flux de vapeur va souvent du chaud vers le froid.

• Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau [μ]

Le paramètre le plus utilisé pour exprimer la manière dont le matériau se laisse traverser par la vapeur est le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau.
Plus la valeur μ est petite, plus le matériau est ouvert au passage de la vapeur. On évalue la résistance à la diffusion de vapeur d'eau d'une couche par le produit de son épaisseur (d) et du coefficient μ du matériau qui la compose.
La valeur obtenue est notée μd (ou Sd) et s'exprime en mètre. Elle correspond à l'épaisseur (en m) d'une lame d'air stationnaire ayant la même résistance à la diffusion de vapeur.
Exemple : une couche de 20 cm ayant un coefficient μ de 5 exerce la même résistance à la diffusion de vapeur qu'une lame d'air stationnaire de 1m d'épaisseur
La valeur μd d'une paroi est égale à la somme des μd des couches qui la composent et des résistances à la diffusion de vapeur des deux faces de la paroi

• Transfert d'eau liquide et coefficient d'absorption

Le transfert d'eau liquide peut se faire par absorption d'eau qui entrerait en contact avec le matériau ou par redistribution de l'humidité présente dans les pores du matériau.
Par facilité, on considère que ces deux phénomènes son provoqués par une différence d'humidité relative au sein du matériau : les transferts d'eau liquide vont alors des zones les plus humides vers les zones les plus sèches. Le transfert d'eau liquide au travers d'un matériau se calcule sur base de deux coefficients distincts : le coefficient de transfert d'eau par absorption et le coefficient de transfert d'eau par redistribution. Il est actuellement rare de disposer de ces paramètres, leur

détermination se faisant en laboratoire et la procédure étant assez longue et coûteuse.
Cependant, il existe une méthode simplifiée permettant de donner une valeur approximative. Elle se base sur la détermination du coefficient d'absorption, noté A et exprimé en kg/m² s½.
Vu la complexité des phénomènes de transferts d'humidité au sein des matériaux et des parois, nous nous sommes limités à donner les valeurs caractérisant chaque matériau.

1.3. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques sont des propriétés importantes à connaître dans la mesure où elle permettent d'identifier les «déformations» potentielles des matériaux.
Ces connaissances ont une importance capitale pour la mise en forme (fabrication de pièces), la conception (résistance de la pièce en utilisation normale) et la sécurité (protection des personnes en cas d'accident).
La capacité d'un matériau de construction à se déformer, ou à résister à la déformation, dépend de deux choses : la forme et la nature du matériau.
La nature du matériau est caractérisée par trois couples de qualificatifs :

- souple/rigide : ceci caractérise l'élasticité, la capacité de l'objet à se déformer élastiquement, de manière réversible ;
- dur/ductile : ceci caractérise la ductilité, la capacité de l'objet à se déformer plastiquement, de manière irréversible ;
- fragile/tenace : ceci caractérise la capacité à résister à la propagation d'une fissure, à absorber l'énergie d'un choc.

Résistance des matériaux

La résistance des matériaux est une discipline particulière de la mécanique des milieux continus permettant le calcul des contraintes et déformations dans les structures des différents matériaux.
La résistance des matériaux permet de ramener l'étude du comportement global d'une structure (relation entre sollicitations — forces ou moments — et déplacements) à celle du comportement local des matériaux la composant (relation entre contraintes et déformations). L'objectif est de concevoir la structure suivant des critères de résistance, de déformation admissible et de coût financier acceptable.
Lorsque l'intensité de la contrainte augmente, il y a d'abord déformation élastique : le matériau se déforme proportionnellement à l'effort appliqué et reprend sa forme initiale lorsque la sollicitation disparaît. Cette déformation élastique est parfois suivie, en fonction de la ductilité du matériau, d'une déformation plastique : le matériau ne reprend pas sa forme initiale lorsque la sollicitation disparaît ; il subsiste alors une déformation résiduelle.
Lorsque la sollicitation dépasse la résistance intrinsèque du matériau, il y a rupture.
Les sollicitations auxquelles doivent faire face les matériaux de construction, essentiellement les matériaux utilisés en structure, sont les suivantes:

- la traction: le matériau subit un étirement ou un allongement longitudinal;
- la compression: le matériau subit un rétrécissement ou une compression;
- le cisaillement: le cisaillement est l'effort de deux forces parallèles, de sens opposés, et très rapprochées, tendant à provoquer le glissement relatif des deux sections de la pièce;
- la torsion: la torsion est la sollicitation subie par un corps soumis à l'action d'un couple de forces opposées agissant dans des plans parallèles et dont l'élément de réduction est un moment de force agissant dans l'axe de la poutre;
- la flexion: la flexion est la déformation d'un objet qui se traduit par une courbure.

• Résistance à la compression

Les matériaux de construction subissent en tout premier lieu les effets du poids qu'ils supportent... et en particulier de leur propre poids. Ils réagissent dans la mesure où le sol offre une force de réaction. Selon leur nature ils réagissent différemment à ces deux forces opposées et exercées verticalement. Le poids tend à écraser les matériaux, à les compresser. La qualité première des matériaux de construction est donc de résister à cette pression sans se déformer.
Chaque matériau possède donc un degré de résistance à la compression qui lui est propre. On peut les classer par ordre décroissant : le fer, la pierre, le bois.

• Résistance à la traction

La résistance à la traction, c'est la capacité d'une pièce à résister à l'arrachement. Comme un fil que l'on tire à chaque bout jusqu'à la rupture. En fait, c'est l'effort strictement opposé à celui de compression.
Les matériaux qui résistent bien à la pression ne résistent pas nécessairement aussi bien à la traction. Pour reprendre les trois matériaux de base on placerait par ordre décroissant de résistance le fer, en second le bois et en dernier la roche.

• Résistance à la flexion

La flexion est en fait une composante des deux efforts précédents. La pièce qui résiste à un effort de flexion résiste en fait à des efforts de compression d'une part et à des efforts de traction d'autre part.
Pour qu'un matériau résiste bien à la flexion il lui faut donc une bonne résistance à la compression et à la traction, comme l'acier notamment.

• Ductilité

En résistance des matériaux, la ductilité désigne la ca-

pacité d'un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre.
La rupture se fait lorsqu'un défaut (fissure ou cavité), induit par la déformation plastique, devient critique et se propage. La ductilité est donc l'aptitude qu'a un matériau à résister à cette propagation. S'il y résiste bien, il est dit «ductile», sinon il est dit «fragile».
Deux principales mesures sont effectuées : les essais de traction mesurant l'allongement avant la rupture et la striction (réduction du diamètre de l'éprouvette au niveau où elle se rompt) et l'essai mouton de Charpy mesurant l'énergie dépensée pour casser une éprouvette.
Un matériau est considéré comme ductile si :

- son allongement et sa striction à la rupture sont importants ;
- l'énergie dépensée pour le casser est importante.

La ductilité dépend de la température, de la pression et de la vitesse de déformation.

• Limite d'élasticité

La limite d'élasticité est la contrainte à partir de laquelle

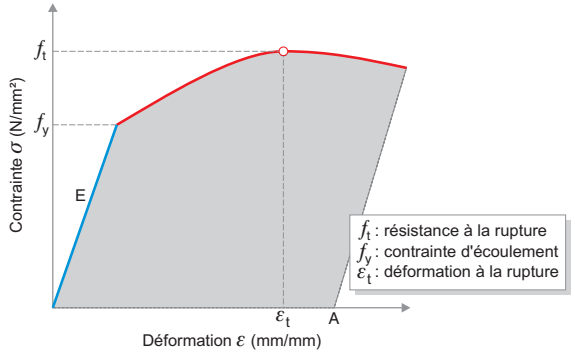


Illustration A3.6: Courbe d'élasticité d'un matériau

un matériau arrête de se déformer d'une manière élastique, réversible et commence donc à se déformer de manière irréversible.
Pour un matériau dit «fragile», c'est la contrainte à laquelle le matériau se rompt, notamment du fait de ses micro-fissures internes.
Pour un matériau dit «ductile», c'est la zone en rouge sur le graphique A3.6 ci-contre, au-delà du domaine élastique E représenté en bleu dans lequel l'augmentation de la contrainte donne une déformation réversible à la suppression de cette contrainte. Les déformations subies au-delà de la limite d'élasticité restent permanentes, ce sont des déformations plastiques. Elles se mesurent ou se vérifient habituellement à l'aide d'un essai de traction.

• Module d'élasticité (Young)

Le module de Young E ou module d'élasticité (longitudinale) ou encore module de traction est la constante qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et la déformation pour un matériau élastique isotrope.
Le physicien britannique Thomas Young (1773-1829) avait remarqué que le rapport entre la contrainte de traction appliquée à un matériau et la déformation qui en résulte (un allongement relatif) est constant, tant que cette déformation reste petite et que la limite d'élasticité du matériau n'est pas atteinte.
La loi d'élasticité est la loi de Hooke :

$$\varphi = E \times \varepsilon$$

où φ est la contrainte (en unité de pression), E est le module de Young (en unité de pression) et ε est l'allongement relatif ou la déformation.
Le module de Young est la contrainte mécanique qui engendrerait un allongement de 100 % de la longueur initiale d'un matériau (il doublerait donc de longueur), si l'on pouvait l'appliquer réellement : dans les faits, le matériau se déforme de façon permanente, ou se rompt, bien avant que cette valeur soit atteinte.

Un matériau dont le module de Young est très élevé est dit rigide. L'acier, l'iridium, le diamant, sont des matériaux très rigides, l'aluminium et le plomb le sont moins, les matières plastiques et organiques sont généralement peu rigides. Il ne faut cependant pas confondre élasticité et rigidité puisque la raideur d'une poutre par exemple dépend de son module de Young mais aussi du moment d'inertie de sa section

• Coefficient de Poisson

Le coefficient principal de Poisson permet de caractériser la contraction de la matière perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué. Ce coefficient a été mis en évidence analytiquement par Denis Poisson, mathématicien Français (1781 - 1840), Ce coefficient ν est défini par le rapport entre la contraction transversale unitaire et l'allongement axial unitaire.
Le coefficient de Poisson fait partie des constantes élastiques.

• Allongement à la rupture

L'allongement à la rupture ou allongement pour cent noté A% est une caractéristique sans dimension des matériaux. Elle définit la capacité d'un matériau à s'allonger avant de rompre lorsqu'il est sollicité en traction. A% se détermine par un essai de traction.
L'allongement à la rupture est défini par la formule suivante:

$$A\% : 100 \times (Lf - L0)/Lf$$

où Lf est la longueur ultime, longueur de la barre juste avant la rupture et L0 est la longueur initiale, longueur de la barre avant le début de l'essai de traction.
Un allongement à la rupture élevé caractérise un matériau ductile et un allongement à la rupture faible caractérise un matériau fragile.
Exemple:

- le polyester (250 < A% < 1500) peut être étiré de 15 fois sa longueur initiale avant de rompre.

• Dureté

De manière générale, la dureté est la résistance d'un matériau à être marqué par un autre, par une rayure ou une pénétration.
À la différence des minéraux dont la dureté est caractérisée par rayage (Échelle de Mohs), on utilise généralement des essais de rebondissement ou de pénétration pour caractériser la dureté des métaux, des matières plastiques et des élastomères.
La dureté d'un matériau est définie comme la résistance qu'il oppose à la pénétration d'un corps plus dur que lui.
Par exemple, l'acier est plus dur que l'aluminium, car il est plus difficile à rayer.
Il existe différents types d'essais/méthodes permettant de déterminer la dureté d'un matériau dont certaines font l'objet de norme précise.
- La dureté de Mohs
- La dureté Brinell
- La dureté Vickers
- La dureté Knoop
- La dureté Rockwell B et C

• La dureté de Mohs

La première notion de dureté (1822) provient du minéralogiste allemand Friedrich Mohs qui recherchait un paramètre pour définir les minéraux. Il propose une échelle de 10 classes de dureté relative basée sur la résistance à la rayure par rapport à des matériaux donnés, le talc et le diamant étant les extrêmes.
La mesure de la dureté selon l'échelle de Mohs dépend donc de la capacité d'un matériau à rayer un matériau de référence ou à être rayé par un matériau de référence.

• Résistance à la fatigue

Lorsqu'on soumet un matériau à des efforts répétés, alternés et variables, il peut se fissurer et se rompre alors que le niveau de sollicitations est inférieur à la limite de rupture à la traction. Cette perte de résistance qui se produit au cours du temps est appelée « fatigue ».

1.4. Autres propriétés des matériaux

Durabilité naturelle (résistance naturelle aux insectes et aux champignons)

La durabilité d'une espèce de bois est la capacité du matériau à résister naturellement aux attaques de champignons et d'insectes. Si le bois, qui n'est pas durable par nature, est utilisé en milieu humide ou en contact direct avec le sol ou l'eau, il nécessite un traitement de préservation artificiel préalable, généralement à base de produits chimiques, pour prolonger sa durabilité.
Les champignons n'affectent que le bois présentant un taux d'humidité de plus de 20 %. C'est généralement le cas lorsque le bois est employé en usage extérieur, dans des conditions où l'humidité relative de l'air s'élève en permanence à plus de 85 % ou en contact avec l'eau.
Seules les espèces de bois suffisamment durables par nature ou après traitement sont aptes à résister à ces attaques.
Les insectes s'attaquent généralement aux bois verts. Mais certains font aussi des ravages dans le bois sec. Une fois qu'ils pénètrent dans le bois sec, ils y entament leurs travaux de destruction, qu'ils poursuivent souvent sur plusieurs générations. La plupart des espèces de bois sont suffisamment durables par nature.

Classes de durabilité

La norme européenne EN 350.2 précise la répartition en classes de durabilité et la résistance contre les insectes de la plupart des espèces utilisées en Europe :

• Résistance naturelle contre les champignons

Les espèces de bois sont conventionnellement réparties en cinq classes de durabilité.
Elles expriment uniquement la résistance contre les champignons, pas contre les insectes.
La répartition repose sur un test simple : un poteau de 50x50 mm est partiellement enfoui dans le sol. Plus la longévité du duramen est élevée dans cet environnement agressif, plus le bois est durable. La Belgique connaît les classes de durabilité suivantes pour le duramen :
- classe de durabilité naturelle I : très durable (> 25 ans)
- classe de durabilité naturelle II : durable (de 15 à 25 ans) ;
- classe de durabilité naturelle III : moyennement durable (de 10 à 15 ans) ;
- classe de durabilité naturelle IV : peu durable (de 5 à 10 ans) ;
- classe de durabilité naturelle V : très peu durable (moins de 5 ans).

L'aubier n'est jamais durable et appartient à la classe de durabilité naturelle V.

• Résistance naturelle contre les insectes

La résistance naturelle contre l'attaque des insectes n'est pas catégorisée. Elle est classifiée selon un système de « tout ou rien » : une espèce de bois peut être attaquée par un insecte spécifique ou ne pas l'être. Les principaux insectes attaquant le bois dans le bâtiment sont : le capricorne, qui attaque uniquement les résineux ; le Lyctus, qui attaque uniquement les bois feuillus ; la petite vrillette ou Anobium, communément appelée « ver à bois ».

Classes de risques (préservation en fonction de l'usage)

Le procédé de préservation du bois dépend de sa classe de risque. Celle-ci est définie par la norme européenne EN 335, en fonction de l'usage ou de l'application du bois. La norme européenne définit cinq classes de risque ; à chaque classe correspond un procédé de préservation.

• Classe de risque 1 : bois utilisé en intérieur sec
Le faible taux d'humidité du bois pour les applications intérieures rend généralement impossible l'attaque des champignons. Le risque d'attaques par des insectes est, lui aussi, très faible.
• Classe de risque 2 : charpenterie et toitures plates
Le bois pour la charpenterie, les toitures plates et les structures portantes de constructions à ossature en bois reste normalement sec. L'humidité relative de l'air peut toutefois être supérieure à 70 % pendant de longues périodes. Il existe alors un risque d'humidification temporaire. Dans la pratique, tous les résineux nécessitent une préservation colorée ou incolore.
• Classe de risque 3 : constructions exposées au vent et aux intempéries
Le bois exposé aux intempéries court davantage de risques d'attaque. Seules les espèces de bois avec une classe de durabilité naturelle I, II (ou III) n'exigent pas de traitement préventif. Toutes les autres espèces requièrent une préservation.
• Classe de risque 4 : bois en contact avec le sol ou l'eau douce
C'est dans ces circonstances que le bois est naturellement décomposé. Seules certaines espèces de bois avec une classe de durabilité naturelle I ou II offrent une résistance suffisante contre la menace des champignons et des insectes. Dans tous les autres cas, une préservation est exigée
• Classe de risque 5 : bois en contact avec l'eau salée
Ces utilisations sont exceptionnelles et exigent une préservation.

Réaction au feu et Résistance au feu (Rf)

En sécurité incendie, la « réaction au feu » et la « résistance au feu » sont deux choses différentes. Elles sont codifiées au niveau national et européen de manière très réglementée.
La réaction au feu d'un matériau ou d'un élément de construction caractérise son aptitude à alimenter le feu. C'est la manière dont un matériau va se comporter en tant que combustible. Un matériau peut être qualifié :
- d'inflammable ou d'ininflammable selon la tendance d'un matériau à dégager des gaz susceptibles de produire des flammes
- de combustibles ou de non-combustibles selon la tendance d'un matériau à transmettre la chaleur en fonction de l'échauffement.

Cette réaction est définie après des essais normalisés au sein de centres agréés.
Le système de classification européen appelé « Euroclasses » comprend 7 classes de réaction au feu :
- classes A1 et A2 correspondent aux produits non combustibles
- B : produit faiblement combustible
- C : produit combustible
- D : produit très combustible
- E : produit très inflammable et propagateur de flamme
- F : produit non classé ou non testé

Deux classements relatifs à la production de fumée et de gouttes ou particules enflammées complètent la classification principale. Le classement « fumée » n'évalue pas la toxicité de celles-ci.

La résistance au feu (Rf) d'un élément de construction est le temps exprimé en minutes pendant lequel un élément de construction satisfait simultanément aux critères suivants :
- la stabilité : temps pendant lequel l'élément conserve sa fonction portante (pour les éléments à fonction portante).
- l'étanchéité aux flammes : temps pendant lequel il n'y a pas de flammes qui passent du côté de la paroi non exposée (pour les éléments à fonction séparative).
- l'isolation thermique : temps pendant lequel la température n'augmente pas au-dessus d'un certain seuil thermique du côté non exposé.

Un élément doit toujours satisfaire aux fonctions qui lui sont dévolues, ces fonctions peuvent être portante, séparative ou à la fois portante et séparative :
- un élément ayant une fonction portante est un élément qui, faisant partie d'un système porteur, supporte des charges extérieures et est sollicité par un effort normal et/ou en flexion et/ou par un effort tranchant et/ou en torsion.
- un élément ayant une fonction séparative est un élément qui, pendant la durée correspondant à la résistance au feu exigée, empêche un incendie, né dans un local adjacent, de s'étendre à d'autres locaux adjacents. On considère qu'un élément ne remplit plus sa fonction séparative lorsqu'il laisse passer des flammes ou des gaz ou que la face non exposée chauffe au-dessus d'un certain seuil de température.

A l'heure actuelle en Belgique, l'évaluation de la résistance au feu peut s'effectuer par des essais, suivant la norme NBN 7133-020 « Résistance au feu des éléments de construction » et/ou les normes européennes:
- NBN EN 13501-2(2004) : Classement au feu des produits de construction et des éléments de bâtiment - Partie 2: Classement à partir des données des essais de résistance au feu, services de ventilation exclus
- NBN EN 13501-3 (2006) : Classement au feu des produits et éléments de bâtiment - Classement utilisant des données d'essais de résistance au feu de composants d'installations de services de ventilation - Partie 3 : Conduits et clapets résistants au feu
- EN 13501-4 : Classification de la résistance au feu de produits et éléments de construction - Partie 4: Classification des résultats des tests de la résistance au feu des composants de dispositifs de contrôle de fumée

1.5. Evaluation des performances des matériaux

Les propriétés et les performances des matériaux de construction peuvent être évaluées au moyen de diffé-

rents essais normalisés.
Les résultats obtenus par les matériaux sont repris à la fois dans le marquage CE et dans les ATG ou Avis/Agréments Techniques.

Marquage CE[25]

Le marquage CE, imposé dans le cadre de la directive européenne «Produits de construction», signifie que le produit est conforme à une spécification technique européenne harmonisée. Il est donc apte à être mis sur le marché européen et à y circuler librement.
La Directive Produits de Construction (DPC) exige que les matériaux de construction permettent la réalisation d'ouvrages qui satisfont à six exigences essentielles de sécurité, de santé publique, de protection des consommateurs et de l'environnement.
Cette directive européenne a été promulguée le 21 décembre 1988 et publiée sous le numéro 89/106/CEE.
Les exigences essentielles, définies par les Etats membres, sont traduites en critères repris dans des spécifications techniques harmonisées et sur base desquels un produit est évalué. En fonction des mandats donnés par la Commission européenne, les spécifications techniques sont élaborées soit par le Comité Européen de normalisation (CEN) sous la forme de normes harmonisées européennes, soit par l' «European Organistion for Technical Approvals» (EOTA) sous la forme d'agréments techniques européens (ETA).
Moyennant accord formel de la Commission européenne, une norme nationale ou un guide d'agrément peuvent être reconnus comme spécification technique.
La mise sur le marché ainsi que la libre circulation d'un produit ne sont autorisées que si celui-ci satisfait aux spécifications techniques harmonisées européennes. Cette exigence est matérialisée par l'apposition sur le produit du marquage . Le niveau d'attestation de conformité à utiliser pour l'application du marquage est également défini dans le mandat donné par la Commission.
Le système choisi varie en fonction du produit et de son utilisation. Pour les produits présentant un risque faible pour l'utilisateur et pour l'environnement, le producteur est habilité à déclarer lui-même que son produit satisfait aux exigences essentielles. Pour les produits à plus haut risque, la procédure de déclaration de conformité fait appel à des «organismes notifiés»
Le marquage n'est donc pas une marque de qualité au sens des marques de conformité habituellement reconnues en Belgique : BENOR et ATG.

Marque BENOR

La marque BENOR est une marque officielle (et une marque de qualité) attribuée à un produit ou matériau de construction traditionnel conforme aux exigences de normes belges ou de prescriptions techniques (aussi appelées spécifications).
Les spécifications pour les produits aux matériaux de construction traditionnels sont reprises dans des normes belges (NBN) et/ou des prescriptions techniques (PTV, Prescriptions Techniques/Technische Voorschriften).
Les spécifications sont considérées comme les «règles de l'art» et contiennent le meilleur état des connaissances en ce qui concerne les aspects techniques auxquels elles se rapportent et sont rédigées par des commissions d'experts techniques dans cette matière.
Les normes NBN sont publiées par l'Institut belge de Normalisation (IBN).

Agrément technique européen (ETA) et Avis technique (ATG)

L'agrément technique européen ETA est une conséquence directe de la Directive Produits de Construction (89/106/CEE) et est un instrument qui a pour objectif principal de démontrer que la réglementation relative à la mise sur le marché des produits de construction est suivie.
L'ETA est une évaluation technique favorable de l'aptitude à l'usage d'un produit pour un usage prévu, basé sur le respect des exigences essentielles pour les ouvrages de construction dans lesquels le produit est utilisé. C'est une spécification technique, comparable aux normes harmonisées, mais publiée par un organisme membre de l'EOTA pour un produit particulier d'un fabricant particulier.
La délivrance d'ETA est basée sur des essais, des examens des produits et une évaluation par rapport aux exigences essentielles de la DPC et aux documents interprétatifs en rapport avec le produit spécifique.

L'agrément technique ATG[26] donne un avis technique en incluant une description et des caractéristiques techniques.
L'ATG est un avis favorable sur un produit de construction déterminé, d'un seul fabricant et pour une application bien définie.
Il doit permettre à l'utilisateur de vérifier la conformité des produits livrés sur chantier avec l'agrément existant.
Les ATG sont délivrés pour des produits pour lesquels il n'existe pas de normes produits. Il s'agit donc principalement de systèmes, produits innovants et produits faits de plusieurs composants. En principe, un ATG est délivré sur la base d'un guide d'agrément. Un tel guide est rédigé par des spécialistes de l'Union belge pour l'Agrément technique dans la construction (UBAtc) et forme une base d'appréciation pour produits de construction.
L'ATG est, le plus souvent, accompagné d'une certification, ce qui veut dire qu'un organisme de certification mandaté par l'UBAtc exerce, avec une fréquence déterminée, un contrôle externe sur la conformité de la production avec l'agrément publié. Ces sondages ou véri-

25 Source: http://qc.spw.wallonie.be/fr/materiaux/marqce.html

26 Source: http://www.ubatc.be/index.cfm?n01=technical_approval&n02=atg_whatis

fications sont spécifiés dans une convention rédigée au moment de la remise de l'ATG. Dans cette convention, on stipule comment le fabricant organise son autocontrôle sur la production et quels sont les essais externes qui accompagnent ce contrôle.
Un ATG est valable pour une période de trois ans, à condition que la certification ne donne pas lieu à l'annulation ou au retrait.
L'ATG est un système volontaire qui existe déjà depuis plusieurs dizaines d'années; il vise l'aptitude de produits, d'éléments de produits et de composants de systèmes de construction pour une application bien déterminée dans la construction.

.

2. Le bois

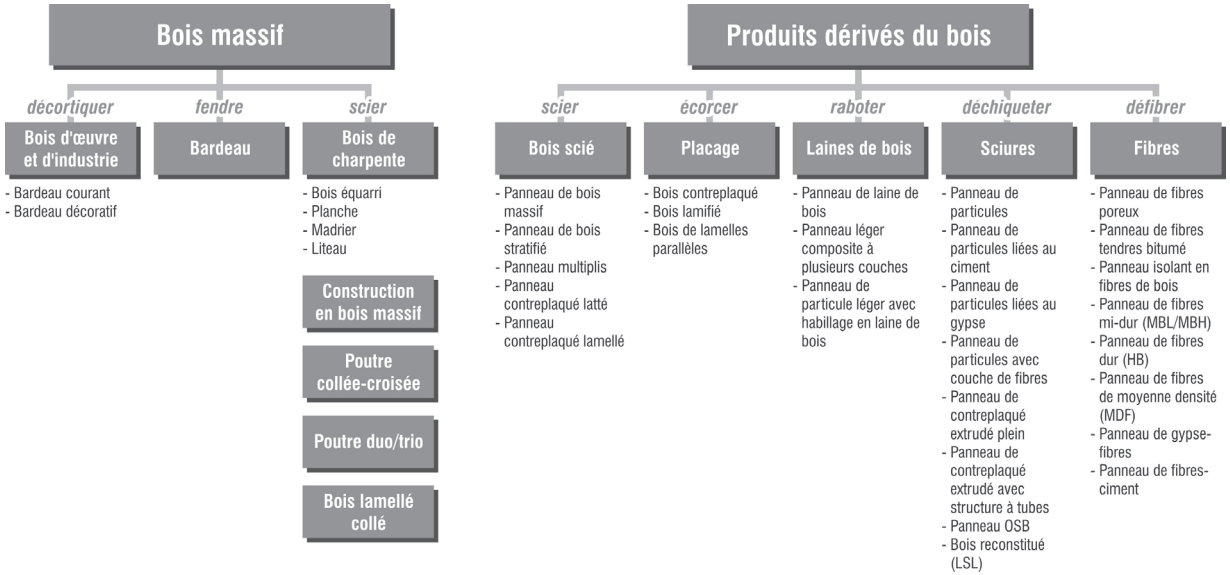


Illustration A3.7 : Descriptif des produits en bois ou à base de bois

« *Alors que la matière se révèle communément dans les profondeurs de la terre, arrachée au prix fort d'obscures extractions, concassée, pétrie, chauffée pour se présenter à nos yeux sous forme de semi-produits homogènes et ajustés à l'usage, le bois se singularise en se fabriquant sous nos yeux, dans la plus évidente familiarité.* » Source : [KULA 2009]

« *Le lien qui unit homme et arbre remonte à l'époque préhistorique, il passe par le magique, le mythique, le mental, il arrive jusque dans notre présent. Les arbres sont des archétypes de l'humanité* » J.Wiedermann



Illustration A3.8 : Différentes mises en œuvre du matériau bois

3. La pierre naturelle

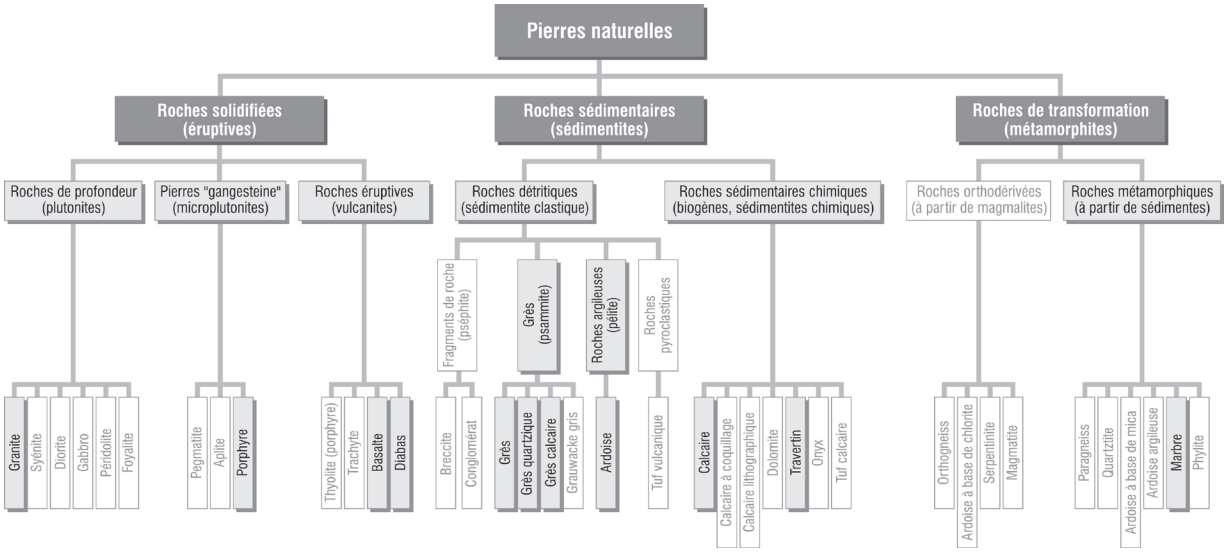


Illustration A3.9: Descriptif des différentes roches et pierres naturelles



Illustration A3.10 : Mise en œuvre de pierres naturelles

«Gravé dans la pierre, notre passé surgit parfois au détour d'un bâtiment habité de murmures des tailleurs de pierre.Matériau de la mémoire - du temps des cathédrales et des folles édifications vers les cieux, support fidèle des mégalomanies architecturales, la pierre dure, promet la prospérité...»
Source: [KULA 2009]

4. Les matériaux en terre crue

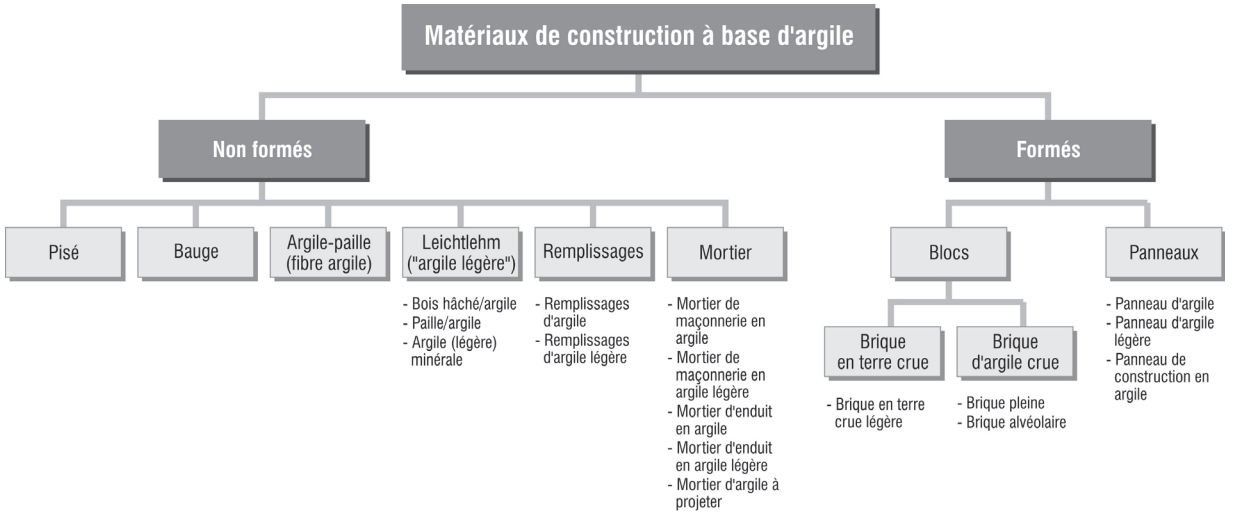


Illustration A3.11: Descriptif des différents produits/matériaux en terre crue



Illustration A3.12: Mises en œuvre et produits en terre crue

5. La terre cuite ou céramique

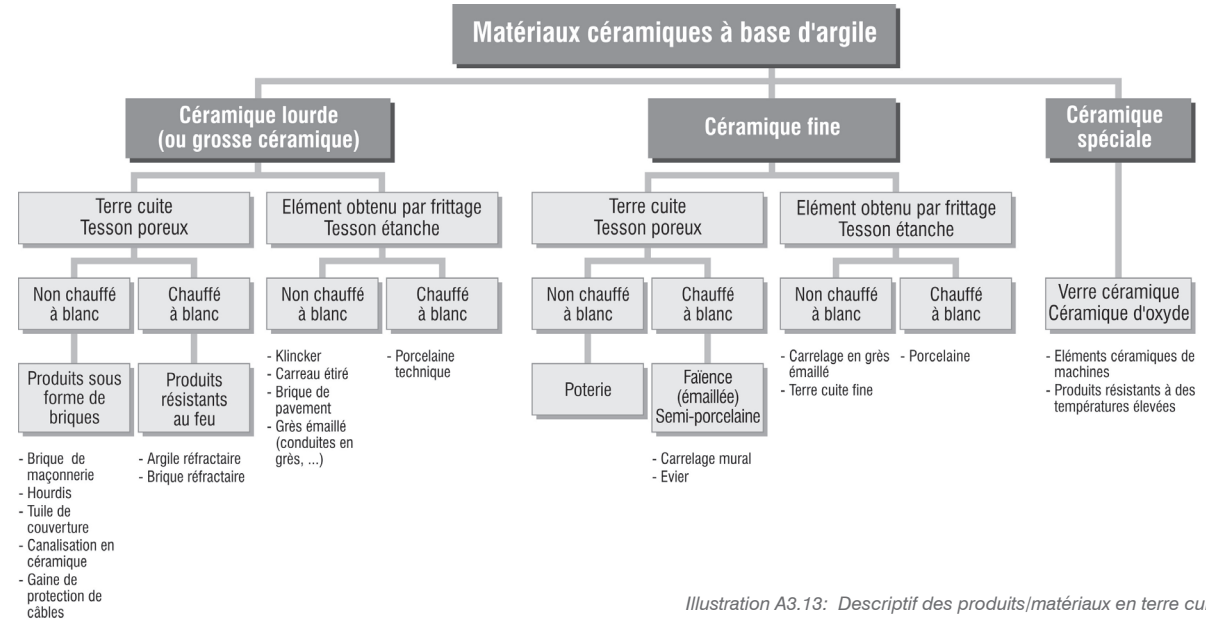


Illustration A3.13: Descriptif des produits/matériaux en terre cuite



Illustration A3.14: Mises en œuvre de briques de parement

6. Les métaux

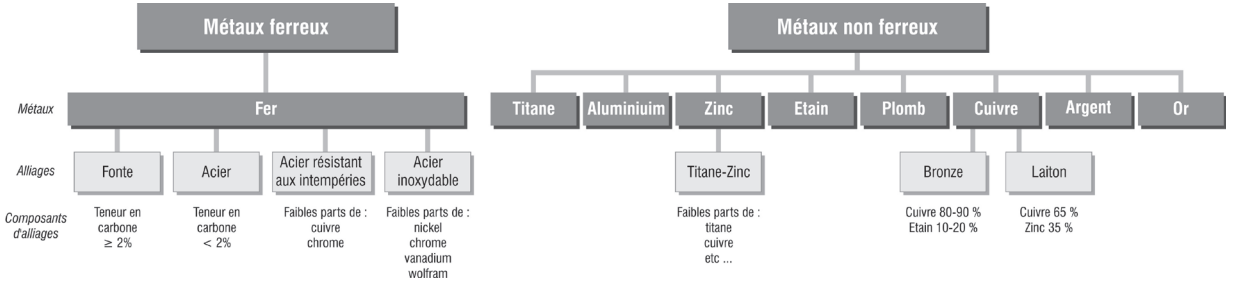


Illustration A3.15 : Descriptif des différents métaux

« Le fer est à la fois le meilleur et le pire outil dans la vie. Avec lui, nous retournons la terre, nous plantons des arbres, nous taillons les haies et coupons des grappes de la vigne ; avec lui nous construisons des maisons et cassons des pierres. Nous en avons besoin pour bien de choses utiles. Mais aussi pour la guerre, le vol et le meurtre… Car en faisons voler le fer au-dessus de nos têtes, nous avons donné des ailes à la mort. »
Pline (1er siècle apr. J.-C.)



Illustration A3.16 : Eléments et mise en œuvre de produits métalliques

7. Liants minéraux, mortiers et produits dérivés

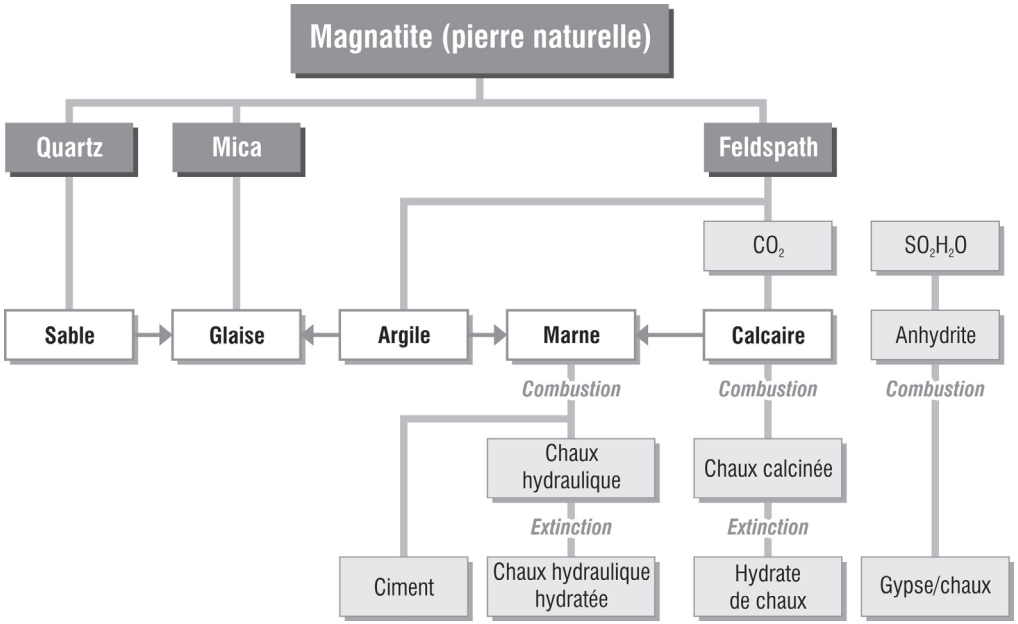


Illustration A3.17: Descriptif des matériaux et produits à base de liants minéraux



Illustration A3.18 : Mises en œuvre de produits à base de liants minéraux

8. Le béton

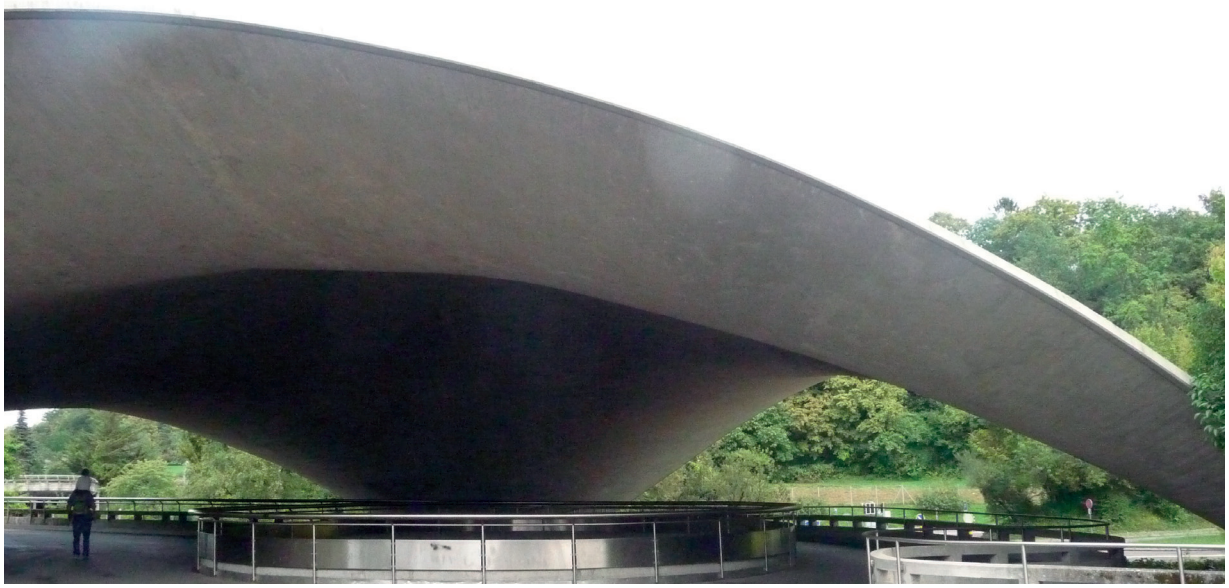


Illustration A3.19 : Coque en béton armé - Lausanne

« Le béton, c'est de la pierre que nous fabriquons, bien plus belle et plus noble que la pierre naturelle.» Auguste PERRET

« Associé à l'uniformité, à la rigidité, à une couleur grisâtre, il en est pourtant l'exact contraire: le béton n'a aucune couleur, aucune texture ou forme prédéterminée. Il n'a pas d'apparence propre, mais une infinité d'apparences possibles. Et c'est là la révolution architecturale induite par le béton: être une pâte prête à la création.» Source: [KULA 2009]



Illustration A3.20 : Mises en œuvre intérieures et extérieures de bétons

9. Le verre

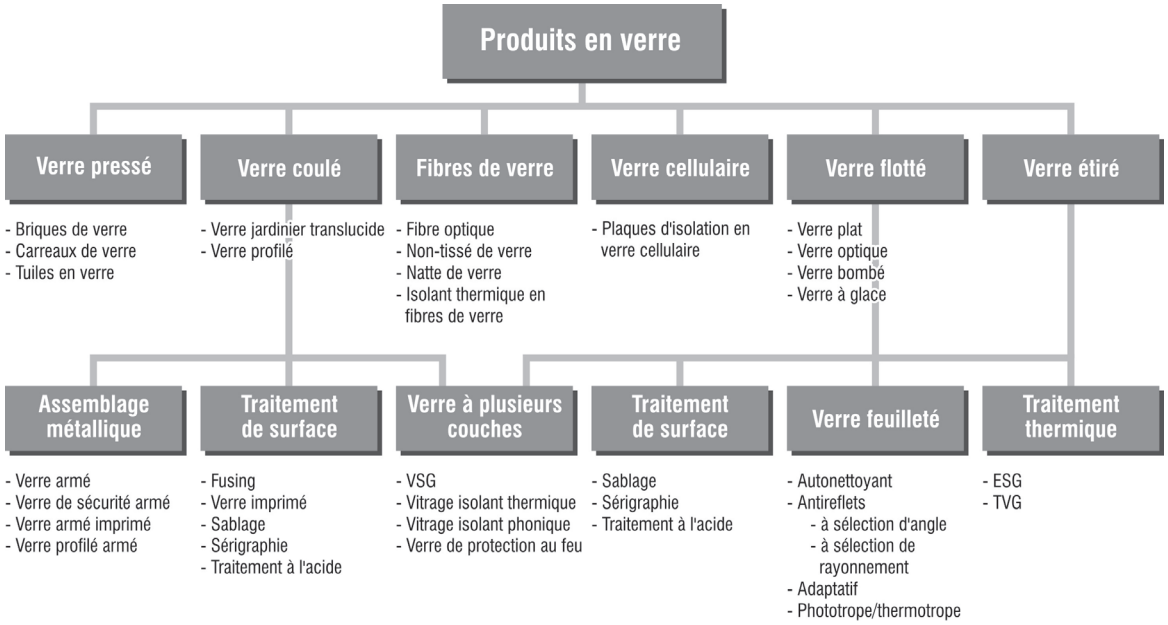


Illustration A3.21 : Descriptif des produits en verre

Avicenne disait du verre qu'il «est parmi les pierres comme un fou parmi les hommes». Une folie domestiquée, au fil des siècles, pour un matériau toujours paradoxal: si le propre de la matière est en effet d'apparaître pour affirmer sa réalité, le verre, lui, se révèle en disparaissant!» Source: [KULA 2009]



Illustration A3.22 : Mises en œuvre de produits verriers

10. Les plastiques

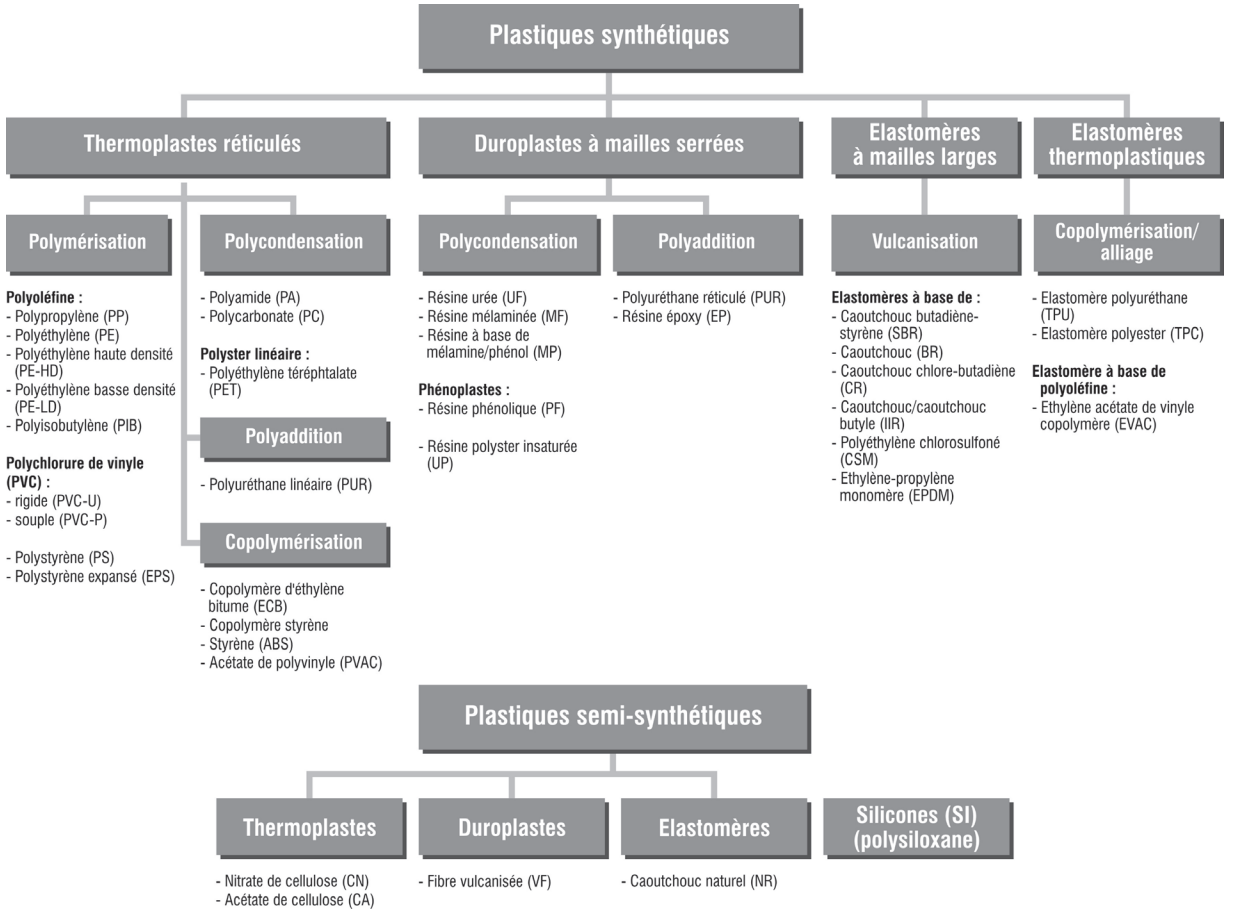


Illustration A3.23 : Descriptif des matériaux et produits plastiques

11. Les matériaux bitumineux

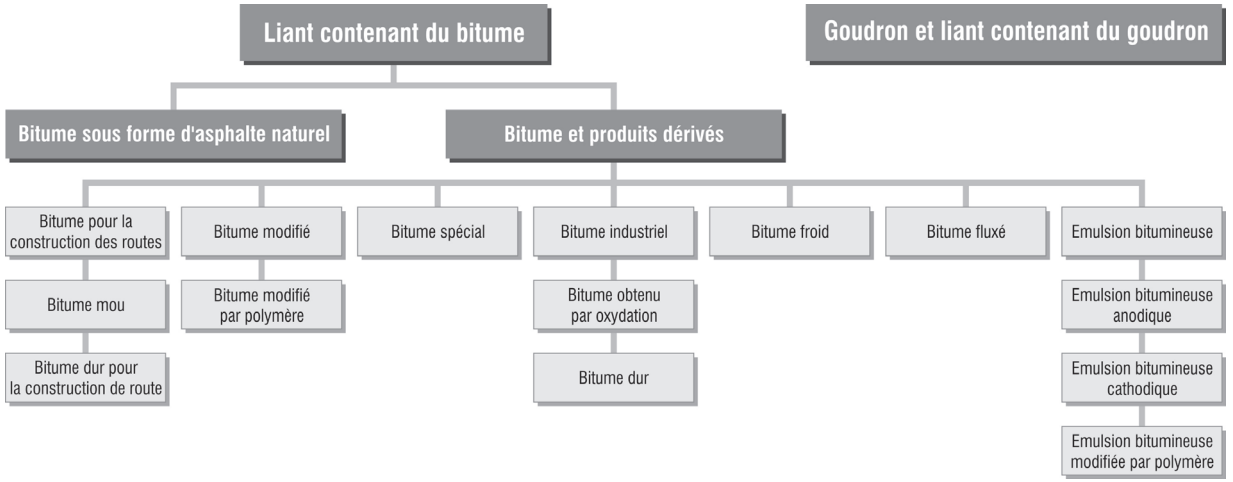


Illustration A3.24 : Descriptif des produits bitumineux

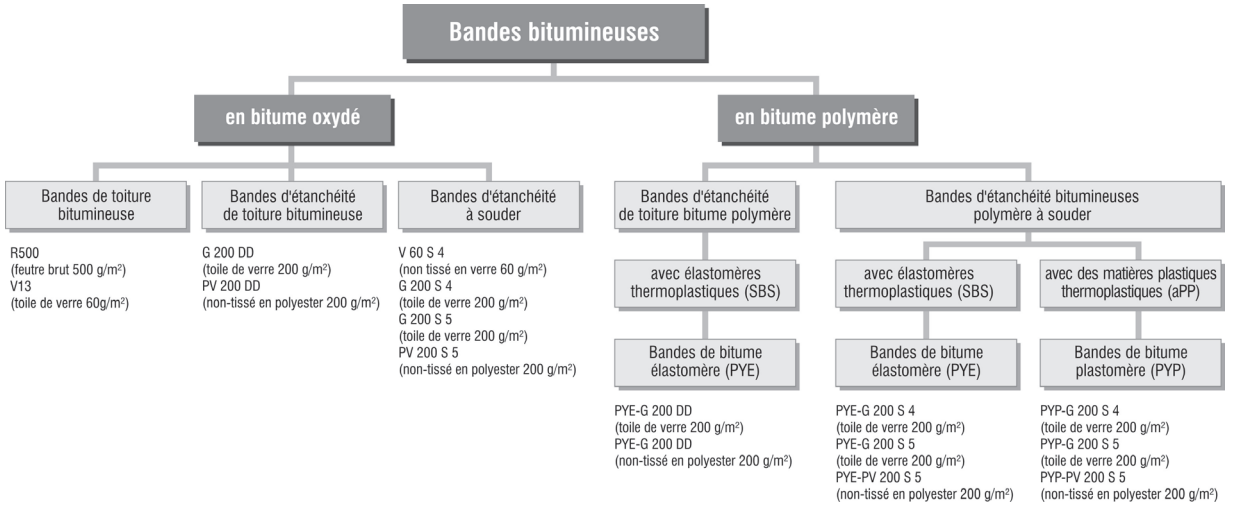


Illustration A3.25 : Descriptif des bandes bitumineuses

12. Les matériaux isolants

Isolants thermiques

Inorganiques, minéraux

en matériaux naturels

- Perlite
- Perlite expansée
- Pierre ponce naturelle
- Argile expansée

en matériaux synthétiques

- Verre cellulaire
- Laine de verre
- Laine de roche

Organiques

en matériaux naturels

- Coton
- Lin
- Granulat de céréale
- Chanvre
- Fibre de bois
- Panneau de laine de bois
- Fibre de coco
- Laine de mouton
- Roseau
- Paille
- Fibre de cellulose

en matériaux synthétiques

- Mousse en résine d'urée-formaldéhyde
- Mousse phénolique
- Fibres de polyester
- Polystyrène expansé (EPS)
- Polystyrène extrudé (XPS)
- Polyuréthane rigide (PUR)

Illustration A3.26 : Descriptif des produits isolants

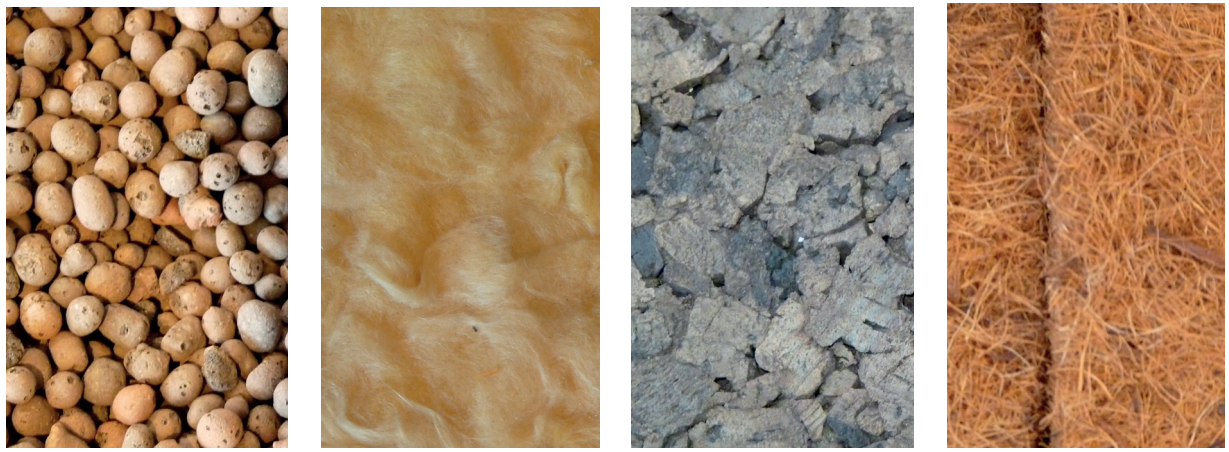


Illustration A3.27 : Matériaux isolants

Conclusions

Depuis la sédentarisation, l'homme a utilisé pour construire son habitat des matériaux ou des matières présents dans son environnement immédiat : les peaux de bêtes, la terre crue, le bois, la matière végétale et parfois la pierre.
Pendant des milliers d'années, l'offre de matériaux de construction est restée limitée à ces quelques matières, mais cette contrainte n'a pas empêché l'architecture d'évoluer: au fil de l'histoire, l'homme a de mieux en mieux maîtrisé les techniques et la géomètrie pour concevoir, modeler et dompter celles-ci afin de leur donner la forme souhaitée.
De tout temps, l'homme a essayé d'épuiser ou de dépasser le potentiel « conceptuel » des matériaux disponibles. L'évolution des civilisations a ainsi permis l'acquisition d'un savoir-faire humain et l'amélioration des techniques.
C'est le cas des matériaux traditionnels dont la terre crue que l'homme a utilisé pour bâtir des murs. Après avoir cuit la terre pour la réalisation d'objets usuels, il a appliqué sa technique de cuisson aux matériaux de construction. Les problèmes liés à la stabilité des empilements de briques ou de pierres l'ont ensuite conduit à inventer et composer des mortiers: bitume naturel, mélange de terre et de matières organiques,... jusqu'au mortier que nous connaissons aujourd'hui.
On peut encore citer l'évolution de la construction en pierre, notamment au travers des différentes architectures religieuses du Moyen-Âge et de la Renaissance.

Jusqu'au milieu du 19e siècle, la disponibilité des matériaux, les propriétés physiques de ceux-ci ainsi que les possibilités techniques de mise en œuvre ont dictés l'architecture.
Les possibilités formelles étaient limités aux matériaux locaux ou régionaux ainsi qu'aux technologies de mise en œuvre traditionnelles.
L'homme utilisait les matériaux de manière avisée et rationnelle en fonction des caractéristiques et des réponses données par ceux-ci en termes de protection, de confort et de durée de vie. La disponibilité locale et les potentialités de réemploi étaient déterminantes.

L'architecture est également et pendant longtemps restée tributaire, d'une part, de la nécessité des jeux de force et de la structure de l'édifice et, d'autre part, des moyens limités de l'homme notamment en force et en énergie.
Avec l'apparition de matériaux nouveaux comme la fonte, le fer forgé, l'acier ou encore le béton armé, de nouvelles possibilités s'offrent aux architectes, notamment au niveau de la capacité de charge et de résistance à la traction: les murs épais en pierre ou en brique ne sont plus indispensables, l'acier ou la fonte permettent des systèmes structurels à ossature fine et aérienne.
Autre phénomène important : l'enveloppe ne doit plus être porteuse, elle se détache de la structure. Cette scission est fondamentale. Elle modifiera profondément la conception de l'architecture: la façade ne devant plus assurer une fonction portante, se libère, ouvre l'édifice et peut se couvrir de diverses matières dont le verre.
Le début du 20e siècle voit aussi le développement d'autres matériaux nouveaux, grâce notamment à l'évolution des connaissances scientifiques.
Ces matériaux ne sont pas le fruit du travail des architectes, mais plutôt le résultat de recherches dans d'autres domaines d'activité comme l'armement, le transport et l'industrie dont en grande partie l'industrie chimique.
Ce n'est que très récemment que les matériaux de construction sont devenus un terrain de recherche propre à la construction.
Les deux Guerres mondiales et la période d'entre-deux-guerres sont marquées par des progrès techniques et industriels considérables ainsi que par le développement massif des moyens de transport, essentiellement

routiers et aériens.
Ces périodes ont permis l'apparition des matériaux plastiques, des matériaux dérivés du bois, de l'aluminium et autre métaux non ferreux.

L'ensemble de ces progrès techniques et de ces découvertes sont le résultat d'une conjonction de plusieurs facteurs.
Le principal facteur de progrès est l'accès à d'autres sources d'énergie que le bois. L'utilisation intensive du bois tant pour la construction que pour le chauffage et les activités industrielles (métallurgie, verrerie...) a provoqué, en Europe, un déboisement considérable menant à la disparition de certaines forêts. Il devenait urgent et indispensable de trouver d'autres sources d'énergie.
La distillation de la houille puis l'emploi du charbon et du coke et enfin la découverte du pétrole ont contribué au déploiement de possibilités énergétiques jamais inégalées jusqu'alors en décuplant la rentabilité et l'efficacité des procédés industriels : augmentation des montées en température (verrerie, sidérurgie, métallurgie), accélération des processus, modification de la composition chimique et/ou atomique des matières, etc.
Après l'Âge de la pierre, du cuivre, du bronze et du fer, l'homme est entré, depuis deux siècles, dans l'Âge des combustibles fossiles.
Les autres facteurs de progrès qui découlent du premier sont la globalisation du commerce et de la communication, le développement du transport à grande échelle et l'évolution de la société vers une société de consommation. Cette évolution, fait distinctif de ces deux derniers siècles, a entraîné une augmentation considérable de la population et une consommation démesurée des ressources naturelles en combustibles fossiles, en eau, et en matériaux.

Depuis deux siècles, les découvertes liées aux matériaux ne font que s'accélèrer, parallèlement ou en suivant les progrès technologiques, industriels et scientifiques.
Face à cette situation, plusieurs constats peuvent être établis:
- notre société est passée en moins de deux siècles de l'artisanat à l'industrie de masse, c.-à-d. d'une situation où un homme et un savoir-faire maîtrisaient l'intégralité d'un processus de fabrication à une production industrielle où chaque problème et chaque acteur est isolé;
- l'évolution de notre société vers une industrie de masse a également bouleversé et inversé notre rapport à la nature. Si pendant longtemps les matériaux et les techniques constructives ont permis à l'homme de se protéger contre une nature hostile, c'est aujourd'hui l'homme et ses activités qui affaiblissent ou détruisent celle-ci;
- le trait d'union quasi universel qui existait entre un lieu et son architecture, grâce entre autres aux matériaux et aux techniques de construction, tend à disparaître vu l'immense palette de matériaux disponibles et la facilité avec laquelle les matériaux sont transportés d'un bout à l'autre de la Terre.

Ces états de fait nous placent, en tant que concepteur, d'une part dans une situation d'hyperchoix, et d'autre part, dans une situation de « non maîtrise » de la matière et de ses caractéristiques techniques.
Les nouveaux modes de communication favorisent davantage ce phénomène car ils permettent d'être avisé en temps réel des dernières découvertes.
Ces modes de communication, notamment les médias et les outils informatiques ont modifié nos habitudes visuelles en deux voire trois décennies.
Nous sommes quotidiennement confrontés à un flux permanent et très rapide de sons et d'images en couleur.
L'écran de télévision à la maison et l'écran d'ordinateur sur le lieu de travail nous renvoient en permanence des sons, des images, des surfaces scintillantes...
L'outil informatique, de plus en plus performant, est devenu un instrument indispensable dans le métier d'architecte tant au niveau de la conception que de la simulation. Cependant, son utilisation non réfléchie a des implications importantes sur le travail de l'architecte en entraînant parfois celui-ci vers une architecture conceptuelle, entièrement dédiée à l'image et vidée de toute substance.
L'architecture dédiée uniquement au regard implique un intérêt croissant pour la surface et ce faisant, pour le matériau qui devient le centre d'intérêt du concepteur.
La matière devient le parti architectural. Il n'est plus question de vérité constructive, mais plutôt de la présence volontaire de la matière, de ses qualités esthétiques et réelles, de ses couleurs et de ses textures .
Les qualités de surface du matériau sont mises en scène, la matérialité intrinsèque du matériau est négligée au profit de l'image, la fonctionnalité est abandonnée au profit de la signification.

Pourtant l'architecture ne peut être réduite à une relation avec le regard. Elle concerne tous nos sens car tout édifice est avant tout un espace qui s'appréhende avec le corps. Dans ce dialogue entre corps et espace, les matériaux de construction et leur mise en œuvre occupent la première place: l'espace n'est pas perçu en tant que tel, mais à travers la perception de la matière. Nous percevons les textures, les couleurs, les dimensions qui forment l'espace. Les parois - murs, plafonds, planchers - sont caractérisées par des textures, des couleurs - lisses ou rugueuses, opaques, fermées, froides ou chaudes, brillantes, transparentes...
Ces jeux de matière, de texture, de couleur, de forme vont générer des rapports dynamiques de proportion, de relation et/ou de contraste qui vont évoluer en fonction de la lumière et qui vont éveiller des sensations visuelles, mais aussi olfactives, tactiles et auditives.

Certains architectes, comme Tadao Ando et Peter Zumthor et d'autres plus proches de chez nous ont démontré dans leur travail, l'intérêt de conjuguer la matérialité intrinsèque et la matérialité visible des matériaux de construction. Ceux-ci sont choisis avec soin, pour leurs caractéristiques techniques, mais également pour leurscaractéristiques de surface qui sont en relation harmonieuse avec un lieu, un environnement...

Chaque matériau de construction a des propriétés techniques, environnementales et sanitaires spécifiques. Chaque matériau définit des modes constructifs qui lui sont propres. Chaque matériau présente des avantages et des contraintes. Le matériau idéal n'existe pas, mais l'intégration des trois matérialités présentes dans chaque matériau, permet de concevoir une architecture honnête, en adéquation avec le lieu dans laquelle elle s'implante et avec sa fonction.
La connaissance et la conjugaison de ces trois matérialités est donc indispensable et indissociable à la fois d'une conception architecturale et d'un processus industriel soutenables.

En tant que concepteur, l'architecte doit idéalement concilier ces trois matérialités.
Au vu de la description des grandes familles de matériaux, il semble évident qu'il existe déjà de nombreuses interactions entre la matérialité intrinsèque et la matérialité soutenable. Les matières premières utilisées, les transformations subies lors du procédé de fabrication, les possibilités de mise en œuvre vont influencer la consommation des ressources, la pollution de l'atmosphère, la pollution de l'air intérieur et la production de déchets.
En outre, les défis énergétiques et les priorités de l'architecture soutenable amènent aujourd'hui tout concepteur à réfléchir davantage à la fonction des matériaux qu'il utilise. Il doit considérer l'ensemble des parois d'un bâtiment et l'enveloppe comme une « peau multicouches » qui joue un rôle de filtre face aux conditions extérieures (climat, bruit, sécurité...) et interagit avec l'ambiance intérieure et l'occupant. Mais aussi comme une « peau » dont l'existence et le cycle de vie influent sur l'environnement et la santé.
Les différents composants de cette « peau » devront répondre, d'une part, aux exigences de protection, de confort et de conservation des performances et d'autre part aux exigences environnementales et sanitaires.
Ces exigences ne seront atteintes que par un choix réfléchi et une mise en œuvre adaptée des matériaux de construction en considérant la matière autrement ou avec davantage de sens.
La matérialité visible et la matérialité soutenable pourront ainsi naturellement être conciliées par un traitement avisé et raisonné de la matière, c.-à-d. l'abandon de jugement sans nuance.

En termes d'innovation, si chaque jour qui passe voit l'apparition de nouveaux matériaux sur le marché de la construction, on peut affirmer que l'homme n'a pas encore exploité toutes les possibilités offertes par la matière qui porte en elle des potentialités gigantesques d'innovation.
Si certains mettent en avant les matières plastiques, synthétiques ou naturelles et imaginent des matériaux réactifs, intelligents ou même vivants... si d'autres voient les matériaux composites comme le futur de la matière, dans le sens où ceux-ci réuniront différentes combinaisons de fonctions et de performances, n'oublions pas que les matériaux traditionnels, parfois très anciens, peuvent également être améliorés tant dans leur composition, leur procédé de fabrication, leur mise en œuvre ou leur fin de vie.
Ces matériaux traditionnels, le bois, la pierre, la terre cuite, les matières végétales, la chaux, l'argile nous ont accompagnés tout au long de l'histoire des civilisations. Ils ont supporté les évolutions architecturales, techniques, économiques et sociales en démontrant une capacité d'adaptation aux exigences humaines.
Ces matériaux sont ancrés dans notre inconscient collectif. Ils sont le reflet d'une vie en harmonie avec l'environnement. Nous les avons extraits, nous les avons malaxés, interrogés, mis en œuvre à main nue. Ils nous ont protégé du froid, du chaud, de la pluie , du vent et de la nature hostile...
Abondants, faciles à façonner et à mettre en œuvre, ces matériaux sont à nouveau sur le devant de la scène architecturale qui se focalise davantage sur le confort et la santé, mais également sur la relation qu'elle entretient avec l'environnement et la nature.
Si l'être humain a cette capacité d'explorer le potentiel de tout matériau, il ne pourra le faire qu'en intégrant les priorités du développement durable.
Les progrès technologiques et les recherches industrielles devront aller dans le sens d'une conciliation entre réduction des impacts environnementaux et sanitaires et amélioration de la qualité de vie, à toute échelle de temps, d'espace et de société.

Notre monde est à l'aube d'une grande mutation. Il n'a pas encore fini d'explorer et d'innover, mais pour le faire durablement, il doit rapidement lutter contre l'inertie, l'habitude, les idées reçues et garder un esprit ouvert et moderne.
Gardons à l'esprit que rien n'est impossible pour celui qui se donne la peine de chercher...

Partie B

Matériau de construction et Cycle de vie

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre 1 - Le cycle de vie: de la matière première au déchet **87**

Extraction des matières premières 87
Fabrication et procédés de transformation de la matière première 90
Chantier, mise en œuvre et assemblage 92
Vie en œuvre 94
Démolition - déconstruction 94
Fin de vie: élimination, valorisation, traitement 95

Chapitre 2 - Les matières premières: exploitation et consommation des ressources **97**

Nature de la matière 97
Matières premières et ressources 99
Différentes ressources 99
Disponibilité des ressources 103
Exploitation des ressources 107
Conséquences de l'exploitation des ressources 108

Chapitre 3 - Les processus de fabrication: impacts sur la qualité de l'air, du sol et de l'eau **110**

Cycles biogéochimiques 110
Émission de gaz à effet de serre et réchauffement climatique 116
Acidification de l'atmosphère 122
Eutrophisation des écosystèmes 125
Pollutions liées à l'ozone 127

Chapitre 4 - Les matériaux et leur transport, quels impacts? 134
Histoire du commerce et évolution du transport de marchandises 135
Géographie des flux de transport en Belgique 139
Modes de transport alternatifs au transport routier 140
Impacts environnementaux des différents modes de transport 141
Scénarios de transport et analyse des impacts 143
Transport de quelques matériaux sur le cycle de vie 151
Vers un transport de marchandises plus soutenable 154

Chapitre 5 - Les matériaux de construction et la santé 157
Impact sanitaire des polluants atmosphériques 158
Fabrication et mise en œuvre : produits toxiques et substances nocives 165
Matériaux de construction et qualité de l'air intérieur 169

Chapitre 6 - Les matériaux en fin de vie et la production de déchets 175
Législation européenne en matière de déchets et de déchets de construction 176
Législation belge en matière de déchets et de déchets de construction 178
Classes de déchets de construction 180
Filières d'élimination: description, incidences et coût économique 180
Filières de valorisation 183
Décyclage et recyclage, une nuance importante 184
Implications de la prévention et de la valorisation des déchets dans le projet 185

Conclusion de la Partie B 189

Le cycle de vie, de la matière première au déchet

Le cycle de vie d'un matériau peut être défini comme une succession d'étapes ou de transformations que celui-ci subit tout au long de sa durée de vie :

- l'extraction et/ou la récolte et la préparation des matières premières nécessaires à la fabrication du produit de construction ;
- la fabrication qui le plus souvent nécessite plusieurs phases de transformation de la matière ;
- la mise en œuvre ou la mise en place du matériau dans un ouvrage. Le matériau est le plus souvent assemblé avec d'autres matériaux pour former un élément constructif ou une paroi;
- la vie en œuvre pendant laquelle le matériau assure sa fonction dans le bâtiment. Durant cette vie en œuvre, le matériau peut faire l'objet d'entretien, de maintenance et/ou de remplacement partiel. Cette étape couvre toute la durée de vie « typique » du matériau;
- la fin de vie qui consiste en la dépose du matériau lors d'une opération d'entretien, de démolition ou de rénovation du bâtiment et le traitement subi par matériau devenu « déchet.

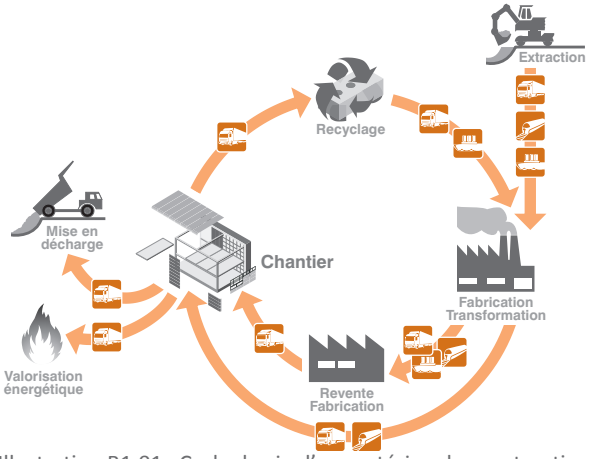


Illustration B1.01 : Cycle de vie d'un matériau de construction

Ces étapes sont reliées les unes aux autres par des phases de transport. Ces phases peuvent avoir des conséquences environnementales importantes, selon le nombre de kilomètres parcourus et le moyen de transport utilisé. Celles-ci sont présentées au chapitre 4.
Chaque étape du cycle de vie du matériau de construction consomme de manière plus ou moins importante des ressources énergétiques et non énergétiques, rejette des polluants de manière plus ou mieux importante dans l'air, l'eau et le sol et produit de manière plus ou moins importante des déchets.
Les impacts sur la consommation des ressources, sur les émissions et sur la production de déchets sont implicitement liés au procédé industriel et aux moyens techniques utilisés ainsi qu'au type de mise en œuvre utilisé pour assembler le matériau.

1. L'extraction des matières premières

La phase d'extraction est la première étape du cycle de vie d'un produit de construction dans la mesure où elle consiste en l'approvisionnement en matières premières nécessaires à la fabrication et à la mise en œuvre d'un produit de construction.
Le terme «extraire» signifie « action de retirer une chose d'un lieu où elle se trouve enfouie ou enfoncée » ou encore « Séparer une substance de …»
Le terme «extraction» doit donc être pris au sens large puisqu'il intègre également les notions de culture, de récolte et d'abattage ainsi que des notions d'élevage.

1.1. L'extraction de matières minérales - Carrières - Procédés

Les principaux lieux d'extraction des matières minérales sont les mines et les carrières bien que certaines matières comme le sable soient maintenant prélevés en mer.
Une carrière est un endroit - à ciel ouvert ou souterrain - d'où sont extraits des matériaux de construction

: pierres, sables ainsi que différents minéraux et granulats.
Le mot « carrière » vient du latin quadrus, « carré ».
Ce terme désigne également une installation industrielle complète comprenant un lieu d'extraction et les machines servant à traiter la roche extraite, des hangars, des ateliers où sont coupés et taillés les blocs de roches.
Il existe différents types de carrière selon l'usage donné à la roche qui en est extraite :

- granulat : graviers et sables utilisés par le bâtiment et les travaux de génie civil, agrégats divers...;
- matière première industrielle : calcaire pour les cimenteries, argile pour la terre cuite;
- roche ornementale : marbre, pierre bleue, granit, schistes...

Les gisements sont essentiellement exploités au moyen de procédés mécaniques tels que :

- le forage : percement de trous verticaux d'environ 10 cm de diamètre dans la roche selon un écartement - appelé maille - bien déterminé;
- le minage : les trous réalisés par le forage sont remplis d'explosifs. L'explosion successive des trous fragmente grossièrement la roche et l'abat;
- le sciage au fil diamant;
- la reprise : une pelle hydraulique ou un chargeur à pneu récupère la roche abattue et la charge dans un engin de transport;
- le roulage : un engin, plus rarement un convoyeur à bande, achemine les matériaux grossiers jusqu'à l'installation de traitement.

Dans le cas de carrières de granulats ou de matière première industrielle, d'autres opérations sont nécessaires:

- le concassage primaire : les matériaux grossiers sont cassés par une action mécanique directe, par exemple la fermeture de deux mâchoires verticales ou la projection violente sur un écran métallique;
- le criblage primaire, secondaire, voire tertiaire : à l'issue du concassage primaire, les matériaux sont envoyés par des convoyeurs à bande sur une série de grilles vibrantes. La taille des trous dans les grilles permet de trier les matériaux. Ceux qui sont suffisamment petits pour être commercialisés sont mis en stock, les autres partent vers le broyage secondaire;
- le broyage secondaire et tertiaire : les matériaux trop gros sont cassés de manière à réduire leur taille.

Dans le cas de pierres naturelles ou pierres de taille, d'autres procédés de découpage et de finition sont encore nécessaires pour arriver au produit fini : équarrissage, sciage, découpage en tranches et en dalles, polissage, sablage…
Il est à noter que certaines opérations de finition se font encore essentiellement à la main, dans la tradition des tailleurs de pierres.

Exemple d'exploitation: Les Carrières de la Pierre Bleue Belge

Présentation de l'exploitation

Les Carrières de la Pierre Bleue Belge SA exploitent depuis plus de 300 ans la pierre bleue belge sur trois sites d'exploitation situés dans la région de Soignies et produisent plus de 50 000 mètres cubes de blocs de Petit Granit-Pierre Bleue de Belgique par an:

- les Carrières Gauthier & Wincqz, développées par la famille Wincqz aux 18e et 19e siècles et dont le tricentenaire fut commémoré en 1968;
- les carrières du Clypot ouvertes en 1898 par Hector Heremans et dont le centenaire fut commémoré en 1998;
- la carrière de Tellier dont le permis d'exploitation a été obtenu en juillet 2006. Les premiers travaux d'aménagement de la nouvelle carrière ont commencé en automne 2006 et le premier bloc de pierre a été extrait


Illustration B1.02 : Extraction des blocs


Illustration B1.03 : Équarrissage des blocs


Illustration B1.04 : Sciage d'un bloc



Illustration B1.05 : Sciage d'un bloc au moyen du disque diamanté



Illustration B1.06 : Découpage et finition des dalles de pierre

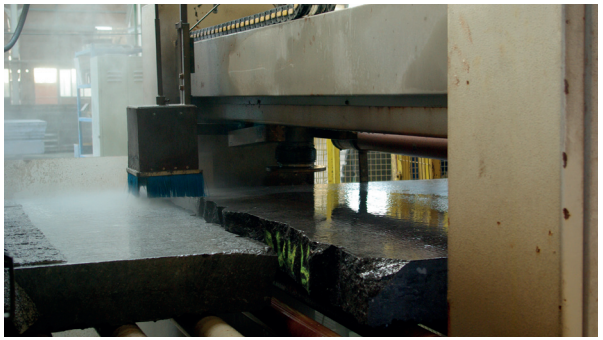


Illustration B1.07 : Découpage d'une tranche en petits blocs (pavés)

dans le courant de l'année 2008.

Quelques chiffres (au 31/12/2006)[1]

- ouverture de la carrière Gauthier & Wincqz :1668
- superficie totale du site Gauthier: 81 ha
- superficie de la zone d'extraction Gauthier: 16 ha
- ouverture de la carrière du Clypot : 1898
- superficie totale du site du Clypot: 138 ha
- superficie de la zone d'extraction Clypot: 44 ha
- premier bloc de la carrière du Tellier des Prés : 2008
- superficie totale du site du Tellier: 167 ha
- superficie de la zone d'extraction Tellier : 70 ha
- nombre d'ouvriers: 198
- nombre d'employés: 50
- blocs extraits sur le site du Clypot : 38 000 m^3
- blocs extraits sur le site Gauthier: 17 000 m^3
- exportations: 1/4 du chiffre d'affaires

Les étapes de l'exploitation

L'exploitation de la pierre bleue comporte quatre étapes: l'extraction, l'équarrissage, le sciage et la finition.

Lors de l'extraction, les blocs de pierre bleue sont extraits suivant la structure du gisement. Celui-ci se compose de couches presque horizontales.

Les blocs sont d'abord sciés verticalement grâce aux haveuses et ensuite découpés transversalement au moyen de machines à fil diamanté.

Les blocs sélectionnés sont remontés sur le chantier (haut de la carrière) par des chargeurs pouvant transporter jusqu'à 45 tonnes de pierre.

Avant d'être découpés, les blocs sont équarris et séparés en deux catégories : les blocs réguliers qui seront sciés par des châssis de sciages ou armures, et les blocs moins réguliers qui seront sciés par des disques.

À l'aide de ponts roulants, les blocs équarris sont transportés vers des wagons plats sur rails qui les conduiront au sciage.

Lors du sciage, les blocs sont transformés en produits semi-finis appelés tranches. Le sciage s'effectue soit au moyen d'un châssis composé de lames diamantées (tranches fines de 2 à 10 cm) soit au moyen d'un grand disque diamanté (tranches épaisses de plus de 10 cm).

Les tranches de pierre sont ensuite mesurées, classées et triées. Ce triage classifie la production en différents choix.

Lors de la finition, à la marbrerie, les tranches sont polies et débitées sur une chaîne automatisée. Elles sont d'abord sciées en bandes puis perpendiculairement pour obtenir du dallage.

Les dalles subissent différents traitements de surface, soit au moyen de machines, soit à la main par le tailleur de pierre (pièces courbes et éléments décoratifs).

Respect de l'environnement

• Exploitation et gestion responsable des rebuts

La politique de qualité amène la société gérante à sélectionner rigoureusement les pierres et à produire dès lors une certaine quantité de rebuts.

Un partenariat a donc été conclu avec l'industrie du granulat, présente sur les différents sites d'extraction pour concasser les couches de pierres impropres à la pierre de taille. Les rebuts sont valorisés en granulats c.-à-d. en coproduits.

Ce partenariat permet d'intégrer une politique de tolérance zéro en matière de déchets de pierre bleue. Toutes les ressources mises à jour par les carrières sont utilisées : terre de remblais, couches supérieures de roche, déchets de production.

• Gestion de l'eau

Les eaux de process sont décantées et récupérées. L'eau utilisée lors du sciage de la pierre est décantée avant d'être réinjectée dans le système.

L'entreprise travaille en circuit fermé. Les appoints nécessaires sont réalisés par pompage sur l'eau d'ex-

1 Source: http://www.pierrebleuebelge.be/chiffres

haure.
L'eau d'exhaure[2] est valorisée, notamment dans la carrière du Tellier des Prés, où elle sera injectée dans les circuits de distribution (publique et industrielle) au lieu d'être renvoyée dans le réseau hydrographique.
Un projet similaire est à l'étude pour le site du Clypot.

• Gestion des poussières

La plupart des procédés d'extraction, de sciage et de polissage se passent sous eau. Cet impératif technique prévient tout dégagement de poussière. Deux mesures supplémentaires sont mises en place afin de limiter le dégagement de poussière : par temps sec, les pistes et zones de manutention sont régulièrement arrosées et la vitesse des véhicules de chantier est strictement limitée. En outre, la végétalisation des merlons[3] et des abords des trois sites contribue efficacement à contenir les poussières. Un contact permanent avec la population locale est assuré.

1.2. Exploitation forestière

Certaines matières végétales, dont principalement le bois, sont exploitées à des fins constructives.
Les opérations d'abattage peuvent être effectuées selon trois méthodes:

- en grande longueur: les arbres sont abattus puis ébranchés et éhoupés sur place. La grume est alors transportée dans la zone de dépôt où elle est tronçonnée et chargée sur un camion. Cette méthode laisse les rémanents[4] sur la zone de coupe;
- en arbre entier: les arbres sont abattus et transportés directement en zone de dépôt où seulement ils seront ébranchés et tronçonnés. Cette méthode laisse une grande quantité de rémanents sur la zone de dépôt;
- en bois court: les arbres sont abattus, ébranchés, tronçonnés et triés sur la zone de coupe, laissant les branches et le houppier[5] dans la forêt

Une récolte de bois comprend les opérations suivantes, mais pas nécessairement dans l'ordre donné :

Pré-abattage

- la planification : identification du timing optimal, des accès et de l'aménagement de la récolte;
- l'autorisation d'abattage : notification au public, évaluation environnementale et paiement de taxes;
- la commercialisation de la zone d'abattage: beaucoup de propriétaires fonciers emploient leurs propres bûcherons, tandis que d'autres louent ou vendent le droit d'exploitation à une compagnie forestière;
- l'organisation des accès et du chantier d'abattage : préparation des chemins d'exploitation, camps forestiers, stations de pesée si nécessaire;
- le marquage des arbres : les zones ou arbres devant être récoltés sont clairement identifiés.

Opération d'abattage

- l'abattage : l'arbre sur pied est coupé à l'aide d'une tronçonneuse ou d'une abatteuse;
- le traitement de l'arbre abattu: l'arbre abattu est ébranché et tronçonné;
- le débardage : le bois est déplacé de la souche au dépôt. Des véhicules peuvent tirer, transporter ou débusquer. Un système de câble peut tirer les grumes jusqu'à la zone de dépôt;
- le transport : le bois est transporté à une scierie ou un port, en général par camion, mais aussi par train, par flottage vers l'aval d'un cours d'eau ou tiré par bateau;

Post-abattage

- le brûlage : brûlage des débris de l'abattage et autres bois pour réduire les risques d'incendie;
- le dégagement : élimination de végétation concurrente pour augmenter la croissance des arbres plantés;
- le reboisement : épandage de graines ou mise en terre manuelle de plants d'arbres;
- la protection des routes : l'érosion et les glissements de terrain dus à de vieilles routes d'exploitation peuvent être considérablement réduits en installant des barrages à eau et en repoussant le matériel excavé tel qu'il était à l'origine.

2. Fabrication – procédés de transformation de la matière première

Le processus de fabrication va transformer la ou les matières premières en un produit fini ou semi-fini. Ce produit sera alors soit utilisé tel quel ou introduit dans le processus de fabrication d'un autre produit. C'est le cas du ciment qui sert à la fabrication de béton ou de mortier par exemple.

2.1. Matière première

Une matière première est définie comme une matière extraite de la nature ou produite par elle, utilisée comme composant dans la production de produits finis ou comme source d'énergie.
Les matières premières, une fois extraites du sol ou du sous-sol, demandent généralement un premier traitement ou affinage avant d'être introduites dans le processus de fabrication.
Les matières premières peuvent être classées de plusieurs manières : nature physique, nature chimique, origine… Les matières premières peuvent également être réparties suivant leur importance (en poids ou en quantité) dans la composition d'un produit. On parlera de:

- matière première « dominante » lorsque celle-ci est un composant principal d'un produit de construction.

2 exhaure: évacuation des eaux d'infiltration hors d'une mine ou d'une carrière, par canalisation et pompage.
3 merlon: ouvrage de protection constitué généralement d'un talus de terre entourant une installation pour la protéger de l'extérieur mais aussi pour l'isoler visuellement et/ou acoustiquement.
4 rémanent: ce qui reste de l'arbre coupé, déchet.
5 houppier: cime d'un arbre qui a été ébranché, à laquelle on n'a laissé qu'un bouquet de tiges.

Cette matière dominante donne souvent son nom au produit fini et assure les principales caractéristiques et performances du produit.

- matière première « additionnelle » lorsque cette matière est utilisée pour conserver les performances d'un produit de construction dans le temps – agents hydrophobes et biocides–, pour assurer la cohésion du produit fini – liant – et pour garantir la sécurité de l'utilisateur – ignifugeant.

Dans certains cas, on utilise également des matières premières additionnelles pour augmenter les performances des matières premières dominantes.

Pour obtenir un « produit fini » de construction, la plupart des matières premières doivent subir des transformations. Ces transformations, plus ou moins élaborées, contribuent non seulement à l'éloignement par rapport à la matière première de base, mais également aux impacts environnementaux – plus ou moins importants en fonction des matières utilisées et du type de transformation subie – par le produit fini.

2.2. Type de transformations

Nous esquisserons ci-dessous un regroupement des transformations en plusieurs familles qui présentent des caractéristiques communes.

Gardons cependant à l'esprit qu'un des objectifs de la construction durable est de favoriser le cycle de vie le plus court/fermé possible.
On encouragera donc les procédés de fabrication qui permettent un retour du matériau usagé dans un nouveau cycle de vie.

Transformation mécanique

Certaines transformations n'impliquent aucun changement d'état de la matière et s'effectuent de manière exclusivement mécanique.
Il s'agit par exemple des procédés de peignage, de brossage, de broyage, de découpage, de polissage...
Ces transformations ne modifient pas la nature intrinsèque de la matière première ; le produit fini est donc toujours très proche de la matière première qui le compose.
C'est notamment le cas des pierres naturelles, des bois non traités, des enduits à la chaux ou à l'argile…

Transformations physiques

D'autres transformations impliquent un changement d'état physique de la matière.
Ce changement se produit lorsque la matière est chauffée, refroidie, séchée, fondue, etc.
Les températures atteintes lors de ces transformations sont très différentes selon le matériau produit: de quelques dizaines à plusieurs milliers de degrés Celsius.
Les temps de chauffe sont également très variables et influencent de manière significative les bilans énergétique et environnemental de la transformation.
En général, des températures très élevées – de 1500 à 2000 °C – sont atteintes lorsque la matière est profondément transformée, par exemple lors du procédé de fabrication du ciment, de la perlite expansée ou lors de la fabrication des produits en terre cuite.
L'ajout d'un liant organique synthétique lors du procédé de fabrication peut nécessiter une légère augmentation de température, selon la nature de ce liant.

Par exemple, une élévation de température est nécessaire notamment pour fixer les fibres de polyester présentes dans les matelas de chanvre ou de lin[6].

Cette augmentation de température n'affecte en principe pas la matière première.
Notons que lorsque le liant utilisé est déjà présent dans

6 Source: [AUBECQ 2011]



Illustration B1.08 : Assemblage en vrac - isolation d'un plancher
Source: Isofloc.be



Illustration B1.09 : Flocons de vermiculite

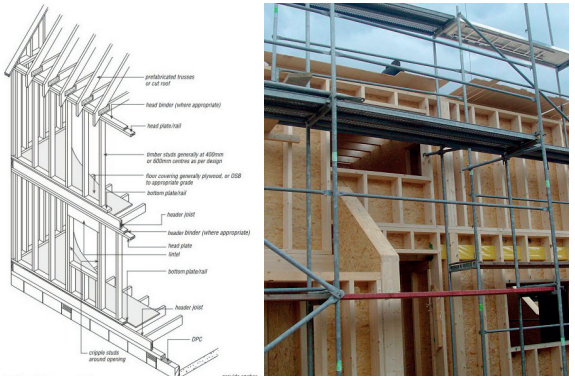


Illustration B1.10 : Fixations mécaniques - ossature bois

la matière première dominante – lignine du bois ou subérine du liège –, on ne le considère pas comme un liant ajouté.
La situation est différente lorsqu'un procédé combine une modification en profondeur de la matière première dominante – par exemple lorsque la matière entre en fusion – avec l'ajout d'additifs.

Dans le cas des laines minérales, ces deux procédés sont combinés. Le produit résultant est alors très éloigné de la matière première trouvée dans la nature.

Transformations chimiques

Un dernier type de transformation, de nature chimique, se produit lorsque les espèces chimiques – atomiques, ioniques ou moléculaires – qui constituent la matière première sont modifiées. Les espèces qui sont consommées sont appelées réactifs et les espèces formées au cours de la réaction sont appelées produits de réaction. La matière obtenue après réaction chimique est d'une nature différente de la matière première.
C'est le cas, par exemple, lors de la fabrication du polystyrène et du polyuréthane.
De plus, on observe souvent beaucoup de pertes au cours d'une réaction chimique : des réactifs sont consommés et une partie des produits ne sont pas utilisables, ou pire polluent l'atmosphère. Cependant, une transformation chimique n'est pas mauvaise en soi. Certaines sont réversibles et ne dégagent pas de produits nocifs.

Pour chaque procédé de fabrication, qualifier toutes les transformations appliquées aux matières premières permet de se rendre compte de l'éloignement par rapport au produit fini.

3. Chantier – Mise en œuvre et assemblages

La vie « active » des matériaux de construction débute dès leur mise en œuvre sur chantier.
C'est réellement à partir de cette étape que les matériaux et produits de construction prennent pleinement la fonction pour laquelle ils ont été choisis : protéger, éclairer, diviser, isoler, étanchéifier…
Le procédé de mise en œuvre ou d'assemblage exerce une influence importante; d'une part, sur les impacts environnemental et sanitaire du produit de construction, et, d'autre part, sur la fin de vie du matériau. Pour pouvoir estimer cette influence, il convient d'analyser la nature des assemblages et les nuisances liées à ceux-ci.

3.1. Réversibilité des assemblages

La réversibilité des assemblages a une influence considérable sur les possibilités de traitement en fin de vie du produit de construction, dans la mesure où le matériau pourra ou ne pourra pas être désassemblé selon le type de fixation utilisé pour sa mise en œuvre.
Trois grands types d'assemblage sont employés pour la mise en œuvre des matériaux de construction : les assemblages en vrac, les assemblages mécaniques et les assemblages au moyen de mortier, de colle ou de liant.

Les assemblages en vrac

Les assemblages en vrac sont principalement utilisés pour la mise en œuvre de matériaux de remplissage (sous-fondation, chape sèche…) ou d'isolants.
Ce type d'assemblage nécessite en général la préparation d'un caisson dans lequel viendra se placer le matériau, sous forme de billes, de grains ou de flocons. Le matériau en vrac peut être mis en œuvre simplement par déversement ou sous pression (nécessite alors un outillage particulier).

Les assemblages mécaniques

Les assemblages mécaniques sont souvent utilisés sur chantier, notamment dans les ossatures métalliques ou en bois, mais également pour la fixation de panneaux ou de plaques.
On utilise alors des éléments métalliques tels qu'agrafes, clous, vis, chevilles, écrous, boulons…
Les assemblages en vrac ou mécaniques ont l'avantage d'être entièrement réversibles : les matériaux peuvent être rapidement démontés et séparés des éléments annexes. Cette capacité permet non seulement un démontage aisé lors d'un remplacement ou lors d'une rénovation ultérieure, mais également un tri plus efficace sur chantier et un traitement adéquat en fin de vie.

La plupart des éléments de fixation mécanique sont en acier (galvanisé ou inoxydable). Ces métaux ont un bilan environnemental assez élevé. Ils peuvent donc, en fonction de la quantité utilisée, influencer considérablement le bilan environnemental de la construction.

Les assemblages au moyen de mortier, de colle ou de liant

Les assemblages qui nécessitent l'usage d'une colle, d'un mortier ou d'un liant ne sont généralement pas réversibles. Le produit de construction est lié à un ou plusieurs autres produits de construction et son démontage ne pourra pas se faire facilement et sans abîmer l'ensemble des matériaux assemblés.
La plupart du temps, les matériaux mis en œuvre à l'aide de colle ou de liant sont inutilisables après démontage.

Il faut cependant différencier le mortier de la colle ou du liant. En effet, les mortiers sont principalement utilisés pour la construction de maçonnerie ou la fabrication d'enduits appliqués directement sur de la maçonnerie. Dans ces différents cas, le mortier est considéré comme un matériau «assimilable» à un matériau inerte tel qu'utilisé pour la maçonnerie ou la paroi de support de l'enduit. Il suivra donc la même filière que le bloc de maçonnerie ou la paroi.

3.2. Mise en œuvre et matériau additifs

Certains matériaux doivent être mis en œuvre au moyen d'autres matériaux que nous appelons ici « matériaux additifs ».

Lorsqu'un produit de construction est mis en œuvre avec un matériau additif – colle, mortier ou liant –, celui-ci doit être considéré comme une « matière secondaire» faisant partie intégrante de la composition de la paroi en tant qu'élément destiné à en augmenter la cohésion.
Pour certains produits de construction, il s'agit de colle ou de mortier colle : revêtement de sol textile, revêtement de sol mince, blocs silicocalcaires, isolants…
Pour d'autres produits de construction, essentiellement les isolants en vrac – chanvre, argile expansée, etc. – un liant est parfois nécessaire pour renforcer la cohésion de l'isolant et assurer de meilleures propriétés mécaniques.

3.3. Mise en œuvre et choix constructif

Le choix d'un procédé constructif et d'un type d'assemblage va avoir des répercussions non seulement sur la possibilité de remplacement de certains éléments (à courte durée de vie), sur la capacité du bâtiment à évoluer, à s'adapter aux besoins – changeants – des occupants, mais également sur la production de déchets.
La durée de vie d'un bâtiment peut varier: elle peut être relativement longue pour des immeubles d'habitation, pour des immeubles scolaires ou à vocation de service, mais elle peut être relativement courte pour des halls d'exposition, des halls de stockage ou de production.
Dans le cas d'un bâtiment ayant une durée de vie estimée longue, il convient, lorsqu'on choisit un procédé constructif, de tenir compte du remplacement des produits de construction ayant une durée de vie courte (10 ans).
En effet, les phases de remplacement peuvent engendrer des impacts environnementaux importants puisqu'on introduit plusieurs fois un même matériau sur la durée de vie du bâtiment.
C'est pourquoi il convient de favoriser les techniques constructives démontables ainsi que les matériaux de courte durée de vie, mis en œuvre au moyen d'un assemblage mécanique et à faible impact environnemental.
Dans le cas de bâtiment ayant une durée de vie estimée longue, il est également important de concevoir un bâtiment modulable dans le temps, permettant l'implantation de nouvelles fonctions, une restructuration intérieure et/ou une extension sans générer de travaux importants et un volume important de déchets.
L'adaptabilité du bâtiment traduit sa capacité à subir ces changements qui doivent s'effectuer dans une démarche durable et à un moindre coût environnemental (déchets, matières premières, énergies); et ce sans altérer son usage ni les services qu'il rend.
Cette adaptabilité peut être définie par plusieurs autres notions[7] :

- la flexibilité d'un bâtiment qui se mesure à la facilité de restructuration de ses espaces intérieurs. La flexibilité suppose un plan modulable, des ouvrages intérieurs démontables et des réseaux facilement accessibles.
- l'élasticité est la capacité d'extension d'un bâtiment. L'élasticité suppose une réflexion particulière sur le plan-masse, la volumétrie et l'aménagement intérieur, mais aussi sur le système constructif et les façades.
- l'évolutivité désigne la capacité d'un bâtiment à intégrer les évolutions ou innovations aussi bien en matière de performances techniques que de mode de vie.
- la neutralité est la capacité du bâtiment à accepter un changement important d'usage. Celle-ci suppose un travail particulier sur les volumes, les noyaux techniques et structurels du bâtiment.

On favorisera donc des systèmes constructifs – mais aussi des installations techniques – permettant au bâtiment d'acquérir ces différentes propriétés.

Il est à noter que cette réflexion sur la flexibilité doit être raisonnée de façon à éviter le surdimensionnement inutile (structure, installations techniques…) et par conséquent l'utilisation inutile d'énergie ou de matières premières.

Il est également important de réfléchir au procédé constructif de façon à réduire la quantité de déchets lors de la mise en œuvre sur chantier.
Dans cet objectif, deux pistes peuvent être présentées.
La première consiste à rationaliser l'usage des matériaux. En effet, le matériau qui n'a pas d'impact environnemental est celui qu'on n'utilise pas et qu'on ne met pas en œuvre. Dans la phase de conception, la rationalisation des matériaux de construction peut se faire à différentes échelles.
Lors du dimensionnement des éléments, le recours aux dimensions commerciales et standardisées permet de limiter les découpes sur chantier, le travail à fournir sur chantier, mais également la quantité de déchets.
Lors des travaux de finition, limiter l'usage des matériaux de second-œuvre et de finition en privilégiant les matériaux « bruts de finition » (briques apparentes, béton apparent…) permet de limiter le nombre de matériaux sur chantier et donc les quantités potentielles de déchets.

Il est également à noter que ce sont les matériaux de finition en contact direct avec l'ambiance intérieure qui ont une forte influence sur la qualité de l'air intérieur. Limiter leur usage permet donc aussi de limiter la pollution de l'air intérieur.

La seconde piste de réflexion qui peut être avancée est d'avoir recours à la préfabrication, notamment pour les éléments de structure, les éléments de façade ou les éléments de parachèvement. En effet, les techniques de préfabrication permettent de maîtriser et réduire les quantités de matériaux – et ainsi les quantités de déchets – mais elles permettent également de réduire les impacts environnementaux et les nuisances sur chantier (bruit, poussières…). Ces techniques de construction

7 Source: [ADEME, 2002] p.113

raccourcissent fortement les délais d'exécution tout en facilitant l'accessibilité et l'occupation des locaux.

3.3. Nuisances liées à la mise en œuvre

La mise en œuvre des matériaux dans le bâtiment peut occasionner des nuisances pour les ouvriers.
Celles-ci sont occasionnées par la texture et les émissions du matériau ou par les additifs nécessaires à sa mise en œuvre.
Un matériau de construction, dans un objectif de soutenabilité, doit limiter au maximum les nuisances pour les ouvriers : irritation des yeux, irritation des mains, irritation des voies respiratoires et/ou dégagement de poussières.
En théorie, le travail sur chantier requiert un certain nombre de protections relatives à chacun des risques encourus pour la santé des ouvriers. Les précautions à prendre sont indiquées dans les fiches de données de sécurité – FDS – rédigées par les fabricants de substances, en accord avec le Règlement CLP[8] (voir chapitre 5).
En pratique, malgré une gestion attentive et consciensieuse de cet aspect sur chantier, de nombreux hommes de métiers n'appliquent pas scrupuleusement toutes les recommandations de protection. En vertu du principe de précaution, il convient donc de considérer que le risque encouru par les ouvriers peut être potentiellement important, voire maximal dans certains cas.

4. Vie en œuvre

La vie en œuvre est la phase du cycle de vie durant laquelle le matériau est en service ou remplit sa fonction dans le bâtiment.

4.1. Durée de vie et maintien des performances

La vie en œuvre étant l'étape du cycle de vie la plus longue, il convient de tenir compte, d'une part, de la durée de vie estimée du bâtiment qui va être construit et, d'autre part, de la durée de vie des éléments constitutifs de celui-ci.
Cette considération est importante, car elle conditionne à la fois la conservation des performances du bâtiment – ce qui, en termes de performances énergétiques, est indispensable –, mais également la nécessité d'entretien, de maintenance et/ou de remplacement.
C'est par exemple le cas des immeubles passifs ou des immeubles « zéro énergie », voire actifs, où il est indispensable que le bâtiment conserve l'ensemble de ses performances initiales et cela sur toute sa durée de vie, qu'elle soit longue ou courte.
Suivant cet objectif, il convient d'être particulièrement attentif à la qualité des matériaux choisis, à la qualité des mises en œuvre et à l'optimisation de la maintenance et des remplacements mais également de suivre les lignes de conduite suivantes:

- optimiser le choix des matériaux en fonction de leur usage et des sollicitations ;
- optimiser le choix des matériaux en fonction de leur durée de vie et de leur besoin d'entretien;
- faciliter l'accès aux éléments de construction nécessitant un entretien régulier, sans générer d'interventions lourdes ou de nuisances pour les occupants.

4.2. Vie en œuvre et impacts sanitaires

C'est durant cette phase que l'utilisateur ou l'occupant est en contact avec l'ambiance interne du bâtiment, enveloppée par les diverses couches de matériaux : les matériaux de second-œuvre et les matériaux de finition, y compris les isolants.
Dans un objectif d'amélioration ou de préservation de la qualité de l'air intérieur, il s'avère nécessaire de pouvoir caractériser les émissions de ceux-ci: polluants chimiques, fibres et particules fines ou très fines.
Les substances dangereuses qui ont été utilisées pour la fabrication et la mise en œuvre des matériaux de construction et qui sont contenues dans ceux-ci sont un indicateur pour évaluer l'impact potentiel sur la santé.
Cependant, il est important de rappeler que la plus grande partie des émissions nuisibles pour la santé se produisent lors des phases de mise en œuvre et de fin de vie, lorsque les matériaux sont manipulés et en contact direct avec l'air respiré par les ouvriers.
Ces différents aspects sont traités au chapitre 5 « Matériaux de construction et santé ».

5. Démolition – déconstruction

Après plusieurs décennies, le bâtiment subit une série de transformations dans le cas d'une rénovation ou, devenu obsolète pour des raisons techniques, économiques et/ou sociales, le bâtiment est démoli.
Dans les deux cas, cela signifie la fin d'un cycle pour l'ensemble ou une partie des matériaux de construction composant le bâtiment. Ces matériaux usagés sont alors considérés comme des « déchets » ou des « rebuts »
Un déchet peut être défini comme « *tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien, meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon* ».
Un rebut peut être défini comme « *toute substance, matériau, produit ou objet considéré sans valeur ou inutile destiné à être jeté* ».

5.1. Principes de déconstruction[9]

Actuellement, une grande partie des déchets de chantier de construction part en centre d'enfouissement technique (CET - décharge) ou en centre d'incinération. Or tout le secteur de la construction, y compris les in-

8 règlement CLP : Regulation (EC) n°1272/2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures (CLP Regulation)

9 Source : [TRACHTE 2003]

dustriels, s'accorde à dire que le territoire n'est pas extensible, que de nombreuses contraintes s'additionnent pour limiter encore l'espace utilisable par les déchets et que le prix à payer pour la dépose de ceux-ci est en augmentation constante. En outre, l'Union européenne a décidé de limiter l'exploitation des CET dans les dix prochaines années, ce qui va influencer fortement le coût de ce type de traitement.
Il devient donc urgent pour les acteurs de la construction de développer des alternatives à ces filières traditionnelles.
Ces alternatives ne représentent pas seulement une préoccupation écologique, elles sont également et avant tout économiques. En effet, l'économie crée la richesse en ajoutant de la valeur aux ressources (matières premières) jusqu'à obtenir un produit dont la valeur est égale au prix de vente. Dès l'instant où un produit est mis en œuvre, il perd de la valeur parce qu'il n'est plus directement utilisable; il perdra également de la valeur avec l'usure, voire par la succession des modes. Finalement, il devient un déchet, un rebut, sans valeur d'usage et pour lequel il va falloir payer afin de l'éliminer sans engendrer trop de coûts environnementaux.
Exemple : la planche en bois neuve qui est ensuite clouée, puis soumise aux intempéries ou à différents types de traitement comme la peinture, lasure ou vernis.

Ces solutions permettent également de maintenir autant que possible la valeur ajoutée par l'homme à la matière et cela selon la gradation suivante :

- maintenir autant que possible et aussi longtemps que possible le bâtiment et ses composants par un processus d'entretien et de rénovation;
- conserver et réemployer le produit de construction dans le cadre du projet de rénovation. Dans ce cas précis, le produit de construction garde sa fonction initiale;
- réutiliser le produit de construction pour une autre affectation. Dans ce cas, le produit de construction acquiert une fonction différente que celle initialement prévue;
- recycler un matériau pour la production d'un matériau identique : upcycling;
- recycler un matériau pour la production de biens de moindre exigence technique: downcycling;
- récupérer l'énergie contenue dans le matériau ou le produit de construction : valorisation thermique.

Les solutions présentées ci-dessus sont, dans un objectif de construction soutenable, la façon la plus adéquate de boucler le cycle de vie de la manière la plus courte possible. Ces solutions mettent également en évidence la possibilité de redonner de la valeur aux déchets de construction, soit en les réutilisant, soit en les recyclant, et d'ainsi limiter ou empêcher l'exploitation massive de nos ressources naturelles. Elles montrent aussi l'absolue nécessité, pour un concepteur, de sélectionner avec soin les matériaux qu'il souhaite utiliser ainsi que le type d'assemblage pour leur mise en œuvre.

6. Fin de vie : élimination et traitement

Après son usage dans le bâtiment, la vie du matériau n'est pas immédiatement terminée. Celui-ci a la capacité d'être traité dans une ou plusieurs filières de gestion des déchets de construction. Il est important d'être attentif à ce qui se passe après la déconstruction du bâtiment, lors du traitement de ces déchets, en tenant compte à la fois des potentialités de traitement en fin de vie du matériau, mais aussi de l'existence concrète des filières de traitement proposées. En effet, le potentiel de traitement d'un déchet n'a de valeur que si les moyens pour le mettre en œuvre existent.

6.1. Types de traitement en fin de vie

Chaque matériau de construction, après son utilisation, peut potentiellement être traité selon sa capacité à être :

- biodégradé ;
- réemployé et/ou réutilisé ;
- recyclé en «upcycling» ;
- recyclé en «downcycling» ;
- incinéré ou mis en décharge.

La capacité d'un matériau à recevoir un traitement en fin de vie dépend de plusieurs éléments : sa composition (matières premières dominantes et additionnelles), le procédé de fabrication, le procédé de mise en œuvre (avec ou sans liant et le cas échéant, quel type de liant) et l'état du matériau après sa vie en œuvre.
En effet, au-delà de ses caractéristiques initiales, le matériau peut avoir subi des dégradations par contact avec d'autres matériaux de construction ou sous l'action d'agents extérieurs (humidité, rongeurs, moisissures, etc.).
La capacité d'élimination ou de réutilisation des déchets est souvent limitée par la teneur en substances chimiques des matériaux de construction, substances nécessaires à leur production. Ces substances pèsent donc à la fois sur la santé lors de la fabrication, de la mise en œuvre et de l'utilisation, mais également sur l'environnement et les ressources.
Une matière est dite biodégradable si elle peut, sous l'action d'organismes vivants, se décomposer en éléments divers dépourvus d'effet dommageable sur le milieu naturel. Il convient cependant de préciser un laps de temps durant lequel doit se faire la dégradation du matériau.
Dans le cas des matériaux de construction, on estime raisonnable un délai de 3 a 6 mois pour atteindre la décomposition complète. Il est important de préciser que seuls les matériaux organiques peuvent être biodégradables : comme les panneaux de fibres de bois sans liant synthétique, les matières végétales…
Les matériaux de terre crue, d'argile ou de chaux peuvent aussi être considérés comme biodégradables puisqu'ils peuvent retourner sans aucune transformation à leur état d'origine et leur

milieu d'extraction.

Un matériau est réemployé/ réutilisable si, après une première utilisation dans le bâtiment, il peut être de nouveau mis en œuvre dans les mêmes conditions, sans devoir subir de traitement préalable.

Il est intéressant de s'arrêter un bref instant sur la signification de la récupération d'éléments de construction. En récupérant un élément de construction et en le réutilisant, on récupère non seulement la matière, mais aussi la valeur ajoutée par l'artisan ou l'industrie à cette matière. Et surtout, on manifeste du respect pour le travail accompli, respect qui rejaillit sur l'artisan ou l'ouvrier et consacre une certaine dimension humaine aux objets que nous utilisons ou que nous habitons.

C'est pourquoi, dans le cadre d'une gestion soutenable des produits ou matériaux de construction, la question à se poser, face à un produit de construction, n'est plus « est-il encore à la mode, n'est-il pas périmé ? » mais «quelle est la dose de travail que l'on y a investi, quelle est la quantité de matière et de travail que j'épargne ? » Lorsque cette question est posée, on se rend compte que, excepté le cas d'une forte obsolescence technique, tout élément de construction peut être réutilisé.

Un matériau est recyclable en «upcycling» s'il peut être réintroduit comme matière première dans le cycle de fabrication du produit identique ou similaire. Il est important de considérer cette possibilité après une première utilisation dans le bâtiment dans la mesure où le recyclage est également une action de transformation qui permet de produire de nouveaux matériaux, à partir de déchets ou des matières premières secondaires. Cette alternative à la « mise en décharge » permet de limiter le gaspillage en réutilisant les matières déjà produites tout en ménageant les ressources naturelles en énergie et en matière première.

Un matériau est recyclable en «downcycling» si, après une première utilisation dans le bâtiment, il peut être utilisé comme matière première dans un nouveau cycle de production pour fabriquer un produit fini d'exigence technique moins contraignante.

Comme exemple de processus de downcycling, on peut citer les déchets en bois non traité réintroduits dans la fabrication de panneaux MDF, les déchets de béton concassés et utilisés comme gravats de fondation dans les routes…

Le processus de recyclage – que ce soit en « upcycling » ou en « downcycling » – devient vraiment intéressant dans la mesure où ce recyclage peut se faire sur plusieurs cycles, comme dans le cas des métaux qui peuvent pratiquement être recyclés à l'infini.

Si aucune des possibilités précédentes n'est applicable, il reste deux solutions en dernier recours : l'incinération ou la mise en décharge.

L'incinération est la réduction en cendres des déchets par l'action du feu. Cette technique permet en général de récupérer l'énergie dégagée par la combustion, mais elle émet également de grandes quantités de gaz et de composés – métaux lourds, dioxines, etc. – qui contribuent à la pollution atmosphérique et à la pollution des sols. Cependant, les techniques actuelles permettent un filtrage des gaz et une réduction des résidus – gaz et cendres – à de petites quantités – 3 % du poids des déchets –, mais ceux-ci doivent ensuite être placés en décharge et leur toxicité reste élevée.

Environ 30 % du poids initial des déchets est incombustible – mâchefers – et se retrouve en général utilisé comme matériau de construction ou de terrassement.

L'incinération ne fait donc que diminuer le volume de déchets, mais elle n'influence pas leur toxicité globale.

La mise en décharge consiste en un stockage des déchets sur un site spécifique, sans aucun traitement. Aucune valorisation des déchets n'est effectuée, et le risque de dégradation du milieu naturel – eaux de surface, eaux souterraines, sol, air, etc.– est réel même si ces installations sont de plus en plus réglementées. C'est la solution la moins soutenable en termes de gestion des déchets, car on ne fait que les dissimuler.

Il est également important de signaler que les installations de mise en décharge seront dans un avenir proche, au niveau de l'Union européenne, de plus en plus limitées et réglementées et que le coût des installations traditionnelles de traitement de déchets est supérieur au coût du recyclage (voir chapitre 6).

Précisons encore que les filières de recyclage ne pourront réellement être effectives et efficaces qu'aux conditions suivantes :

- la conscientisation forcée du maître d'ouvrage à la problématique des déchets. Le maître d'ouvrage est au centre de tout projet puisqu'il en est l'acteur financier. En imposant à celui-ci l'obligation légale de répondre à certains critères en termes de gestion de déchets – comme c'est déjà le cas en Suisse – on sensibiliserait la base même du secteur de la construction, ceci entraînant sans doute un changement radical de mentalité;
- la prise de responsabilité du fournisseur/fabricant face aux déchets que son « produit » génère. La législation actuelle, tant au niveau européen qu'au niveau des trois régions belges, tend à responsabiliser les fabricants en matière de substances nocives et en matière de déchets en leur imposant la reprise de ceux-ci. C'est déjà le cas dans certains domaines tels que l'électronique, les emballages et l'automobile. Dans cette optique, on peut donc se demander pourquoi le secteur de la construction – le plus gros producteur actuel de déchets – serait privilégié.

Mais avant tout, le recyclage des matériaux ne sera opérant que si le concepteur prend en compte leur future réutilisation lors de la conception de son bâtiment et lors de leur mise en œuvre sur chantier.

Les matières premières, exploitation et consommation des ressources

Le monde qui nous entoure est fait de matière, d'énergie et d'information.
La matière et l'énergie sont considérées comme des matières premières, à savoir des matières extraites de la nature ou produites par elle, et utilisées comme composant (ingrédient) ou comme source d'énergie dans la production de produits finis.
La matière est la substance qui est transformée en produit fini grâce à un apport d'énergie et d'information.
Sur base de ces deux premières définitions, un matériau de construction peut être défini comme étant le produit fini issu de la transformation d'une ou plusieurs matières premières, transformation qui implique nécessairement un apport d'énergie et d'information. L'apport d'énergie se fait sous forme de combustible et permet le fonctionnement des différentes machines, engins ou procédés utilisés lors du processus de fabrication. L'information correspond à la « recette », au savoir-faire de l'homme.

1. Nature de la matière

On peut classer les matières premières en quatre catégories suivant leur nature : les matières organiques d'origine végétale ou animale , les matières organiques synthétiques issues de l'industrie pétrochimique, les matières minérales (y compris les métaux) et les matières issues du recyclage.

1.1. Matières organiques d'origine végétale ou animale

Les matières organiques d'origine végétale ou animale sont des matières carbonées produites dans la nature de manière continue par des organismes vivants.
Ces matières organiques constituent la biomasse[1], s'inscrivent dans un cycle court de production ou de renouvellement et sont généralement biodégradables[2] .
Lorsqu'on parle de matière organique d'origine végétale ou animale, il faut différencier la biomasse (matière organique vivante) de la nécromasse (matière organique morte qui constitue les sols) et de la matière organique fossile. La matière organique fossile est le résultat de la décomposition incomplète de matière organique bactérienne, microbienne produite en milieu océanique (pétrole et gaz naturel) et de la décomposition incomplète de végétaux terrestres, ou semi-aquatiques (charbon, lignite et tourbes).
Les matières organiques d'origine végétale et plus particulièrement les arbres sont, après le plancton océanique et les tourbières, le principal puits de carbone naturel planétaire. En effet, lors de leur croissance, par le phénomène de la photosynthèse, les végétaux sont capables, grâce à l'énergie solaire, de synthétiser le dioxyde de carbone (CO_2) et l'eau en matière organique et en oxygène.

1.2. Matières organiques synthétiques

Les matières organiques synthétiques d'origine pétrochimique sont des composés organiques de synthèse qu'on ne retrouve pas tels quels dans la nature.
Ils sont élaborés par l'homme à partir de matières organiques fossiles dont essentiellement le pétrole. Ce sont aussi des matières carbonées, mais leur cycle de production ou de renouvellement est extrêmement long et elles sont pour la plupart non biodégradables.
Les matières organiques de synthèse les plus couramment utilisées dans le secteur de la construction sont les matières plastiques telles que le polychlorure de vi-

1 En écologie, la biomasse est un terme qui désigne la masse totale d'organismes vivants dans un biotope donné à un moment donné, elle peut être estimée par unité de surface s'il s'agit d'un milieu terrestre ou bien par unité de volume s'il s'agit d'un milieu aquatique. Source: www. wikipedia.org

2 Une substance est dite biodégradable si, sous l'action d'organismes vivants extérieurs à sa substance, elle peut se décomposer en éléments divers dépourvus d'effets dommageables sur le milieu naturel. Source: www. wikipédia.org

nyle, PVC (gouttières, revêtements de sol, etc.), le polypropylène PP (film d'étanchéité, film de protection, etc.) le polyéthylène téréphtalate (film d'étanchéité, pare-vapeur, etc.) et le polystyrène PS (isolant thermique).

1.3. Les matières minérales

Les matières minérales sont des substances inorganiques (très rarement organiques) formées naturellement. Hormis quelques exceptions comme les coquillages, les matières minérales ne sont pas produites par des êtres vivants et ne sont pas biodégradables.
Les matières minérales sont généralement solides[3] et s'associent pour former les roches constituant la croûte terrestre et, d'une façon plus générale, la lithosphère.
Une matière minérale se caractérise par ses propriétés physico-chimiques, sa dureté classée sur l'échelle de Mohs de 1 à 10 et sa formule chimique.
Les matières minérales ou les minéraux sont classés principalement d'après des critères chimiques et cristallographiques. Leur composition chimique permet de les grouper en dix classes principales[4] qui sont reprises dans le tableau B2.01 ci-après.
Les matières minérales sont les matières les plus couramment utilisées dans le secteur de la construction, que ce soit en gros œuvre, second œuvre ou parachèvement. Elles sont soit utilisées telles quelles, sans subir de réelle transformation : gravier, sable, terre, argile, pierre naturelle… soit utilisées en tant que matière industrielle en subissant plusieurs transformations : plâtre, chaux, terre cuite, métaux…

Tableau B2.01 : Classification des minéraux

Classes	Dénomination	Catégories
Classe 1	Eléments natifs	- éléments natifs
Classe 2	Sulfures et sulfosels	- sulfures - arséniures - sulfosels
Classe 3	Halogénures	- halogénures
Classe 4	Oxydes et hydroxydes	- oxydes - hydroxydes - arsénites - antimonites - bismuthites - sulfites
Classe 5	Carbonates et nitrates	- carbonates - nitrates
Classe 6	Borates	- borates
Classe 7	Sulfates et Chromates	- sulfates - chromates - tungstates
Classe 8	Phosphates	- phosphates - arséniates
Classe 9	Silicates	- silicates
Classe 10	Minéraux organiques	- minéraux organiques

1.4. Matières issues des filières de recyclage ou matières premières secondaires

Certaines matières premières utilisées dans les procédés de fabrication sont des matières dites « secondaires » ou « recyclées ».
Par matière « recyclée », on entend une matière qui, ayant déjà subi un cycle de vie complet, est réintroduite, en tant que matière première, dans un nouveau cycle de production.

Exemple :
- Concassé de béton
- Flocons de cellulose
- Laine de roche recyclée sous forme de briquette
- Verre recyclé utilisé dans la fabrication de laine de verre ou de verre cellulaire

Il est important de souligner qu'en termes de gestion soutenable des ressources, ces matières sont extrêmement intéressantes dans la mesure où :
- elles limitent le « gaspillage » en réutilisant des matières préalablement exploitées;
- elles requalifient des « déchets » en leur redonnant de la valeur (notamment économique);
- elles ménagent les stocks des ressources naturelles énergétiques[5] et non énergétiques.

Pour arriver au produit fini, tel qu'il sera mis en œuvre dans le bâtiment, la matière première doit subir différentes transformations. Celles-ci peuvent aller d'une simple transformation mécanique (découpage, brossage, broyage…) jusqu'à une transformation de la nature chimique de la matière première.
Ceci nous amène à la notion d'éloignement du produit fini par rapport à la matière première. Plus la matière première subit des transformations lors du procédé de fabrication, plus le procédé consomme de l'énergie et émet des polluants et plus le produit fini sera éloigné des matières premières utilisées.
Cette notion d'éloignement peut, en outre, avoir des conséquences sur la capacité du matériau à être recyclé et/ou composté: plus le produit fini est éloigné des matières premières, plus il sera difficile de le recycler en « upcycling ». Certaines exceptions existent, notamment

3 Les matières minérales sont solides dans des conditions normales de température et de pression. Elles peuvent se liquéfier à très haute température comme notamment les roches utilisées pour la fabrication des laines de roches.

4 Classification de Strunz, 9ème édition, 2001.

5 Dans la majorité des cas, un processus de fabrication utilisant des matières recyclées nécessite une consommation moindre d'énergie.

dans le cas des plastiques.

Les matières premières, qu'elles soient « ingrédients » ou « combustibles », sont puisées ou extraites dans les stocks ou les ressources de la biosphère, de l'hydrosphère ou de la lithosphère.

2. Matières premières et ressources

Les matières premières utilisées pour la production des matériaux de construction sont issues de trois types de ressources:

- les ressources énergétiques (charbon, fuel, gaz naturel, énergie hydraulique, énergie électrique…) qui sont principalement utilisées en tant que combustible pour le transport et pour les procédés de transformation;
- les ressources non énergétiques (matières végétales, animales ou minérales, y compris les métaux, les matières issues de la pétrochimique, les matières issues du recyclage…) qui sont utilisées comme composant ou ingrédient dans la fabrication d'un produit de construction;
- les ressources en eau sont utilisées comme composant et/ou comme élément d'un procédé de fabrication ou d'une phase dans le procédé de fabrication (équarrissage, sciage, mélange…) ou les deux.

L'ensemble de ces ressources peut être regroupé sous le terme plus générique de « ressources naturelles ».
Les ressources naturelles sont définies comme étant les diverses ressources minérales, végétales ou animales présentes sur Terre et nécessaires à la vie de l'homme et à ses activités économiques.
Ces ressources peuvent se subdiviser en deux groupes distincts selon la « fragilité » ou la disponibilité de la ressource:

- les ressources non renouvelables qui sont constituées par les matières premières minérales (minerais, métaux, roches) et les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon…). Ces différentes ressources proviennent de gisements formés au cours de l'histoire géologique de la Terre et qui correspondent à un stock, par essence même « épuisable[6]»;
- les ressources renouvelables qui peuvent, en principe, être exploitées sans épuisement, car capables de se régénérer en permanence. Ces différentes ressources regroupent les sources d'énergies renouvelables (solaire, éolien, hydraulique, biomasse), l'eau, les sols (terres cultivables) ainsi que les ressources biologiques, qui sont constituées par les communautés vivantes exploitées par l'homme (forêts, pâturages, pêcheries maritimes, biodiversité – espèces animales et végétales) et par les variétés de plantes cultivées et races d'animaux domestiques.

Les ressources renouvelables se renouvellent sur des durées très variables, pouvant aller de quelques mois pour les ressources cultivables à plus de trente ans pour du bois de structure. Ce temps de renouvellement est donc une donnée essentielle lorsqu'on souhaite comparer deux ressources renouvelables.
Exemple :
Chanvre et lin : quelques mois de culture
Liège : 9 ans
Bois de structure : 20 à 30 ans

Chaque ressource est caractérisée par sa nature, sa disponibilité, son lieu d'extraction.
Ce sont ces caractéristiques qui vont à la fois traduire les qualités intrinsèques de la matière et par la suite celles du produit fini – ses performances techniques et/ou physiques – et influencer son impact sur l'environnement.

6 Le terme " épuisable " doit être pris dans le sens que le stock n'est pas renouvelé ou qu'il se renouvelle en plusieurs milliers d'années. Il est cependant à noter que certaines ressources minérales peuvent être qualifiées d' " inépuisable " tant le stock est important.

3. Les différentes ressources

3.1. Ressources naturelles non énergétiques

Les ressources naturelles non énergétiques sont utilisées dans le secteur industriel de la construction, soit telles quelles et/ou sous forme de matières premières introduites dans un processus de fabrication.
Certaines matières premières assurent le caractère intrinsèque du matériau. On dénommera celles-ci « matières premières dominantes ».
D'autres sont des matières additionnelles qui apportent au matériau des propriétés supplémentaires ou qui renforcent certaines propriétés. On dénommera celles-là « matières premières additionnelles ».
Exemple :
Dans le cas d'un béton : les matières dominantes sont les sables et granulats, le ciment et l'eau et les matières additionnelles sont les armatures, le cas échéant, et les différents adjuvants (retardateur de prise, plastifiant,…)

3.2. Ressources énergétiques

Tout changement, toute transformation nécessite de l'énergie : modification de température, modification de forme, modification de composition chimique… « L'énergie n'est rien d'autre que l'unité de compte de la transformation du monde qui nous entoure »[7]
Les ressources énergétiques sont utilisées dans le secteur industriel de la construction en tant que « combustible » de transport et « combustible » de transformation[8].
En effet, l'ensemble des procédés industriels nécessaires à l'extraction des matières premières, à la fabrication des produits de construction, à leur transport,

7 Décarboner l'Europe : le dire, subir ou agir ? Conférence donnée par monsieur Jean-Marc Jancovici – UCL – 2 mai 2011

8 Le secteur de la construction consomme également des ressources fossiles pour la production d'énergie de chauffage, ECS, ...

leur mise en œuvre, leur démolition et traitement en fin de vie consomment – de manière plus ou moins importante selon le type de matériaux – des ressources énergétiques.
L'énergie qui est consommée durant tout le cycle de vie des matériaux de construction est aujourd'hui essentiellement produite à partir de combustibles fossiles. Les combustibles fossiles les plus largement utilisés sont le fuel, le gaz naturel et le charbon. Et si dans un premier temps les procédés industriels ont fonctionné essentiellement au fuel, nombreuses sont les industries qui, ces dix dernières années, lui ont préféré le gaz naturel, comme notamment toute l'industrie de la terre cuite en Belgique.
La part d'énergies renouvelables (hydraulique, biomasse, éolienne et solaire) dans les processus de fabrication est, en moyenne, relativement faible et de l'ordre de 5 % à 15 % dans le meilleur des cas.
Certains procédés industriels utilisent également une quantité plus ou moins importante de déchets tels que des pneus ou des huiles usagées... C'est notamment le cas de l'industrie cimentière en Belgique.
Les combustibles renouvelables et les combustibles « déchets » étant encore relativement marginaux dans le secteur industriel de la construction,il est évident que ce dernier consomme énormément de ressources fossiles (45 % de la consommation totale d'énergie[9]), poussant ainsi à une surexploitation de ces ressources fossiles. Celles-ci, avec l'usage intensif actuel, seront épuisées en six voire trois décennies.

Les graphes ci-après présentent la répartition par secteur de la consommation des différents combustibles fossiles , dans le monde et en Wallonie.
On peut constater que l'industrie est un secteur très consommateur même si ce secteur fournit depuis une

9 Source: [LIEBARD 2005]

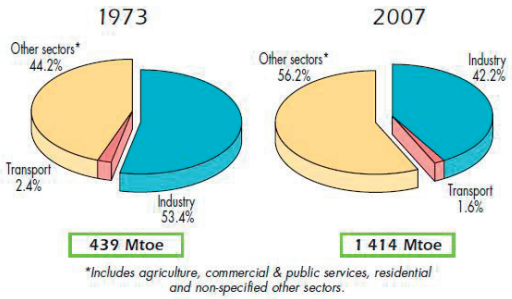


Illustration B2.01 : Répartition de la consommation mondiale d'électricité par secteur, source: International Energy Agency

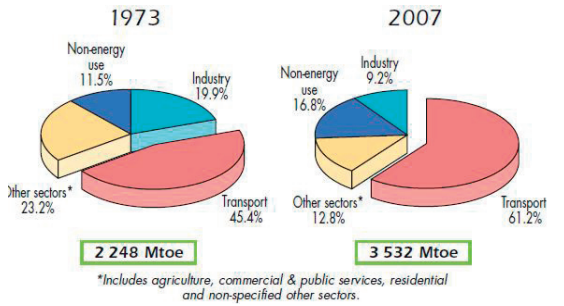


Illustration B2.02 : Répartition de la consommation mondiale de fuel par secteur, source: International Energy Agency

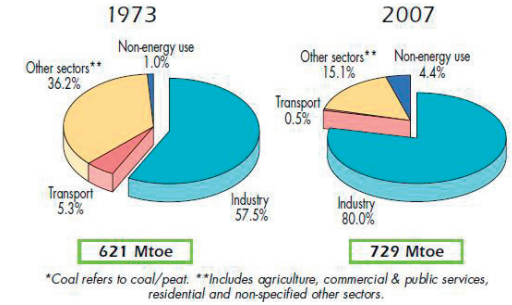


Illustration B2.03: Répartition de la consommation mondiale de charbon par secteur, source: International Energy Agency

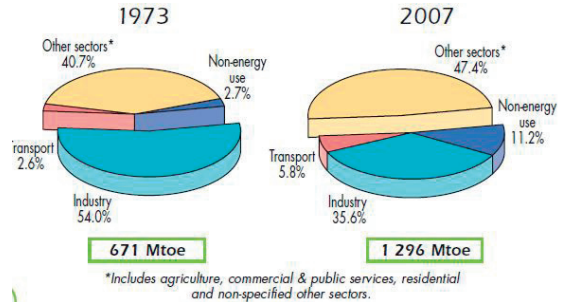


Illustration B2.04 : Répartition de la consommation mondiale de gaz naturel par secteur, source: International Energy Agency

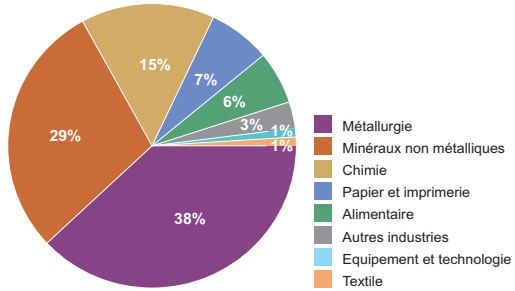


Illustration B2.05 : Wallonie - répartition énergétique par sous-secteur industriel - Source : ICEDD

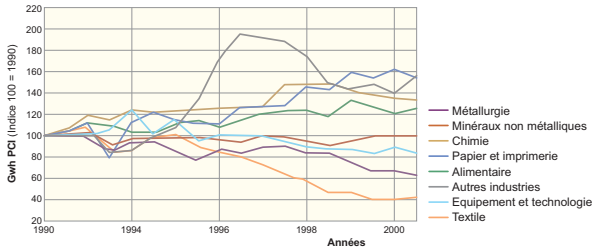


Illustration B2.06 : Wallonie : l'évolution des consommations finales d'énergie de l'industrie wallonne entre 1990 et 2007

dizaine d'années de gros efforts pour réduire ses besoins énergétiques.

Notion d'énergie grise

L'ensemble des ressources énergétiques nécessaires à chaque étape de transformation d'un produit de construction depuis la matière première brute jusqu'au déchet est appelé « énergie grise » ou « énergie incorporée[10] ».
« ncorporée » car on considère que l'énergie utilisée est contenue dans le produit et/ou libérée selon la phase du cycle de vie.
En théorie, un bilan d'énergie grise additionne l'énergie dépensée lors de l'extraction et du transport des matières premières, de la transformation des matières premières et de la fabrication du produit ou lors de la préparation du service, de l'usage ou de la mise en œuvre du produit, de l'entretien, des réparations, dans son cycle de vie et du recyclage du produit.
L'énergie grise est calculée en énergie primaire et est présentée en MJ/kg de matière produite et/ou kWh/kg de matière produite.
Lorsqu'on parle d'énergie grise, on fait encore la distinction entre les sources d'énergie renouvelable (solaire, éolien, hydraulique, biomasse) et les sources d'énergie non renouvelable (combustibles fossiles) en introduisant le facteur « Énergie Non Renouvelable» ou en anglais « Non Renewable Energy – NRE ».

• rapport « énergie grise » et « énergie d'opération »

La consommation d'énergie grise doit être mise en parallèle avec l'énergie d'opération consommée durant la durée de vie d'un bâtiment.
En effet, dans le secteur de la construction, on a vu apparaître ces dernières années une volonté de réduire considérablement la consommation d'énergie liée à l'utilisation des bâtiments. En Europe centrale, cette réduction des besoins en énergie se marque, essentiellement, par une isolation et une étanchéité très performantes permettant d'atteindre le standard « basse énergie[11] », voir dans le meilleur des cas, le standard allemand « passivhaus[12]».
Cependant, nous avons pu démontrer que lorsqu'on tend à diminuer sensiblement la consommation d'énergie à l'utilisation d'une habitation en travaillant sur la performance de l'enveloppe, on consomme proportionnellement davantage de matériaux et donc davantage d'énergie grise, comme le présente l'illustration B2.07 ci-dessus. Une explication de l'illustration B2.07 est donnée e
Cette énergie grise devient alors prédominante dans le bilan énergétique global et doit, à cet effet, être un critère prépondérant dans le choix des matériaux de construction.

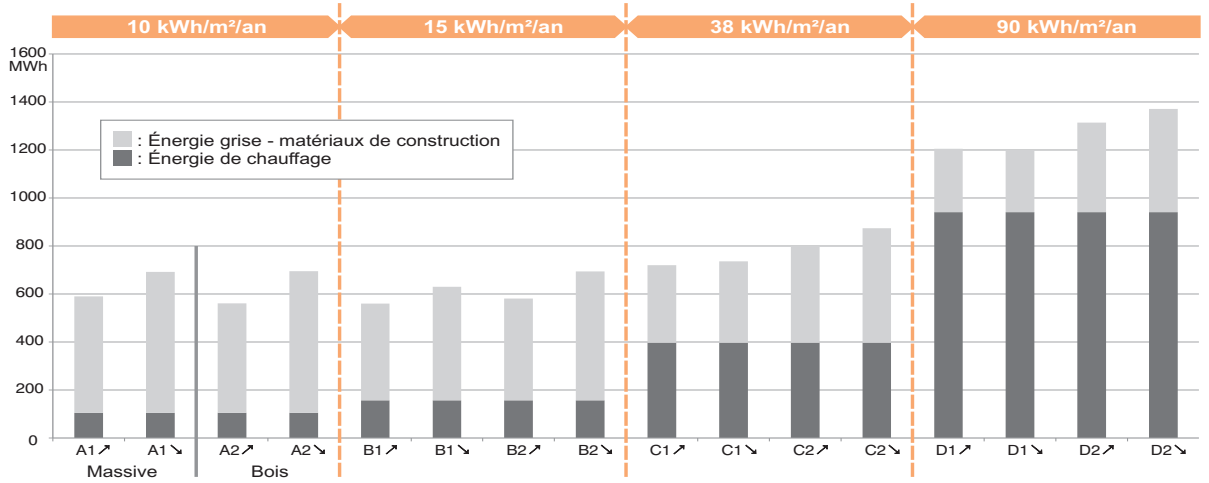


Illustration B2.07 : Comparaison énergie grise et énergie d'opération sur 50 ans

• rapport « énergie grise » et durée de vie

Dans le secteur industriel de la construction, certains procédés de fabrication sont également très énergivores. Ce sont essentiellement les procédés impliquant une montée importante en température sur une durée de temps relativement longue. Il s'agit notamment des procédés industriels liés à la fabrication des ciments, à

10 «i ncorporée » vient de la traduction française du terme anglais « embodied energy »

11 Le standard « basse énergie » n'est pas un standard normalisé. En Belgique, on considère que le standard " basse énergie " en construction neuve correspond à un besoin en chauffage situé entre 30 et 60kWh/m² et par an.

12 standard « passivhaus » est un standard normalisé par le Passivhaus Institut en Allemagne qui répond à 3 critères:
- un besoin en chauffage <15kWh//(m².an)
- une étanchéité à l'air de n50 < 0,6 h-1
- une consommation totale d'énergie < 120 kWh/(m².an) d'énergie primaire

la fabrication des produits en terre cuite, à la fabrication des métaux, mais également à la fabrication des panneaux dérivés du bois.
Cette demande importante en énergie doit être mise en parallèle avec la durée de vie des matériaux (au-delà de 100 ans pour les bétons, la terre cuite et les métaux).
Exemple:
L'énergie grise totale nécessaire à la fabrication d'une brique de terre cuite est de 2,85 MJ/kg. Cette valeur peut être divisée par la durée de vie du matériau (100 ans). On obtient ainsi une valeur équivalente à 0.0285 MJ/kg.
L'énergie grise totale à la fabrication d'un enduit au plâtre est de 1,72 MJ/kg. Cette valeur peut être divisée par la durée de du matériau (30 ans). On obtient ainsi une valeur équivalente à 0.0573 MJ/kg.

Ressources fossiles et matières premières

Le pétrole et ses dérivés sont aussi, mais dans une moindre mesure, utilisés en tant que matière première dans différents procédés de fabrication de matériaux de construction: matières plastiques, étanchéités, isolations, colles, peintures, solvants…
Ces différents matériaux ont, pour la plupart, été développés dans la période de l'entre-deux-guerres et sont aujourd'hui devenus indispensables tant dans notre quotidien que dans nos modes constructifs.
Il est donc primordial de préserver les ressources énergétiques pour la production de ces matières plastiques ou synthétiques plutôt que de les utiliser en tant que combustible.

3.3. Ressources en eau potable

L'eau est utilisée dans le secteur de la construction soit en tant que matière première soit en tant qu'eau de process (extraction, fabrication et mise en œuvre), soit les deux.
L'eau en tant que ressource est une problématique majeure du développement durable, car elle est intimement liée à la survie de tout être vivant sur Terre.

Cette problématique touche l'ensemble des secteurs d'activité dans le monde: l'alimentation, la santé, l'agriculture et l'industrie, y compris l'industrie de la construction. Mais cette problématique influe également et largement sur l'équilibre d'une part des écosystèmes et de la biodiversité et d'autre part sur l'équilibre géopolitique entre pays.
Pour exemple:
- des milliards de personnes, principalement dans les pays en voie de développement, puisent leur eau directement dans les rivières, les lacs, les sources et zones humides;
- les poissons d'eau douce peuvent fournir jusqu'à 70 % des protéines animales dans de nombreux pays en voie de développement.

Aujourd'hui, « l'eau est une ressource mondiale en crise»[13]. Cette crise est à la fois provoquée par les catastrophes naturelles d'origine météorologique ou hydrologique et par l'appauvrissement de la ressource résultant de l'augmentation de la population et des activités humaines, notamment la consommation d'énergie fossile, le réchauffement climatique ou encore la mauvaise gestion du territoire.
Le défi concernant la ressource en eau est de savoir comment gérer celle-ci tout au long de son cycle, à l'échelle locale comme à l'échelle globale.

Accessibilité et disponibilité de l'eau douce dans le monde et en Europe

L'eau est une ressource répartie inégalement en qualité, en quantité et en accessibilité à la surface de la Terre, en raison du climat, du paysage, de la géologie et des moyens économiques et technologiques propres à chaque pays.
Suivant les chiffres de l'UNESCO[14] , en 1995, environ 1,8 milliard de personnes vivaient dans des zones su-

13 Source: [MAHAUT 2009]
14 Source : UNESCO – WWAP, 2006

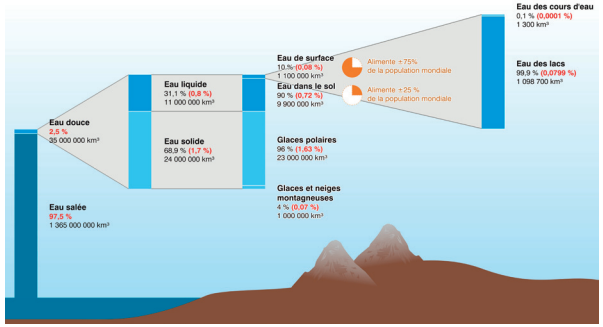


Illustration B2.08 : La ressource en eau douce

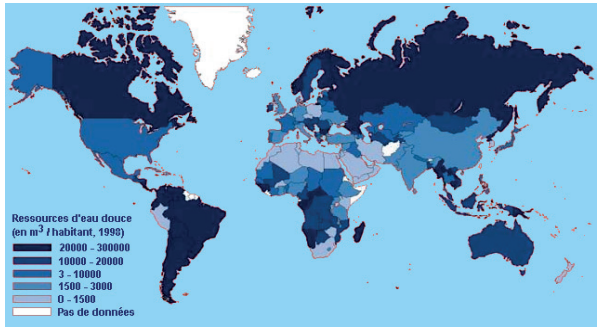


Illustration B2.09 : répartition mondiale des ressources en eau douce

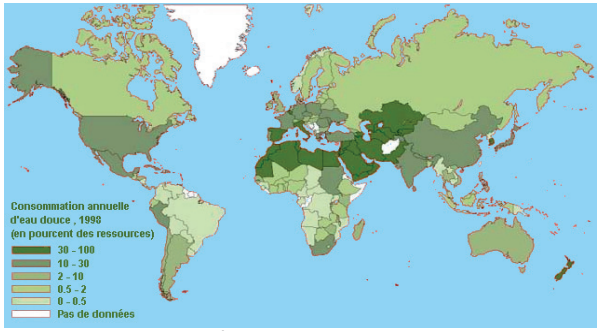


Illustration B2.10 : répartition mondiale de la consommation d'eau potable

bissant un stress hydrique sévère c.-à-d. sans accès à une eau de qualité en quantité suffisante. Ce chiffre continue d'augmenter et les prévisionnistes des Nations Unies prévoient qu'en 2025, la moitié de la population soit privée d'eau potable si rien n'est fait pour enrayer le processus.
La pénurie d'eau ou le « stress hydrique » désigne pour un pays ou une région la disponibilité annuelle en eau par habitant. Lorsqu'un pays ou une région atteint le stade du « stress hydrique », cela signifie qu'il ou elle a atteint la limite de ses capacités pour répondre aux besoins des écosystèmes et des êtres humains. Cette limite se situe entre 1700 et 2500m³/pers/an.

Suivant les deux cartes B2.09 et B2.10, on remarque que de nombreux pays ont déjà atteint cette limite soit pour une raison d'approvisionnement ou de renouvellement faible en eau, soit pour une raison de densité de population importante, soit pour ces deux raisons.
On remarque également que de nombreux pays européens ne disposent que de 1700 à 5000 m³ d'eau douce renouvelable par habitant et par an et sont à la limite – ou l'ont déjà dépassée – du stress hydrique.
Cette constatation – bien que surprenante vu la pluviométrie élevée – vaut pour la Belgique où la densité démographique et la superficie importante de surfaces imperméables expliquent en partie ce phénomène. Ayant pris conscience de cette situation, il devient urgent de gérer de manière respectueuse et rationnelle nos ressources en eau.

Exploitation des ressources en eau

Au cours du 20e siècle, la population mondiale est passée de 1,7 milliard d'individus en 1900 à plus de 6 milliards en l'an 2000. Durant cette période, la demande en eau a été multipliée par six[15].

La disponibilité en eau par personne a chuté de 17 000 m³ en 1950 à 7300 m³ en 1995[16].
Cette importante augmentation de la consommation en eau est due non seulement à la l'augmentation de la population, mais aussi à l'augmentation de la demande moyenne en eau par habitant – conséquence de l'accès de plus en plus aisé à l'eau potable et du développement industriel et agricole.
En effet, pour subvenir aux besoins alimentaires d'une population sans cesse croissante, il a fallu augmenter les surfaces agricoles et intensifier l'agriculture.
Aujourd'hui, à l'échelle mondiale, les hommes prélèvent presque 5000 kilomètres cubes d'eau douce chaque année pour leurs différents usages[17] .
L'eau est ainsi au cœur de la plupart des activités humaines. Les activités agricoles, notamment l'irrigation et l'élevage, sont les principales sources de consommation d'eau dans le monde. Elles totalisent environ 70 % de la consommation mondiale.
L'eau est également utilisée dans de nombreux processus industriels, par exemple dans les secteurs de la chimie, de la métallurgie, et de l'industrie du papier et du carton.
Enfin, l'eau est consommée pour des usages domestiques par les collectivités (écoles, hôpitaux, lavage des rues) et les foyers (hygiène, nettoyage, alimentation).

Eau virtuelle et empreinte sur l'eau

Le concept d'eau virtuelle associe aux biens de consommation la quantité d'eau nécessaire à leur fabrication. Ce concept est relativement similaire au concept d'énergie grise présenté plus haut: l'eau virtuelle, comme l'énergie grise, est une eau cachée.

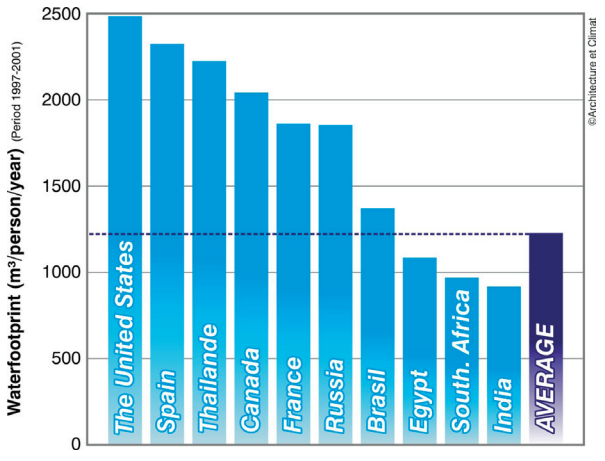


Illustration B2.11 : Empreinte sur l'eau de quelques pays, en m³/pers/an

Ce concept permet de calculer l'utilisation « réelle » en eau d'un pays ou plus précisément son « empreinte sur l'eau » (« waterfootprint » en anglais).
Cette empreinte sur l'eau peut être définie par l'opération suivante:

consommation domestique + importation d'eau virtuelle - exportation d'eau virtuelle = empreinte sur l'eau

Cette empreinte sur l'eau est relativement difficile à évaluer et nécessite des hypothèses de calcul. L'illustration B2.11 présente l'empreinte sur l'eau de quelques pays en m³/pers.an.

4. Disponibilité des ressources

La disponibilité d'une ressource indique en quelle quantité la matière ou la ressource est disponible dans la nature et si l'utilisation régulière de celle-ci est en équilibre ou non soit avec le stock disponible, soit avec son renouvellement naturel.
La disponibilité des ressources s'évalue différemment

15 Source: «Dossier eau» disponible sur http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau
16 Source: [MAHAUT 2009]
17 Source: «Dossier eau» disponible sur http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau

selon qu'on parle de ressources renouvelables ou de ressources non renouvelables.

4.1. Temps et taux de renouvellement

On parle de temps de renouvellement pour les ressources renouvelables, principalement les matières organiques d'origine végétale ou animale ; on parle d'indice de rareté pour les ressources non renouvelables comme les ressources minérales ou synthétiques.
Le temps de renouvellement de la ressource correspond au temps nécessaire au développement de la matière entre chaque récolte ou entre chaque tonte.
Exemple :
Le chanvre et le lin, utilisés notamment comme isolant thermique et acoustique, sont récoltés plusieurs fois sur l'année ; leur temps de renouvellement est donc inférieur à un an.
L'écorce du chêne-liège, utilisée en tant qu'isolant thermique, acoustique et revêtement de sol, est récoltée tous les 9 à 10 ans (une fois que l'arbre a atteint 15 ans).

Il ne faut cependant pas confondre le temps de renouvellement avec le taux de renouvellement qui est défini comme le rapport entre la durée de vie typique d'un matériau et le temps de renouvellement de la matière première dont il est issu.

4.2. Indice de rareté

L'indice de rareté ou en anglais « depletion of abiotic resources » est basé sur la comparaison des ressources naturelles non renouvelables abiotiques[18] et celle de l'antimoine (Sb).
L'antimoine est un élément chimique natif de la famille des pnictogènes, de symbole Sb et de numéro atomique 51. C'est un métalloïde de couleur métallique. L'antimoine est présent dans de nombreux minéraux, souvent allié au plomb, sous forme d'oxyde ou de sulfure.
Par convention, l'antimoine a un indice de rareté de valeur «1». Une valeur supérieure à 1 pour une ressource indique que l'on consomme une ressource plus rare que l'antimoine. Par contre, les ressources dont la valeur est très faible (inférieure à 0.001), sont considérées comme inépuisables à l'échelle humaine.
Exemples (suivant la base de données ECOINVENT " kg antimoine équ.") – par kilo de matière :
- Gravier : 0.00002888 kg antimoine équ.
- Cuivre : 0.048696 kg antimoine équ.
- Béton : 0.56528 kg antimoine équ.
- Liège : 0.0001415 kg antimoine équ.
- Or : 180 à 220 kg antimoine équ.

La disponibilité d'une ressource est un indicateur utile pour les matières premières issues de ressources naturelles qui entrent dans un premier cycle de vie lors de la fabrication d'un matériau ou produit.
Par contre, cet indicateur ne peut être utilisé pour les matières recyclées puisqu'on ne dispose pas de données concernant leur disponibilité comparables aux données sur les ressources naturelles.
Il est à noter que la disponibilité de matières recyclées est encore souvent aléatoire et l'approvisionnement de celles-ci pas toujours continu. C'est notamment une des raisons données par les industries belges des ciments et des bétons – dont le souhait est d'utiliser sous certaines conditions et quantités certains concassés de béton – sur la non-utilisation massive de ceux-ci.

La disponibilité des ressources et leur préservation sont une problématique majeure du développement durable. Il est indispensable, en termes de gestion soutenable des ressources, d'établir un lien entre les stocks actuels des ressources présentes sur Terre et les besoins – présents et à venir – auxquels ces stocks devront faire face.

En effet, depuis la fin de la deuxième Guerre mondiale, l'ensemble des secteurs d'activité et plus particulièrement celui de la construction utilisent un volume considérable d'énergie (essentiellement fossiles) et de matières premières. Le secteur du bâtiment consomme, à lui seul, près de 40%[19] des ressources naturelles et des ressources énergétiques.
La question qui est posée est élémentaire : vu notre consommation actuelle des ressources, les stocks disponibles et accessibles sur Terre sont-ils capables de répondre à nos besoins immédiats et dans un futur plus ou moins proche ?
Aujourd'hui, nombreux sont ceux qui s'inquiètent de la raréfaction des matières premières et de leur approvisionnement alors que la population mondiale continue de croître et que certains pays comme la Chine ou l'Inde sont en pleine croissance économique.

Cette inquiétude n'est pas nouvelle. Dès le début du 20e siècle, des questionnements sur la pérennité des ressources font leur apparition.
Le 13 mai 1908, lors de la White House Conference on the Conservation of Natural Resources, le président Théodore Roosevelt déclare dans un discours: « *Nous nous sommes enrichis de l'utilisation prodigue de nos ressources naturelles et nous avons de justes raisons d'être fiers de nos progrès. Mais le temps est venu d'envisager sérieusement ce qui arrivera quand nos forêts ne seront plus, quand le charbon, le fer et le pétrole seront épuisés, quand le sol aura été appauvri et lessivé vers les fleuves, polluant leurs eaux, dénudant les champs et faisant obstacle à la navigation*.»
En 1964, après la deuxième Guerre mondiale, en pleine

18 ressource abiotique: « non biotique »: non vivant. Les ressources abiotiques regroupent les matières inorganiques telles que le sol, l'eau, l'air et les minéraux.

19 Source: LIEBARD, DE HERDE, Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique, Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable, Observ'ER, Paris, 2005.

période de reconstruction où la protection des ressources n'est pas à l'ordre du jour, Jean Dorst[20], dans son ouvrage " Avant que nature meure ", tire la sonnette d'alarme : « *L'homme moderne dilapide d'un cœur léger les ressources non renouvelables, combustibles naturels, minéraux, ce qui risque de provoquer la ruine de la civilisation actuelle*. »

En 1972, avant le premier choc pétrolier, à la demande du Club de Rome, paraît le rapport très médiatisé « The Limits to Growth » (dont les conclusions ont été publiées en français sous le titre « Halte à la croissance »). Cette étude réalisée par le Massachusetts Institute of Technology est la première étude importante soulignant les dangers écologiques de la croissance économique et démographique que connaît alors le monde.

En envisageant que la croissance économique puisse un jour avoir une fin, et aussi par la principale proposition que l'on en a tirée, mais qui ne s'y trouve pas explicitement, la croissance zéro, ce rapport a suscité de nombreuses controverses.

Ce n'est que suite aux chocs pétroliers de 1973 et 1979 que l'ensemble de la population mondiale prend conscience d'une terrible réalité : sa dépendance au pétrole, « la fragilité de son mode de vie, le poids considérable que celui-ci fait peser sur les ressources de la planète et les risques qu'il fait courir à ses grands équilibres »[21]. C'est suite à cette prise de conscience de la « finitude » des ressources qu'apparaît la notion d'empreinte écologique.

20 Jean DORST (1924 - 2001) est un ornithologue français. qui a a publié une dizaine de livres traduits dans le monde entier. Son ouvrage "Avant que nature meure" (1964) eut une grande influence sur les naturalistes de diverses disciplines, au-delà du monde francophone, qui prirent de plus en plus la mesure des problèmes rencontrés par la faune et la flore.

21 Source: [OLIVA 2006]

4.3. Notion d'empreinte écologique

La raréfaction des ressources naturelles peut être mesurée par un indicateur simple, l'empreinte écologique. Les études du World Wide Fund for Nature (WWF), dont notamment son dernier rapport « Planète Vivante 2010»[22], montrent que l'empreinte écologique globale de la Terre dépasse depuis les années 1970 la capacité de la Terre à renouveler les ressources naturelles.

Le terme d'empreinte écologique s'inscrit dans la dynamique du Club de Rome, et apparaît au moment de la Conférence de Rio en 1992 dans un article écrit par le professeur d'économie William Rees de l'Université de la Colombie-Britannique.

La méthode de calcul se développe ensuite à travers plusieurs études et thèses de doctorat et depuis 2003, le Global Footprint Network[23] est en charge du perfectionnement de la méthodologie ainsi que de la mise à jour des résultats. Le Global Footprint Network publie ainsi chaque année un atlas détaillant l´empreinte écologique de chaque pays.

La définition donnée par le WWF dans son rapport « Planète Vivante 2008»[24] est la suivante: *l'empreinte écologique comptabilise la demande exercée par les hommes envers les « services écologiques » fournis par la nature*. Plus précisément, elle mesure les surfaces biologiquement productives de terre et d´eau nécessaires pour produire les ressources qu´un individu, une population ou une activité consomme et pour absorber les déchets générés, compte tenu des techniques et de la gestion des ressources en vigueur. Cette surface est exprimée en hectares globaux, c´est-à-dire en hectares ayant une productivité égale à la productivité moyenne.

L´empreinte écologique essaie de répondre à un aspect précis du développement durable et non à toutes

22 [WWF 2010]

23 http://www.footprintnetwork.org/en

24 [WWF 2008]

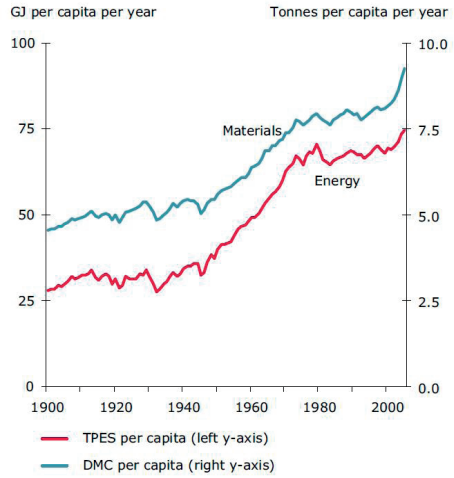


Illustration B2.12 : Consommation globale de matériaux et d'énergie par habitant - 1900 à 2000 - Source: [EEA 2010]

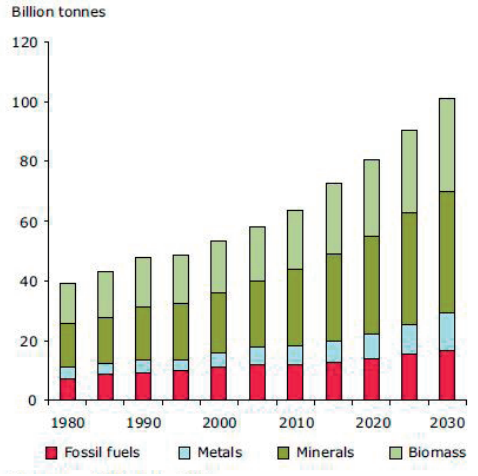


Illustration B2.13 : Extraction des ressources par catégories de 1980 à 2030 - Source: [EEA 2010]

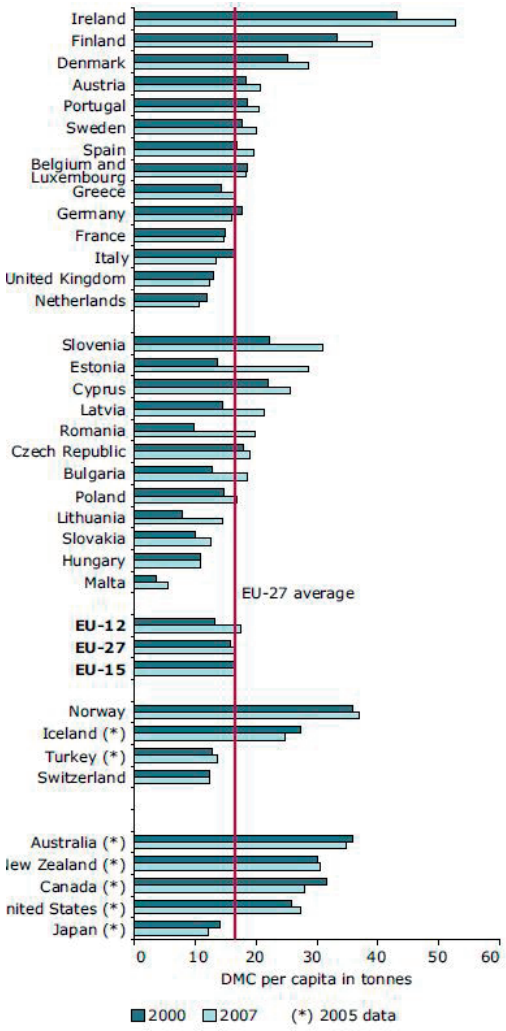


Illustration B2.14 : Utilisation des ressources par personne et par pays - 2000 et 2007 - Source: [EEA 2010]

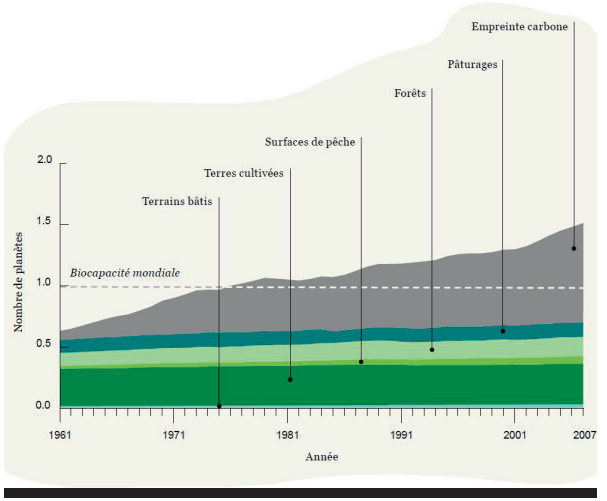


Illustration B2.15 : Empreinte écologique et biocapacité mondiale - Source: [WWF 2010]

Figure 18: *Empreinte écologique des pays de l'OCDE, de l'Union africaine, du BRIC (Brésil, Russie, Inde et Chine) et de l'ANASE (Association des Nations de l'Asie du Sud-Est) en 2007, par rapport à l'Empreinte écologique totale de l'humanité* (Global Footprint Network, 2010).

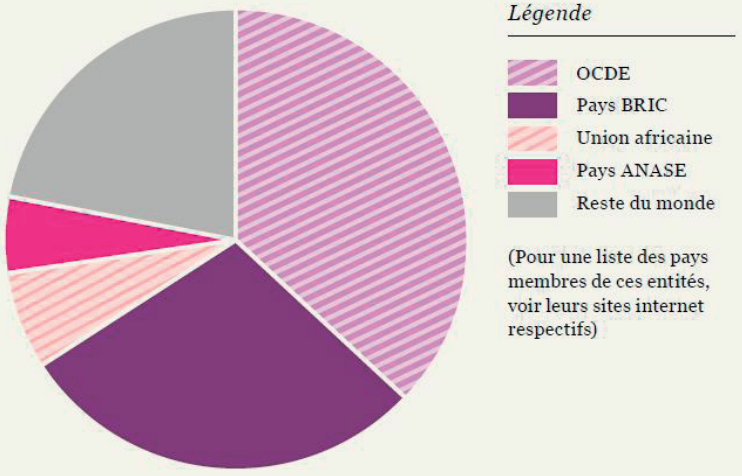


Illustration B2.16 : Empreinte écologique par groupes de pays - Source: [WWF 2010]

les préoccupations environnementales.
Elle part de l'hypothèse que la capacité de régénération de la Terre pourrait être le facteur limitant pour l´économie humaine si elle continue à surexploiter ce que la biosphère est capable de renouveler.
Le système comptable de l´empreinte écologique permet de comparer l´empreinte d´une population par rapport à la surface bioproductive locale ou planétaire estimée disponible. La métaphore souvent utilisée pour exprimer le résultat est de calculer quel serait le nombre de planètes nécessaires si le mode de vie et de consommation de telle ou telle population était appliqué à l´ensemble de la population mondiale.
Les formules suivantes sont sans doute plus explicites :

Empreinte écologique - Biocapacité
=
Dépassement écologique

avec
Biocapacité = Surface * Bioproductivité
et
Empreinte écologique =
Population * Consommation par personne * Intensité en ressources et en déchets

5. Exploitation des ressources

Selon le lieu où les ressources sont exploitées (produites, cultivées ou extraites), leur exploitation exercera une pression plus ou moins forte sur l'environnement.
Deux éléments doivent être pris en compte : les conditions d'exploitation de la ressource et la distance parcourue par la matière pour atteindre le marché belge de la construction ainsi que les moyens de transport utilisés (voir chapitre 4).
Les conditions d'exploitation d'une ressource donnent des indications sur la gestion de la ressource, sur les conditions de travail (aspect social) et sur les impacts de cette exploitation sur l'environnement (local et global). Plusieurs aspects entrent donc en jeu :

- empêcher la surexploitation de la ressource. La surexploitation d'une ressource est une notion utilisée en sciences de l'environnement et dans l'économie du développement durable pour désigner le stade où un prélèvement de ressources naturelles dépasse le stade du renouvellement naturel de cette ressource;
- offrir aux travailleurs des conditions de travail favorables tant au niveau des prestations à fournir qu'au niveau des conditions salariales, sociales et sanitaires;

Si cet objectif est atteint dans les pays européens et occidentaux, ce n'est pas encore le cas dans de nombreux pays en voie de développement où l'ensemble de la population, y compris les enfants, peut être « surexploité ».

- limiter la pression de l'exploitation de la ressource sur l'environnement. L'exploitation des ressources, la culture, l'élevage et/ou l'extraction de matières minérales peuvent avoir des conséquences – négatives ou positives – sur le milieu ou l'environnement dans lequel elle s'intègre : pollution du sol, pollution des nappes phréatiques, dégagement de poussières, dégagement de produits toxiques, bruits...

Certains labels garantissent des conditions d'exploitation soutenables. Il s'agit notamment, pour les matériaux à base de bois (bois d'œuvre ou dérivés), des labels FSC[25] et PEFC[26].

5.1. Le label FSC

FSC est l'abréviation de « Forest Stewardship Council ».
Le label FSC est un label privé, collectif, contrôlé par un organisme indépendant[27].



Illustration B2.17 : labels FSC et PEFC

Les produits labellisés «FSC» contiennent du bois en provenance de forêts qui ont obtenu un certificat grâce à leur gestion durable.
Fin juillet 2007, 877 forêts répondaient aux principes et critères du FSC. Au total cela représente 89 millions d'hectares de forêt.
Le label FSC Pur peut être utilisé uniquement lorsque le produit est composé à 100 % de matériels certifiés FSC.
Le label FSC Mixte indique que le produit provient d'un procédé de production dans lequel du matériel certifié FSC, des matériaux recyclés ou des matériaux d'autres sources contrôlées sont utilisés.
Le label FSC Recyclé signifie que le produit est fait à 100 % de matériel recyclé après consommation. Le label s'applique uniquement aux ressources : il ne garantit pas les étapes ultérieures du cycle de production.
L'organisation qui gère ce label est le Forest Stewardship Council. Il s'agit d'une organisation internationale dont la mission est de promouvoir une gestion écologique, socialement responsable et économiquement viable des forêts du monde. Les membres du FSC sont des représentants de groupements écologiques et sociaux,

25 label FSC: (Forest Stewardship Council)- http://www.fsc.org
26 label PEFC: (Program for the Endorsement of Forest Certification Schemes)- http://www.pefc.org
27 contrôle du label: Une liste d'organisations de contrôle reconnues se trouve sur: http://www.accreditation-services.com/accreditation_of_cbs.html

du secteur et du commerce du bois, de l'industrie du papier, de peuples indigènes et de groupements forestiers à travers le monde.
Le label FSC est reconnu mondialement.

5.2. Le label PEFC

PEFC est l'abréviation de « Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes ».
Le label PEFC est attribué à un produit contenant au minimum 70 % de bois provenant de forêts gérées durablement. Il s'agit d'un organisme coupole international, basé sur la reconnaissance réciproque de différents systèmes nationaux de certification de forêts. 33 systèmes nationaux sont membres du PEFC; la reconnaissance réciproque vaut pour 23 d'entre eux. Ensemble, ces 23 systèmes ont déjà certifié plus de 200 millions d'hectares de forêt. Cela fait du PEFC le label le plus important au niveau mondial pour la certification de forêts (environ 70 % de toute la surface certifiée).
Le label PEFC est un label privé, collectif, contrôlé. Le contrôle est effectué par des instances de certification indépendantes et accréditées. En Belgique, il s'agit par exemple CTIB-TCHN, BVQI et SGS.
Le label peut être utilisé si le produit contient au moins 70 % de bois certifiés PEFC.

Le label PEFC présente un problème pour le consommateur: il est impossible de savoir d'où provient exactement le bois labellisé PEFC. C'est un problème important, vu qu'il existe d'autres systèmes de certification, avec d'autres critères, dans chaque pays. La reconnaissance réciproque de différents systèmes de certification de qualité variable donne ainsi lieu à un manque important de transparence.

6. Conséquences de l'exploitation des ressources

L'exploitation des ressources, qu'elles soient énergétiques ou non, a également des conséquences d'une part sur la préservation des espaces « vierges » et d'autre part, sur la préservation des écosystèmes existants.
C'est une des raisons pour lesquelles l'exploitation des ressources est fortement réglementée en Europe, notamment via les permis d'exploitation.
L'impact des carrières sur leur environnement à long terme est différent suivant le mode d'extraction :

- les carrières souterraines peuvent avoir un impact sur la ressource en eau par leurs interactions avec les nappes et avec les eaux superficielles. Le carrier doit parfois pomper la nappe pour qu'elle n'envahisse pas la carrière. Et les polluants qui ont été dispersés dans une carrière peuvent éventuellement contaminer la nappe.
- les carrières souterraines sont le plus souvent abandonnées en fin de vie. Elles peuvent représenter un grand danger d'effondrement, car les infiltrations d'eaux fragilisent les filons exploités.
- les carrières à ciel ouvert modifient de façon importante le paysage, en créant des falaises, en découpant des collines, en créant des trous profonds en plaine. Les hauteurs de front d'abattage sont relativement importantes et accentuent l'aspect vertigineux de ces changements ;

Il est difficile de mesurer l'impact à long terme des extractions dans les lits des rivières ou en mer, car il dépend de la résilience[28] écologique du milieu et de la rapidité du retour des alluvions. Les extractions des gravières sur des gisements sédimentaires mènent souvent à la création de plans d'eau nouveaux en laissant la nappe phréatique sortir à l'air libre.
Les impacts à court terme sur l'environnement des carrières sont les vibrations (tirs de mine, transport intense par camion), le bruit et la poussière. Ces impacts sont fortement réglementés au niveau européen.
En outre, les carriers, conscients des impacts potentiels de leur exploitation, réfléchissent également depuis plusieurs années à la réduction de ceux-ci. L'intégration paysagère des sites en fin de vie est désormais prise en compte dès l'ouverture d'un site ou du renouvellement de son autorisation d'exploitation.

L'exploitation forestière peut, elle aussi, affecter négativement l'environnement de plusieurs points de vue et d'autant plus si elle est intensive :

- en supprimant des arbres qui servent de support aux communautés épiphytes[29], fongiques et animales associées, l'exploitation forestière peut altérer directement et indirectement la composition spécifique, la structure de la forêt, le terrain, et peut causer un épuisement du sol quand il est fragile ou en forte pente;
- par les perturbations directement causées par les opérations d'abattage (bruit), dérangement, animaux écrasés ou perdant brutalement leur habitat;
- par des impacts indirects (tassement du sol, artificialisation ou dégradation du réseau hydrographique, dérangement, construction de routes, pistes et aires de travail et de débardage);
- par l'artificialisation des forêts, surtout dans le cas des systèmes sylvicoles basés sur les monocultures, les coupes rases et les plantations artificielles;
- et parfois en remplaçant les essences autochtones

28 Résilience: vient du verbe latin resilio, ire, littéralement « sauter en arrière », rebondir, résister. La résilience est, à l'origine, un terme pour expliquer la résistance des matériaux aux chocs. Ce terme, emprunté de la physique est repris en sciences humaines pour s' appliquer non plus simplement aux matériaux mais aussi à l'humain et à la biosphère. La résilience peut-être définie comme la capacité pour un individu à faire face à une situation difficile ou génératrice de stress.

29 Les épiphytes sont des plantes dont les racines s'ancrent à la surface d'autres plantes. Ces plantes vivent sur la canopée.

par d'autres essences peu favorables aux biocénoses locales, ou acidifiant ou dégradant les sols. Cette stratégie contribue aussi à réduire le stock génétique au sein des populations d'essences locales.

L'exploitation est souvent associée à un système de cloisonnement et de drainage. Elle peut mener à une perte d'habitats dits patrimoniaux, ou vitaux pour certaines espèces, particulièrement dans les zones écologiquement sensibles. Les machines et engins forestiers les plus lourds peuvent dégrader ou compacter les sols forestiers. L'exploitation sur pente raide peut provoquer une érosion du sol, des glissements de terrain, une turbidité de l'eau et dégrader des habitats particuliers (tels que « forêts de ravin », creuses, etc.). Sur sols saturés, elle peut créer des ornières et perturber le drainage (les ornières argileuses pouvant occasionnellement constituer des microhabitats pour le sonneur à ventre jaune et quelques têtards d'autres espèces, au risque que ceux-ci s'y fassent écraser ou se déshydratent si l'eau vient à manquer). L'abattage d'arbres près de cours d'eau peut provoquer l'augmentation de la sédimentation, de la température de l'eau et dégrader l'habitat ripicole.

Une forêt gérée principalement pour la production rapide de bois selon les méthodes « modernes » consistera typiquement en des arbres jeunes, vigoureux et souvent à croissance rapide. Avec le souci de bénéfices à court terme et l'arrivée de profileurs (qui augmentent très fortement les cadences de sciage, mais uniquement pour les bois de faible section), la tendance est partout à une diminution du cycle des révolutions (arbres coupés de plus en plus jeunes, dans une démarche dite de sylviculture dynamique). Une telle gestion supprime les zones caractéristiques de forêts anciennes, comme les vieux arbres, les gros-bois[30], les arbres sénescents[31] et surtout une quantité suffisante et largement dispersée dans le massif de bois-mort, autant d'éléments requis pour la survie de nombreuses espèces forestières (saproxylophages notamment). La gestion durable de la forêt nécessite que de telles zones et des « gros-bois» soient conservés pour protéger des espèces rares ou en danger, dont beaucoup sont reconnues comme utiles pour la forêt.

L'exploitation forestière peut parfois avoir des effets positifs sur l'environnement ou la sylviculture ;

- de petites coupes peuvent provisoirement restaurer des « milieux ouverts » utiles à certaines espèces inféodées à ces milieux;
- la suppression d'arbres endommagés ou malades, en ouvrant la canopée pour accélérer la croissance d'arbres plus petits par leur mise en lumière;
- les rémanents (branches et autres parties non commercialisables de l'arbre (s'ils sont laissés sur place) fournissent un abri pour une partie de la faune et une source d'humus. De même, les broussailles et l'enherbement (quand ils sont conservés assez longtemps) constituent une importante source de nourriture pour les herbivores et omnivores, dont le chevreuil, le cerf et les sangliers qui représentent une part importante des revenus forestiers (locations, baux de chasse).

Les Accords internationaux sur les bois tropicaux[32] sont des accords signés sous l'égide de l'ONU concernant le commerce des bois tropicaux. Trois accords ont été signés, le premier le 18 novembre 1983, le second le 26 janvier 1994 et enfin le dernier en 2006. Ce sont des accords visant à fournir un cadre de coopération efficace entre les pays producteurs de bois tropicaux et des pays consommateurs. Ils ont pour objectif d'encourager l'élaboration de politiques de développement durable, de conservation des forêts tropicales et de leurs ressources génétiques.

30 gros-bois: dans le domaine de la sylviculture, on distingue les bois selon leurs essences, mais aussi selon leurs classes de diamètres. Les notions de gros-bois ou très gros bois désignent les arbres dont les diamètres sont les plus gros.

31 sénescent: atteint de la sénescence c.-à-d. vieillissement naturel des tissus et de l'organisme.

32 Source: http://www.europarl.europa.eu

Les processus de fabrication, impacts sur la qualité de l'air atmosphérique, de l'eau et du sol

Le secteur de la construction en Europe consomme aujourd'hui, toutes échelles confondues, près de la moitié des ressources naturelles énergétiques et non énergétiques exploitées. Ces ressources sont utilisées pour la fabrication et le transport de matériaux de construction, pour leur mise en œuvre et leur entretien ou remplacement ainsi que pour leur élimination en fin de vie.
Cette consommation a des conséquences visibles et prouvées sur la qualité des eaux, la qualité des sols ainsi que sur la qualité de l'air que nous respirons; et par conséquent, sur les différents écosystèmes et les différentes espèces de la faune et la flore qui peuplent notre planète, y compris l'être humain.
Les principaux impacts environnementaux ou du moins ceux qui aujourd'hui peuvent être clairement identifiés et quantifiés sont la pollution atmosphérique, la pollution et la modification des sols et la pollution des eaux de surface.
Le terme " pollution " désigne la dégradation d'un biotope par l'introduction, généralement humaine, de substances chimiques ou organiques, de gènes ou de radiations, altérant de manière plus ou moins importante le fonctionnement de l'écosystème. Par extension, ce terme désigne aussi parfois les conséquences de phénomènes naturels, climatiques ou géologiques.
Le terme " pollution atmosphérique " désigne une pollution caractérisée par une altération des niveaux de qualité et de pureté de l'air. Cette dégradation est généralement causée par un ou plusieurs éléments dont les degrés de concentration et les durées de présence dans l'air sont suffisants pour produire un effet toxique et/ou écotoxique.
La pollution atmosphérique a comme conséquences majeures sur l'environnement l'effet de serre, l'acidification, l'eutrophisation, la pollution photochimique et la destruction de la couche d'ozone stratosphérique.
Les sources de pollution peuvent être soit naturelles, c.-à-d. présentes sur Terre avant l'apparition de l'homme (volcanisme, érosion éolienne, émissions naturelles de méthane…) soit anthropique, c.-à-d. liées aux activités humaines (industries, transports, agriculture, chauffage, climatisation…).
Pour bien comprendre l'implication humaine sur la pollution - essentiellement atmosphérique - et surtout ses enjeux, nous allons dans un premier temps exposer et analyser les grands cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote, du phosphore et du soufre qui, avec l'eau, ont permis l'apparition, le développement et le maintien de la vie sur Terre.
Les sources naturelles de pollution existent depuis la création de la Terre. Elles sont englobées dans un processus cyclique lié à la vie terrestre et aux échanges entre les différents milieux qui y cohabitent.

Nous aborderons ensuite les différents phénomènes liés à la pollution anthropique: effet de serre, acidification, eutrophisation, problèmes liés à l'ozone. Nous mettrons en avant à la fois les causes de ces phénomènes, mais également leurs conséquences et la manière dont l'homme, à travers les différents outils législatifs, essaie d'enrayer ces phénomènes.

1. Cycles biogéochimiques

La Terre doit être considérée comme un système, c.-à-d. un ensemble composé de divers éléments, reliés entre eux et fonctionnant comme un tout.
Ce système terrestre a permis l'apparition de la vie et son maintien, grâce en partie à la présence d'oxygène et d'eau liquide, mais également grâce aux différents systèmes de recyclage des éléments essentiels à la vie : le carbone, l'azote, le phosphore et le soufre. Ces systèmes de recyclage, également appelés cycles biogéochimiques agissent sur les quatre composantes du système terrestre : l'atmosphère, la biosphère, l'hydrosphère et la lithosphère.
Ces cycles interagissent entre eux et confèrent à la bios-

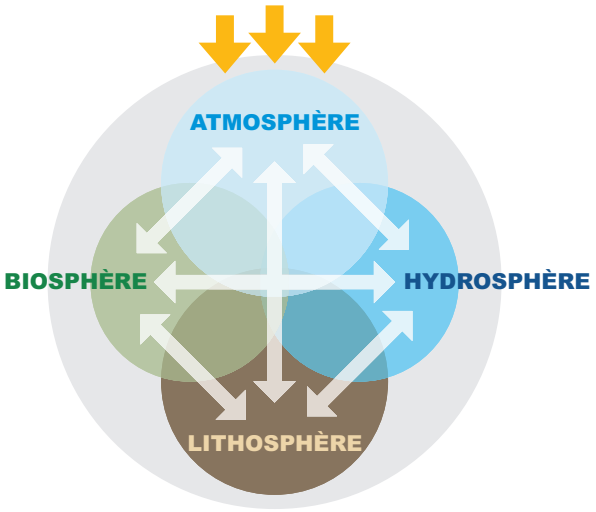


Illustration B3.01 : Les échanges entre les 4 composantes du système terrestre

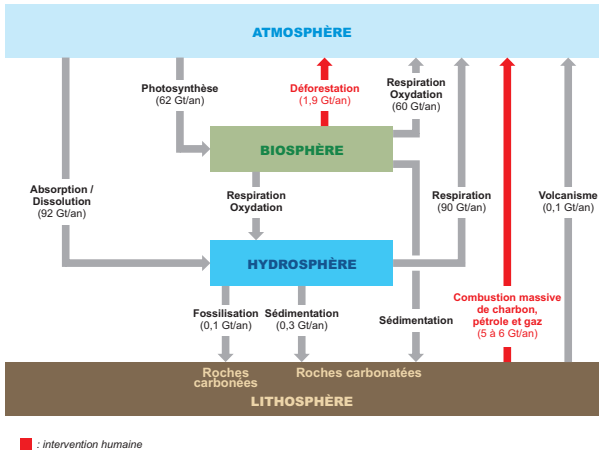


Illustration B3.02 : Cycle global du carbone

phère une capacité de régulation, appelée homéostasie. Cette régulation assure la pérennité des écosystèmes en dehors des interventions humaines et phénomènes géoclimatiques exceptionnels.
Les sources anthropiques de pollution, en augmentant sensiblement les quantités de carbone, d'azote, de phosphore et de soufre dans les différents cycles biogéochimiques, transforment ces éléments en « matière polluante » et engendrent ainsi un dérèglement de cette capacité de régulation : les apports sont supérieurs à ce que les quatre milieux récepteurs peuvent absorber ou transformer.

1.1. Cycle du carbone

Le carbone, avec l'hydrogène (H), l'hélium (He) et l'oxygène (O), est un des éléments les plus abondants dans le cosmos. Sur Terre, le carbone est le constituant majeur du dioxyde de carbone (CO_2) et du méthane (CH_4) qui sont tous deux des gaz à effet de serre.
Le recyclage du carbone influence considérablement la productivité biologique et le climat.
Dans la nature, le carbone se retrouve sous deux formes: le carbone organique et le carbone inorganique.
Le carbone organique est produit par des organismes vivants et est lié à d'autres carbones ou éléments comme l'hydrogène, l'azote ou le phosphore dans les molécules organiques ou dans les hydrocarbures.
Le carbone inorganique est associé à des composés inorganiques qui ne sont pas liés à d'autres éléments carbone ou hydrogène comme par exemple le CO_4 atmosphérique ou le carbone des calcaires $CaCO_3$.
Le cycle du carbone correspond à l'ensemble des échanges d'éléments carbone entre les différents sphères ou milieux (également appelés réservoirs) : les océans et les eaux de surface, les roches, la biomasse, la nécromasse et l'atmosphère.
Le schéma B3.02 ci-contre représente le cycle global du carbone et les échanges ou flux de carbone entre ces réservoirs exprimés en gigatonnes par an (Gt/an).
On y voit également l'intervention humaine, essentiellement au niveau de la déforestation et de l'utilisation de combustibles fossiles.

Au niveau des flux entre les réservoirs, on évalue le temps de résidence d'un atome de carbone à quatre ans dans l'atmosphère, à onze ans dans la biosphère, à 385 ans dans l'hydrosphère superficielle à plus de 100 Ka (milliers d'années) dans l'océan profond et à quelque 200 Ma (millions d'années) dans la lithosphère.
On constate donc que dans le cycle du carbone, il y a des sous-cycles qui opèrent à différentes échelles : de la décennie (recyclage du carbone par les plantes) aux centaines de millions d'années (recyclage du carbone organique par les roches sédimentaires ou les hydrocarbures).
L'ensemble des processus chimiques, physiques et biologiques impliqués dans ces recyclages sont intimement liés. Cependant, afin de simplifier la compréhension, nous avons artificiellement séparé le cycle du carbone organique et le cycle du carbone inorganique.

Cycle court du carbone organique

Par cycle court, on entend des processus ou des échanges qui s'étalent sur des durées inférieures au siècle ou à la vie d'un être humain. Le processus élémentaire de ce cycle court est le couple «photosynthèse – respiration » c.-à-d. la conversion du dioxyde de carbone (CO_2 - carbone inorganique) en carbone organique par la photosynthèse et en même temps, à l'inverse, la conversion du carbone organique (stocké dans la matière organique des êtres vivants) en dioxyde de carbone (CO_2) par la respiration et la fermentation.
Trois réactions de base doivent être prises en considération :

- La photosynthèse

Le processus de la photosynthèse utilise l'énergie so-

laire pour synthétiser la matière organique en fixant le carbone dans les hydrates de carbone (CH_2O) suivant la réaction suivante :

$$CO_2 + H_2O + \text{énergie solaire} > CH_2O + O_2$$

La matière organique est représentée ici sous sa forme la plus simple.

Cette partie de la matière organique correspond à la production primaire et les organismes impliqués dans celle-ci sont les bactéries, les algues et les plantes, appelés producteurs primaires. Ces producteurs primaires captent l'énergie solaire et la transforment en énergie chimique qu'ils stockent dans leurs tissus.

Cette énergie est alors transmise aux organismes consommateurs (insectes, plancton, poissons, faune terrestre,…), sachant que la biomasse des consommateurs est bien inférieure à celle des producteurs primaires et représente environ 1 % de la biomasse totale. Les consommateurs tirent leur énergie de celle contenue dans les producteurs primaires en ingérant leurs tissus et en respirant.

- La respiration

La respiration est l'inverse de la photosynthèse dans la mesure où, à partir de l'oxygène, elle transforme toute matière organique en dioxyde de carbone (CO_2) suivant la réaction :

$$CH_2O + O_2 > CO_2 + H_2O$$

Cette réaction nécessite la disponibilité d'oxygène libre. Dans la nature, une partie de la matière organique est oxydée ou respirée par la faune et la flore.

Une autre partie se retrouve décomposée sous l'action de micro-organismes (aérobies et anaérobies) dans les sols et les sédiments marins. Les micro-organismes anaérobies décomposent la matière organique, en l'absence d'oxygène libre, par un processus de fermentation.

- L'oxydation / fermentation

La fermentation produit du dioxyde de carbone et du méthane suivant la réaction :

$$CH_2O > CO_2 + CH_4$$

Ces deux gaz peuvent s'échapper dans l'atmosphère oxygénée.

Le méthane, en contact avec l'atmosphère, est alors oxydé et se transforme rapidement en dioxyde de carbone. Cependant et fort heureusement, une grande partie de ce méthane est contenue dans les sédiments où elle forme des réservoirs de gaz naturel.

Cycle long du carbone organique

Les trois processus présentés ci-dessus affectent le cycle court du carbone organique et en particulier l'équilibre du dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique à une échelle de temps inférieure au siècle.

Sur des échelles de temps beaucoup plus importantes, les processus sont de nature géologique comme l'enfouissement des matières organiques dans les sédiments puis dans les roches sédimentaires, la transformation des matières organiques en combustibles fossiles, etc.

Les flux liés à ces processus sont relativement faibles, mais les réservoirs en revanche sont très importants et le temps de résidence du carbone extrêmement long.

L'extraction et la combustion des combustibles fossiles que l'homme pratique allègrement depuis plusieurs décennies sont venues transformer en partie ce cycle long en cycle court, d'où l'augmentation substantielle de la présence de CO_2 dans notre atmosphère.

Cycle du carbone inorganique

D'autres processus que ceux présentés ci-dessus ont pour fonction de recycler le carbone inorganique contenu dans le dioxyde de carbone et dans les calcaires. Les principaux réservoirs de carbone inorganique sont les océans, les sédiments et les roches carbonatées.

L'illustration B3.03 ci-après présente le cycle du carbone inorganique. Celui-ci donne une indication sur la dimension des réservoirs ainsi que sur l'importance

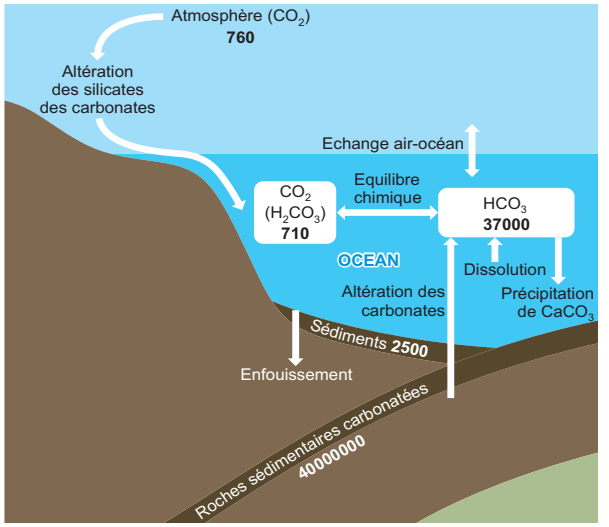


Illustration B3.03 : Cycle du carbone inorganique

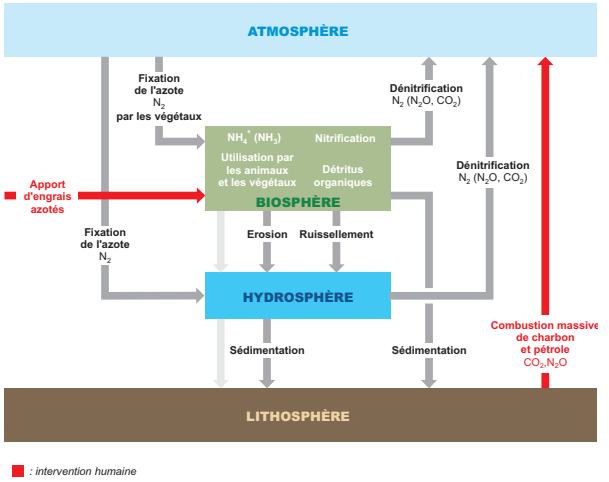


Illustration B3.04 : Cycle de l'azote

des flux entre ceux-ci. Un premier processus d'échange s'effectue entre l'atmosphère et les océans.
Ces échanges sont à l'équilibre : le dioxyde de carbone est absorbé par le phytoplancton qui le stocke dans sa matière organique.
L'altération chimique des roches à la surface de la Terre convertit le dioxyde de carbone dissout dans les eaux météoriques (eaux de pluie et de ruissellement) en bicarbonate (HCO_3-) qui est transporté par ces mêmes eaux dans les océans. Les organismes marins utilisent le bicarbonate et le combinent aux ions de calcium (Ca_2+) pour former du carbonate de calcium nécessaire au développement de leur squelette ou de leur coquille ($CaCO_3$). Ce carbonate de calcium est en partie dissout dans l'océan et une autre partie s'accumule au fond des océans pour former des roches sédimentaires. Ces roches sont ramenées à la surface après plusieurs millions d'années par les mouvements tectoniques pour une partie, l'autre partie, étant recyclée dans les magmas, retourne dans l'atmosphère sous forme de CO_2 émis par les volcans.

1.2. Cycle de l'azote[1]

L'étymologie du mot azote (a-zote) signifie privé de vie.
L'air atmosphérique est constitué par plus de 78 % d'azote moléculaire sous forme de diazote (N_2), un gaz relativement inerte.
L'azote est un composé essentiel à de nombreux processus biologiques : les organismes ont besoin d'azote pour fabriquer des protéines notamment et des acides nucléiques. Cependant, la plupart des organismes ne peuvent utiliser telle quelle la molécule N_2: ils utilisent de l'azote dit « fixé » dans lequel les atomes d'azote sont liés à d'autres atomes comme l'hydrogène par exemple dans l'ammoniac (NH_3) ou l'oxygène dans les ions nitrates NO_3.
Le cycle de l'azote est un cycle biogéochimique très complexe qui décrit la succession des modifications subies par les différentes formes de l'azote (diazote, nitrate, nitrite, ammoniac, azote organique). L'illustration B3.04 ci-avant en présente une simplification.
Trois processus de base sont impliqués dans le recyclage de l'azote : la fixation du diazote N_2, la nitrification et la dénitrification.

Fixation de l'azote

La fixation de l'azote est un processus qui convertit l'azote atmosphérique en azote utilisable par la flore et la faune : l'azote atmosphérique est fixé par des bactéries présentes dans le sol. Celles-ci produisent des ions ammonium (NH4+). La réaction chimique est la suivante :

$$2N_2 + 3CH_2O + 3H_2O \rightarrow 4NH_{4+} + 3CO_2$$

Dans les sols où le pH est élevé, les ions d'ammonium se transforment en ammoniac gazeux.

$$NH_{4+} + OH^- \rightarrow NH_3 + H_2O$$

Nitrification

La nitrification transforme les produits de la fixation (NH_{4+} et NH_3) en NOx, à savoir des nitrates et des nitrites. Cette transformation est le résultat d'une réaction d'oxydation qui se fait par des bactéries présentes dans l'eau et dans le sol. La réaction en chaîne est la suivante:

$$NH_{4+} \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO_3^-$$

$$2NH_{4+} + 3O_2 \rightarrow 2NO_2^- + 2H_2O + 4H_+$$

$$2NO_2 + O_2 \rightarrow 2NO_3^-$$

Grâce à leurs racines, les végétaux absorbent les nitrates et, dans une moindre mesure, l'ammonium présents dans le sol, et les incorporent dans les acides aminés et les protéines. Les végétaux constituent ainsi la source primaire d'azote assimilable par les animaux.

La dénitrification

La dénitrification est le processus inverse de la nitrification dans lequel l'azote retourne dans l'atmosphère sous forme de diazote. Cette réaction entraîne des produits secondaires : du dioxyde de carbone et de l'oxyde d'azote qui est un gaz à effet de serre contribuant à la destruction de la couche d'ozone stratosphérique. La réaction est la suivante :

$$4NO_3^- + 5(CH_2O) + 4H_+ \rightarrow 2N_2 + 5CO_2 + 7H_2O$$

Sous forme de nitrate ou d'ammoniac, l'azote est très soluble dans l'eau et donc fort mobile dans les écosystèmes.
Le ruissellement, l'érosion et les pluies tendent à ramener les nitrates non captés par la biomasse terrestre vers les lacs et surtout vers les nappes phréatiques et les océans. Dans la mer, comme sur terre, l'azote dissout dans l'eau est capté par les plantes et certaines bactéries, puis concentré dans les réseaux de relations alimentaires entre organismes, notamment sous forme de protéines animales.
L'activité humaine contribue à l'augmentation de la dénitrification entre autres par l'utilisation d'engrais azotés. Ceux-ci augmentent la quantité de composés ammoniaqués (NH_{4+}, NH_3) et des nitrates dans le sol.

Remarque :
Tout poisson ou autre organisme marin concentre dans sa matière organique une partie de l'azote accumulé par les végétaux ou animaux qu'il a consommés, lesquels l'ont prélevé dans le stock océanique qui lui-même est alimenté par l'atmosphère, et de plus en plus excessivement par les apports terrigènes (engrais et eaux usées essentiellement).
Chaque poisson pêché en mer correspond donc à un retrait d'azote du compartiment océanique.
Or, depuis le développement de la pêche industrielle et intensive, les apports anthropiques ne sont plus négligeables. Une

1 Cycle de l'azote: source: http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/cycle.azote.html

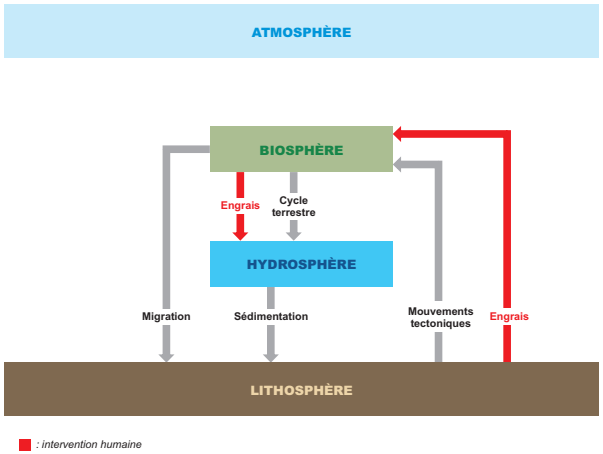


Illustration B3.05 : Cycle du phosphore

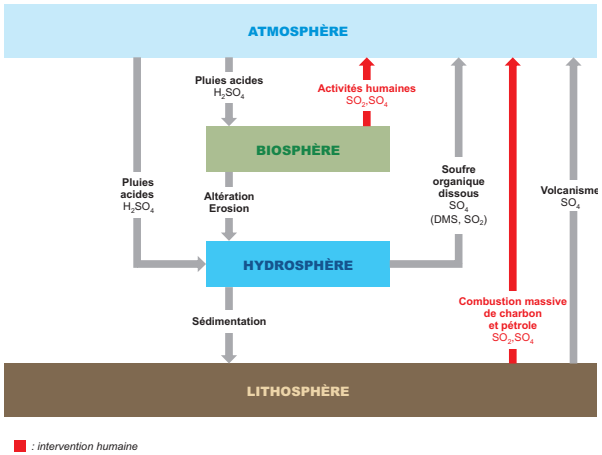


Illustration B3.06 : Cycle du soufre

étude récente, à l'initiative de Greenpeace (2008), sur le cycle de l'azote dans les régions côtières, a évalué cette quantité pour 58 écosystèmes marins répartis sur le globe. En 1960, la pêche en mer ramenait vers la terre 60 % des composés azotés estimés être anthropiques. Or, de 1960 à 2004, ces apports azotés ont été multipliés par 7,5, alors qu'en raison d'une raréfaction des espèces commercialisables suite à la surexploitation des océans, les prises de pêche n'ont augmenté que de 2,5.

En 2008, seulement 20 % de l'azote anthropique ont été « récupérés » par les activités de pêche. Cette diminution entraînerait un risque important d'eutrophisation. C'est notamment le cas pour une partie du Mississippi et golfe du Mexique qui est devenue une zone morte (22 km² d'eau morte) suite à un apport intensif d'azote anthropique lié à l'agriculture intensive et à l'utilisation d'engrais azotés dans les régions environnantes.

1.3. Cycle du phosphore

Le phosphore, tout comme l'azote, est un élément important pour la vie sur Terre puisqu'il participe à la fabrication des acides nucléiques ARN et ADN.

Contrairement aux autres cycles biogéochimiques, le cycle du phosphore ne possède pas de composantes gazeuses et de ce fait n'affecte pas ou très peu l'atmosphère.

Il se distingue également des autres cycles par le fait que les échanges entre les différents réservoirs ne sont pas contrôlés par des réactions microbiennes ou bactériennes.

Le phosphore est à l'origine issu des roches éruptives. C'est par l'érosion et l'altération superficielle de celles-ci sur des millions d'années que le phosphore a été transféré dans les océans.

Bien que les sols contiennent un grand volume de phosphore, une petite partie seulement est accessible aux organismes vivants. Celui-ci est absorbé par les plantes et transféré aux animaux par leur alimentation. Une partie de ce phosphore, une fois absorbé, retourne dans la lithosphère, à partir des excréments et de la décomposition de la matière organique.

Une autre partie du stock de phosphore est transporté vers les océans par les pluies de ruissellement où il est soit utilisé par le plancton et d'autres organismes vivants pour secréter leur squelette, soit déposé sur les fonds marins et intégré aux sédiments. Ceux-ci sont progressivement transformés en roches sédimentaires par effet d'enfouissement.

1.4. Cycle du soufre[2]

Le soufre est un élément essentiel à la vie qui, comme le carbone, le phosphore, l'oxygène, l'azote ou encore, l'eau, possède son propre cycle de vie.

Le soufre est présent partout sur Terre, dans l'atmosphère, les océans, les continents, mais aussi chez tous les êtres vivants sous forme de molécules organiques: les acides aminés soufrés, un constituant des protéines.

À l'origine de la Terre, le soufre était contenu dans les roches éruptives. Le dégazage de la croûte terrestre et l'altération superficielle des roches sur des millions d'années ont permis qu'une grande quantité de soufre soit transférée dans les océans, sous forme de sulfates (SO_4^{--}). Lorsque les sulfates sont assimilés par les organismes vivants, ils sont réduits et convertis en soufre organique qui est un élément essentiel des protéines. Comme dans le cycle de l'azote, les réactions microbiennes sont déterminantes dans le cycle du soufre. Les principales étapes du cycle du soufre sont :

- la minéralisation du soufre organique en une forme inorganique : le sulfure d'hydrogène (H_2S);
- l'oxydation du sulfure, du soufre élémentaire (S) et de ses composés connexes en sulfates (SO_4^{--});
- la réduction des sulfates en sulfures;
- l'immobilisation microbienne des composés soufrés et leur incorporation dans une forme organique du

2 Source: http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/cycle.soufre.html

soufre.
Les composés du soufre sont multiples. On les retrouve dans l'atmosphère à l'état gazeux sous forme de dioxyde de soufre (SO_2), de sulfates en aérosols (SO_4), dans le diméthylsulfure DMS (CH_3SCH_3) et dans le carbonyl de sulfure (COS). On les retrouve également dans les sytèmes aquatiques sous forme de sulfates dissous (SO_4^-) et dans les sédiments et roches sédimentaires dans la matière organique, sous forme de sulfure métallique et sous forme d'évaporites[3].

Au niveau du cycle océanique, le diméthylsulfure (DMS) est produit naturellement par la décomposition des cellules du phytoplancton dans la couche supérieure de l'océan. Il s'échappe dans l'atmosphère où en quelques jours, il est oxydé en dioxyde (SO_2) puis en sulfate (SO_4) qui se condense en minuscules particules. Ces particules deviennent les noyaux à l'origine des gouttes de pluie et des nuages. Ces nuages vont tempérer le réchauffement de la Terre, mais vont également contribuer à des précipitations acides suite à la réaction des aérosols avec la vapeur d'eau et le rayonnement solaire. Il en est de même pour le carbonyl de sulfure (COS).
Une autre influence naturelle importante sur le cycle du soufre est celle des volcans. Parmi les gaz que ceux-ci émettent (jusque dans la stratosphère), il y a les sulfates SO_4 en aérosols qui viennent s'ajouter à ceux qui sont issus du COS. Couplées aux émissions de cendres créant un effet de voile, ces émissions de sulfates peuvent provoquer des refroidissements à très court terme.
Au niveau des continents, l'altération et l'érosion des sulfures métalliques, ainsi que le transport de poussières de sulfates (gypse et anhydrite) dans les déserts transfèrent du soufre aux océans. Les gaz biogéniques des sols anaérobies et des marécages contiennent aussi du H_2S, ainsi que du DMS et du COS en moindre quantité, lesquels sont libérés dans l'atmosphère. Mais la plus grande contribution en composés sulfurés vient de la combustion des pétroles et des charbons qui contiennent pratiquement toujours du soufre. Ce sont des émissions de sulfates SO_4, mais surtout de dioxyde de soufre SO_2. Sous l'effet des radiations solaires, ce dioxyde se combine avec la vapeur d'eau et les radicaux OH pour former de minuscules gouttes de H_2SO_4 (acide sulfurique), un processus en partie responsable des pluies acides. Le flux anthropique de ces gaz excède par endroits de beaucoup le flux naturel. On peut dire que globalement le flux principal dans l'échange de soufre entre la surface de la Terre et l'atmosphère est d'origine anthropique et lié à la combustion des hydrocarbures et des charbons.

En parcourant les phénomènes qui régissent ces différents cycles biogéochimiques, nous pouvons conclure que sur Terre, tout est lié. Les grands réservoirs que sont l'atmosphère, la biosphère, l'hydrosphère et la lithosphère connaissent des échanges constants d'éléments organiques ou inorganiques. Les cycles s'influencent l'un l'autre, chacun produisant des matières ou des éléments « polluant » les autres cycles.
Exemple :
Le cycle du soufre produit de l'H_2S lors de la réduction catabolique du soufre sous forme de SO_4^{--}. L'H_2S va piéger le fer sous forme de FeS_2. Le piégeage du fer va bloquer le cycle du phosphore, car le fer ne pourra plus piéger le phosphate. Le phosphate non piégé servira à la prolifération des algues et sera déterminant dans le phénomène d'eutrophisation.

Il est donc important et même vital, en termes de pollution atmosphérique:
- d'avoir une vision globale sur l'ensemble des phénomènes et de ne pas se limiter à un type de pollution

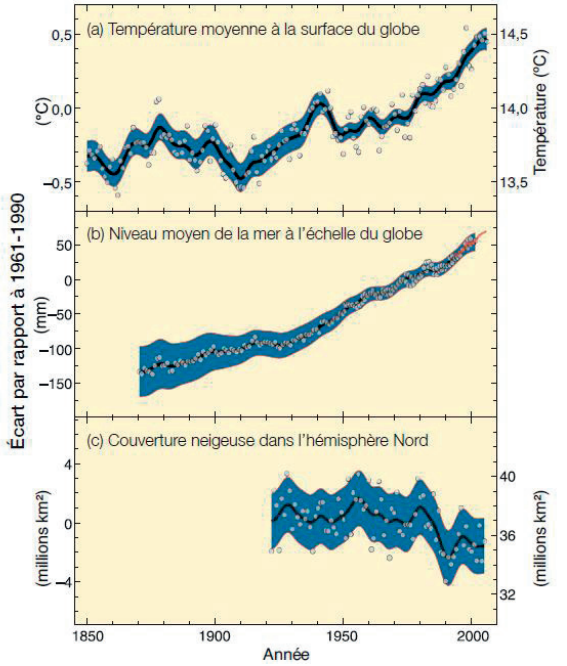


Illustration B3.07 : Conséquences du réchauffement climatique
Source: [GIEC 2007c]

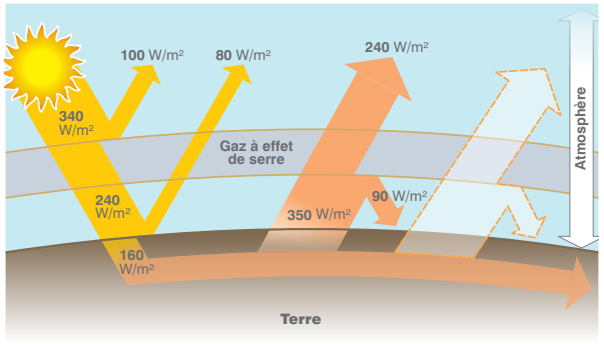


Illustration B3.08 : Description de l'effet de serre

3 évaporite: substance qui s'est déposée lors de l'évaporation des eaux salées contenues dans des mers fermées, des lacs, etc.

atmosphérique même si celle-ci est conséquente;
- de limiter les impacts anthropiques, qui en augmentant la quantité de matières « polluantes » dérèglent les systèmes d'échanges qui sont à l'origine de l'apparition de la vie sur Terre;
- de tenir compte des différentes échelles d'influence d'une pollution: une pollution peut être globale, régionale ou locale.

2. Émission de gaz à effet de serre et réchauffement climatique (phénomène global)

La pollution atmosphérique qui est actuellement la plus médiatisée est la pollution liée aux émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.
Il est communément admis aujourd'hui que les émissions anthropiques de gaz à effet de serre contribuent au réchauffement climatique.
Le réchauffement climatique, également appelé réchauffement planétaire, est un phénomène global d'augmentation de la température moyenne des océans et de l'atmosphère, à l'échelle mondiale sur plusieurs années.
Ce réchauffement global est observé depuis les dernières décennies du 20e siècle, notamment par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC): « Le réchauffement du système climatique est sans équivoque. On note déjà, à l'échelle du globe, une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan, une fonte massive de la neige et de la glace et une élévation du niveau moyen de la mer. Onze des douze dernières années (1995–2006) figurent parmi les douze années les plus chaudes depuis 1850, date à laquelle ont débuté les relevés instrumentaux de la température à la surface du globe. »

2.1. Le phénomène d'effet de serre

L'effet de serre est un phénomène naturel et vital : sans ce phénomène, la température moyenne à la surface de la Terre serait de -18 °C au lieu des 15 °C moyens observés. Il permet également à l'eau d'être présente sur Terre à l'état liquide et offre ainsi les conditions élémentaires et nécessaires au développement de la vie.

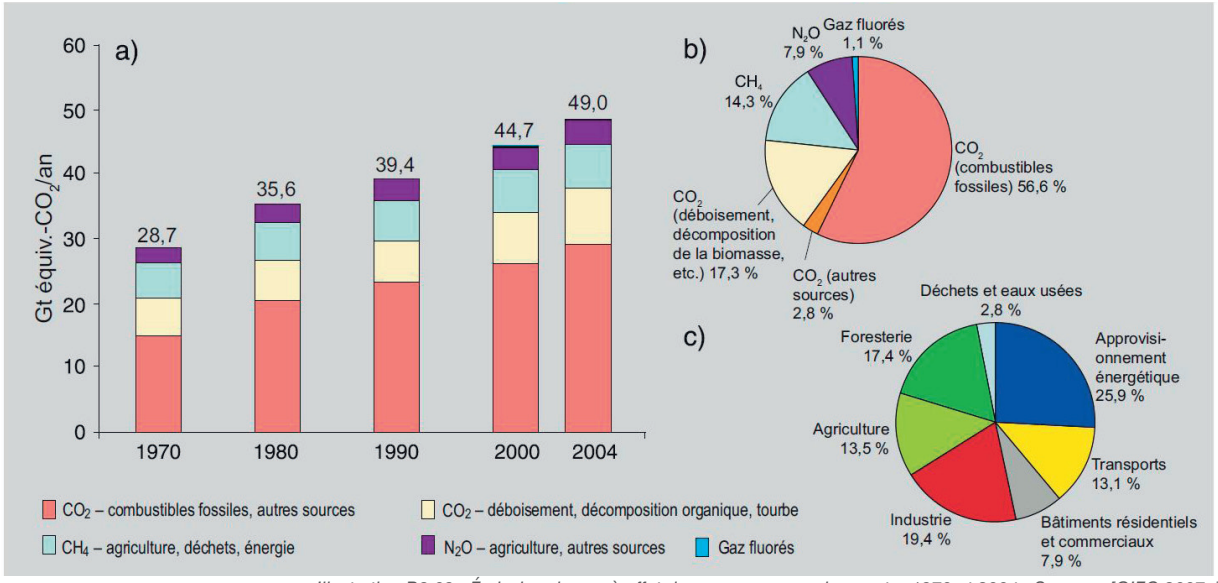


Illustration B3.09 : Émission de gaz à effet de serre - comparaison entre 1970 et 2004 - Source : [GIEC 2007a]

Mesure de l'effet de serre

Le soleil est notre source d'énergie la plus importante. La constance solaire est de 1368W/m².
La moyenne de l'énergie reçue par la Terre, des pôles à l'équateur est d'environ 342W/m². Sur les 342W/m² que la Terre reçoit du Soleil, seuls 160W/m² atteignent le sol (80W/m² étant réfléchis par l'atmosphère, 20W/m² étant réfléchis par la surface terrestre et 80W/m² étant absorbés par la stratosphère et la troposphère). Pour que la Terre atteigne une température moyenne de 15 °C, il faudrait qu'elle absorbe 390W/m². Les 230W/m² manquants sont fournis par l'atmosphère et constituent ce qu'on appelle l'effet de serre.

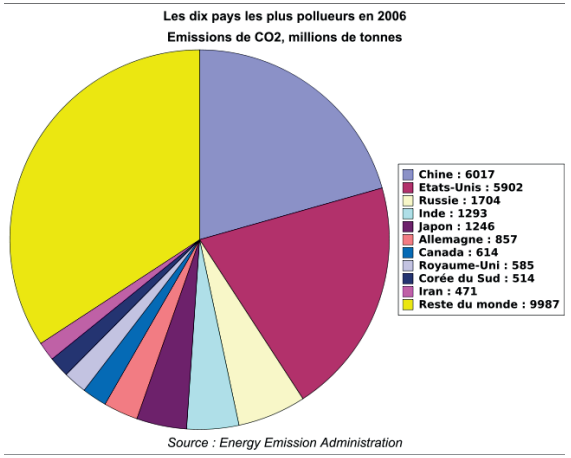


Illustration B3.10 : Les 10 pays les plus pollueurs - 2006

Suivant le schéma B3.08, le phénomène de l'effet de serre peut s'expliquer de manière suivante : la surface de la Terre absorbe près de la moitié de l'énergie solaire qui pénètre dans l'atmosphère. Ce faisant, la surface de la Terre se réchauffe et réémet l'énergie sous forme de rayonnement infrarouge dont une partie est absorbée par les nuages et certains gaz de l'atmosphère. Les nuages et ces gaz se comportent comme un couvercle qui réfléchit une partie de cette énergie thermique vers le sol et réchauffe ainsi les basses couches de l'atmosphère. Ce processus est appelé « effet de serre » et assure une température stable à la surface de la Terre.
Les gaz qui ont la capacité d'absorber ou piéger le rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre sont appelés gaz à effet de serre (GES). Ce sont des constituants mineurs de l'atmosphère, mais leur rôle est primordial puisqu'ils permettent de retenir sur Terre une partie de la chaleur apportée par le rayonnement solaire.

2.2. Les gaz à effet de serre (GES)

Les principaux gaz à effet de serre qui existent naturellement dans l'atmosphère sont la vapeur d'eau (H_2O), le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), le protoxyde d'azote (N_2O) et l'ozone (O_3).
L'eau, sous forme de vapeur ou de nuage, est le gaz à effet de serre le plus important en quantité. Elle contribue à raison de 60 %[4] à l'effet de serre total et son rôle est facilement observable : les nuits d'hiver où la couche nuageuse est absente sont beaucoup plus froides.
Les sources naturelles de gaz à effet de serre sont principalement les volcans lorsque ceux-ci entrent en activité, les rejets naturels de méthane par les animaux et la décomposition de la matière végétale en milieu humide (estuaires, marais…).
Les gaz à effet de serre additionnels ou anthropiques jouent également un rôle important, car l'effet de serre qu'ils produisent est très intense. Outre les principaux gaz déjà cités ci-dessus, ils sont constitués des gaz fluorés comme les hydrofluorocarbones (HFC), les chlorofluorocarbures (CFC), les polyfluorocarbones (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF_6).
Le dioxyde de carbone (CO_2) est le principal (en quantité) gaz à effet de serre produit par l'activité humaine, 74 %[5] du total (tous modes d'émission réunis).
Les concentrations de ces gaz à effet de serre dans l'atmosphère augmentent depuis le 19e siècle, notamment suite à l'utilisation massive des énergies fossiles, l'agriculture et l'élevage intensifs (production de méthane), l'utilisation de gaz CFC dans les systèmes de réfrigération et de climatisation, mais également la déforestation qui réduit fortement les puits naturels de carbone.
Force est également de constater que l'augmentation de ces gaz à effet de serre entraîne un effet « boule de neige » liant à la fois les causes et les conséquences. En effet, l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère augmente le phénomène de l'effet de serre, entraînant ainsi un réchauffement global de la température. Ce réchauffement nuit à la fixation du CO_2 dans la biosphère et dans l'hydrosphère, augmentant ainsi les quantités de CO_2 dans l'atmosphère… et ainsi de suite.

Émission mondiale de gaz à effet de serre

Le GIEC constate, dans son rapport de 2007 sur les changements climatiques, que les rejets annuels de dioxyde de carbone anthropique ont augmenté de 80 % environ entre 1970 et 2004.
Toujours selon le GIEC, depuis 1750, sous l'effet des activités humaines, les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone (CO_2), de méthane (CH_4) et d'oxyde nitreux (N_2O) se sont fortement accrues.
La cause première de la hausse de concentration du CO_2 est l'utilisation d'énergies fossiles. Il est probable que la hausse de concentration du CH_4 soit due essentiellement à l'utilisation des énergies fossiles et à l'agriculture. Quant à la hausse de concentration du N_2O, elle est essentiellement due à l'agriculture.
La situation est très contrastée selon les zones géographiques. En 2006, les deux pays plus gros émetteurs de CO2 étaient les États-Unis (20,3 % des émissions mondiales), suivis de très près par la Chine (20,2 %). Toutefois, de par son développement économique et industriel, la Chine est devenue depuis 2006 le plus gros émetteur mondial de CO2.
Dans l'Union européenne, la France est l'un des plus faibles émetteurs, par rapport à sa population, ce qui est dû à une très forte proportion de production d'électricité d'origine nucléaire et hydraulique.
En 2005, selon les derniers chiffres officiels[6], la Belgique a émis 143,8 millions de tonnes (Mt) d'équivalent CO_2.
La répartition entre les régions s'établissait comme suit :

- Région flamande : 89,9 Mt, soit 62,5 % des émissions belges;
- Région wallonne : 49,6 Mt, soit 34,5 % des émissions belges;
- Région bruxelloise : 4,3 Mt, soit 3 % des émissions belges.

En Europe, le secteur de la construction est responsable d'environ 30 % des émissions de gaz à effet de serre[7]. C'est également, avec le secteur du transport, un des secteurs où le potentiel de diminution, à court terme, est relativement important[8]

Gaz à effet de serre et Protocole de Kyoto

Le Protocole de Kyoto est un traité international visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre, dans le

4 Source: GIEC – www.giec.com

5 Source : www.manicore.com - site internet de Jean Marc Jancovici

6 Source: http://airclimat.wallonie.be

7 Source: [LIEBARD 2005]

8 Source: [GIEC 2007c]

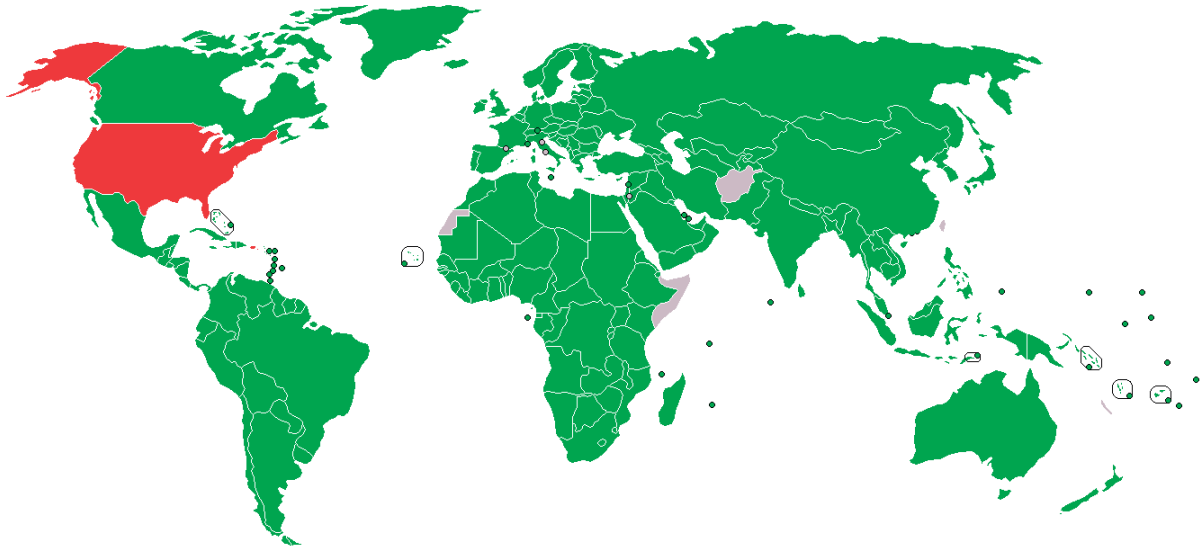


Illustration B3.11 : Pays signataires du Protocole de Kyoto - 2010. Il faut toutefois insister sur le fait que le Canada vient de se retirer du protocole.

cadre de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques dont les pays participants se rencontrent une fois par an depuis 1995.
Signé le 11 décembre 1997 lors de la troisième conférence annuelle de la Convention à Kyoto, au Japon, il est entré en vigueur le 16 février 2005 et a été ratifié par 141 pays en 2010 ; les États-Unis n'en font pas partie.
La plupart des pays industrialisés se sont engagés à réduire globalement leurs émissions de 5 % par rapport à leur niveau de l'année de référence (1990 pour le CO_2, CH_4 et N_2O et 1995 pour le HFC, PFC et SF_6). Cet engagement, bien que loin d'être suffisant pour diminuer de façon significative les concentrations de GES dans l'atmosphère, constitue un premier pas encourageant même si les scientifiques considèrent que les pays industrialisés devront réduire leurs émissions de 25 % à 40 % à l'horizon 2020 et de 80 % à 95 % à l'horizon 2050.
Dans ce protocole, l'Union européenne s'est engagée à réduire ses émissions de GES de 8 % pour la période 2008-2012, effort qui a été réparti au sein de la « bulle européenne ».
Ainsi, la Belgique s'est vu attribuer un objectif de réduction des émissions de GES de 7,5 % (-7,5 % pour la Région wallonne, -5,2 % pour la Région flamande et -3,475 % pour la Région bruxelloise).
Les gaz à effet de serre pris en considération par le Protocole de Kyoto sont le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), l'oxyde nitreux (N_2O), l'hexafluorure de soufre (SF_6), les hydrofluorocarbures (HFC) et les hydrocarbures perfluorés (PFC). En février 2009, 181 États ont signé et ratifié le protocole de Kyoto de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (voir illustration B3.11 ci-après).

Notion de puits de carbone

Le concept de puits de carbone s'est fortement diffusé avec le Protocole de Kyoto. Ce concept a été créé dans le but de réduire les concentrations élevées et croissantes du dioxyde de carbone atmosphérique et ainsi lutter contre le réchauffement climatique.
Un puits de carbone est un réservoir, naturel ou artificiel, qui absorbe le carbone de l'atmosphère et donc contribue à diminuer la quantité de CO_2 atmosphérique.
Un puits de carbone ne vise pas à réduire les émissions de dioxyde de carbone, c'est seulement un lieu de piégeage naturel ou créé par l'homme.
À l'origine, les principaux puits naturels étaient les processus biologiques de production de charbon, pétrole, gaz naturels, hydrates de méthane et roches calcaires. Aujourd'hui, les principaux puits naturels de carbone sont les océans et l'écosystème forestier.
Les océans sont les principaux puits naturels de carbone, lequel est assimilé par le plancton, les coraux et les poissons, puis transformé en roche sédimentaire ou biogénique.
Les océans absorberaient environ 50 % du carbone émis dans l'air. Le phytoplancton marin utilise la photosynthèse pour extraire le carbone du CO_2. Le plancton et d'autres organismes marins utilisent le dioxyde de carbone dissous dans l'eau ou prélevé dans leur nourriture pour constituer leurs squelettes et coquilles à base de calcaire minéral.
Ce mécanisme élimine le CO_2 contenu dans l'eau et favorise la dissolution de celui contenu dans l'air. Les squelettes et coquilles calcaires ainsi que le «carbone organique» (nécromasse et excréments) de ces organismes tombent finalement en une « pluie » continue (dite « neige marine ») dans les fonds marins où ils sédimentent pour lentement former des roches sédimentaires.
Mais on constate depuis plusieurs dizaines d'années que le réchauffement climatique a pour effet d'augmen-

Tableau B3.01: Temps de séjour des gaz à effet de serre

Dénomination	Formule	Tempsdeséjour (année)
Vapeur d'eau	H_2O	< 1
Dioxyde de carbone	CO_2	15 à 200
Méthane	CH_4	4
Protoxyde d'azote	N_2O	120
dichlorodifluorométhane (CFC-12	CCl_2F_2	130
chlorodifluorométhane (HCFC-22)	$CHClF_2$	12
tétrafluorométhane	CF_4	50 000
hexafluorure de soufre	SF6	3200

Source: GIEC, 4e rapport d'évaluation, 2007

Tableau B3.02: Équivalent carbone des gaz à effet de serre

Dénomination	Formule	PRG	Équivalent carbone (par kg émis)
Vapeur d'eau	H_2O	8	2,18
Dioxyde de carbone	CO_2	1	0,273
Méthane	CH_4	25	6,82
Protoxyde d'azote	N_2O	298	81,3
dichlorodifluorométhane (CFC-12)	CCl_2F_2	6200 à 7100	1690,74 à 1936,17
chlorodifluorométhane (HCFC-22)	$CHClF_2$	1300 à 1400	354,51 à 381,78
tétrafluorométhane	CF_4	6500	1772,55
hexafluorure de soufre	SF6	22 800	6217,56

Source: GIEC, 4e rapport d'évaluation, 2007

ter l'acidité des océans. Cette acidification aurait une influence sur la survie et le bon fonctionnement des récifs coralliens (50 % des récifs semblent « malades ») et sur la disparition potentielle du plancton[9].

L'écosystème forestier et en particulier le système arbre/sol est le second principal puits naturel. Il accumule d'énormes quantités de carbone dans le bois, les racines, le sol et l'écosystème via la photosynthèse.

Les plantes absorbent le CO_2 de l'atmosphère, stockant une partie du carbone prélevé et rejetant de l'oxygène dans l'atmosphère. Chez les arbres, les essences à croissance rapide n'absorbent généralement que peu de carbone et le relarguent vite et facilement. Par contre, les bois durs et denses en contiennent beaucoup plus, et pour le plus longtemps, mais ils croissent généralement bien plus lentement. Arrivé à maturité, un arbre absorbe une quantité moindre de CO_2 mais le carbone représente 20 % en moyenne de son poids.

Quand l'arbre meurt, il est décomposé par des communautés saproxylophages (bactéries, champignons et invertébrés) qui recyclent son carbone sous forme de biomasse, nécromasse et sous forme de gaz (dioxyde de carbone, méthane…) qui sont libérés dans l'atmosphère ou dans l'eau.

La forêt et d'autres écosystèmes continuent à stocker ou recycler ce carbone via une régénération naturelle. Toutes les forêts tempérées accumulent le carbone. Une grande partie des forêts tropicales sont à l'équilibre, à savoir que les quantités émises correspondent aux quantités absorbées.

Les forêts peuvent parfois devenir des « sources » de CO_2, notamment lors d'incendies ou après de grandes coupes rases et des chablis lors de tempêtes.

2.3. Potentiel de réchauffement global

L'ensemble des émissions anthropiques de gaz à effet de serre peut être quantifié et évalué suivant l'impact appelé « potentiel de réchauffement global » (en anglais « global warming potential »), mais plusieurs notions doivent préalablement être expliquées.

Temps de séjour dans l'atmosphère

La première notion est le temps de séjour d'un gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Le temps de séjour d'un gaz à effet de serre est défini comme étant le temps nécessaire pour que leur concentration diminue de moitié.

Hormis la vapeur d'eau, qui est évacuée rapidement, les gaz à effet de serre mettent très longtemps à s'éliminer de l'atmosphère.

Étant donné la complexité du système atmosphérique, il est difficile de préciser la durée exacte de leur séjour. En effet, les gaz à effet de serre peuvent être réduits et/ou éliminés de plusieurs manières :

- par une réaction chimique intervenant dans l'atmosphère;
- par une réaction chimique intervenant à l'interface entre l'atmosphère et la surface du globe comme la photosynthèse qui absorbe du dioxyde de carbone pour le transformer en matière nutritive;
- par des rayonnements : par exemple, les rayonnements électromagnétiques émis par le Soleil et les rayonnements cosmiques « brisent » les molécules dans les couches supérieures de l'atmosphère.

Le tableau B3.01 ci-contre reprend quelques estimations données par le GIEC sur le temps de séjour de certains gaz.

Potentiel d'impact sur le réchauffement climatique

Chaque gaz à effet de serre a un effet différent sur le réchauffement global.

Par exemple, sur une période de 100 ans, un kilo de méthane a un impact sur l'effet de serre 25 fois plus fort qu'un kilo de CO_2.

Pour comparer les émissions de chaque gaz en fonction

9 Source: http://www2.cnrs.fr/presse

de leur impact sur les changements climatiques, on utilise une unité commune, à savoir l'équivalent CO_2.
L'équivalent CO_2 est aussi appelé potentiel de réchauffement global (PRG). Il vaut 1 pour le dioxyde de carbone qui sert de référence.
Le potentiel de réchauffement global d'un gaz est la masse de dioxyde de carbone qui produirait un impact équivalent sur l'effet de serre.
Par exemple, le méthane a un PRG de 25, ce qui signifie qu'il a un pouvoir de réchauffement 25 fois supérieur au dioxyde de carbone.
Dans certaines circonstances, plutôt que de mesurer le poids du gaz carbonique, les scientifiques ont pris l'habitude d'utiliser l'équivalent carbone : plutôt que de comparer au poids de CO_2 émis, on compare au seul poids du carbone contenu dans le CO_2 émis.
Par définition, un kg de CO_2 vaut 0,2727 kg d'équivalent carbone, c.-à-d. le poids du carbone seul dans le composé « gaz carbonique ».
Pour les autres gaz, l'équivalent carbone se calcule suivant la formule :

équivalent carbone = PRG relatif x 0,2727

2.4. Conséquences à moyen terme du réchauffement climatique

Les effets liés au réchauffement climatique et aux changements climatiques se feront sentir à l'échelle mondiale comme à l'échelle régionale, mais également à très long terme.
En effet, selon le GIEC, malgré les politiques d'atténuation et les mesures liées au développement durable, les émissions mondiales de gaz à effet de serre (en équivalent CO_2) continueront d'augmenter (de 25 % à 90 % entre 2000 et 2030).
La poursuite de ces émissions – au rythme actuel ou plus élevé – devrait accentuer le réchauffement et modifier sensiblement le système climatique dans le siècle à venir et « il est probable que ces changements seront plus importants que ceux observés pendant le 20e siècle »[10].
À l'échelle mondiale, les effets attendus sont l'élévation de la température avec un réchauffement d'environ 0.2 °C par décennie au cours des vingt prochaines années. Ce réchauffement planétaire aura comme conséquences :

La montée du niveau des mers

Une des conséquences du réchauffement planétaire sur laquelle s'accordent unanimement les scientifiques est une montée du niveau des océans.
Les scientifiques évaluent la montée du niveau des océans à 12 cm depuis 1880. Deux phénomènes engendrent cette élévation : l'augmentation du volume de l'eau due à la dilatation thermique (+/- 5 cm par 0.5 °C) et l'apport d'eau supplémentaire provenant de la fonte des glaciers continentaux et des calottes polaires (7 cm depuis 1880).
Comme pour la hausse estimée des températures, des incertitudes demeurent concernant l'élévation du niveau des mers. Ces incertitudes sont à la fois liées aux modèles utilisés par les scientifiques et aux émissions futures de gaz à effet de serre.
L'élévation prévue du niveau de la mer en 2100 est de 18 à 59 cm, selon le quatrième rapport du GIEC (2007). Il s'agit probablement d'une estimation minimaliste.
Une montée des eaux de quelques centimètres n'a pas d'impact très visible sur les côtes rocheuses, mais peut avoir des effets très importants sur la dynamique sédimentaire des terres côtières basses (Pays-Bas, grandes plaines autour de deltas…) : inondations, vulnérabilité aux tempêtes, mais également renforcement des capacités érosives de la mer (recul des côtes).

L'impact sur la circulation thermohaline

La circulation thermohaline désigne les mouvements d'eau froide et salée vers les fonds océaniques qui prennent place aux hautes latitudes de l'hémisphère nord. Ce phénomène serait, avec d'autres, responsable du renouvellement des eaux profondes océaniques et de la relative douceur du climat européen.
En cas de réchauffement climatique, le moteur qui anime les courants marins serait menacé.
En effet, les courants acquièrent leur énergie cinétique lors de la plongée des eaux froides et salées, et donc denses, dans les profondeurs de l'océan Arctique. Or, l'augmentation de la température devrait accroître l'évaporation dans les régions tropicales et les précipitations dans les régions de plus haute latitude. L'océan Atlantique, en se réchauffant, recevrait alors plus de pluies.
Une des conséquences directes serait un apport massif d'eau douce aux abords des pôles, entraînant une diminution de la salinité marine et donc de la densité des eaux de surface. Cela peut empêcher leur plongée dans les abysses océaniques. Ainsi, les courants tels que le Gulf Stream pourraient ralentir ou s'arrêter, et ne plus assurer les échanges thermiques actuels entre l'équateur et les zones tempérées. Pour le 21e siècle, le GIEC considère, dans son rapport de 2007, comme très probable un ralentissement de la circulation thermohaline dans l'Atlantique, mais comme très improbable un changement brusque de cette circulation.

Acidification des océans[11]

Outre le réchauffement climatique, les émissions de gaz carbonique sont à l'origine d'un autre phénomène moins connu, mais tout aussi sérieux et inquiétant : l'acidification des océans et son impact direct sur des organismes clés de la faune océanique.
L'acidification de l'océan est le nom donné à la diminution progressive du pH des océans. Il a été estimé

10 Source: [GIEC 2007c]

11 Source: www.ocean-acidification.net

que de 1751 à 2004, le pH des eaux superficielles des océans a diminué de 8,25 à 8,14.
Sur la base des prévisions du GIEC, l'augmentation actuelle du taux de CO_2 dans l'atmosphère devrait encore diminuer le pH des eaux du globe de 8,14 à 7,8 d'ici la fin du siècle.
Depuis 1800, le tiers des émissions de dioxyde de carbone liées aux activités humaines a été absorbé par les océans, ce qui équivaut chaque année à 1 tonne de CO_2 par personne.
Cette absorption massive a permis de réduire les changements climatiques, mais elle entraîne également un bouleversement de la chimie de l'eau de mer. Le CO_2 absorbé provoque en effet une acidification des océans et au rythme des émissions actuelles, on estime que le pH diminuera de 0.4 unité d'ici 2100. Ceci correspond à un triplement de l'acidité moyenne des océans, ce qui est une première dans ces derniers 20 millions d'années[12].
Ce changement pourrait perturber les chaînes alimentaires marines et altérer la biogéochimie des océans.
Des chercheurs du Laboratoire d'océanographie de Villefranche (LOV: CNRS / UPMC) viennent de démontrer que des organismes marins clés tels que les coraux profonds et les ptéropodes (escargots planctoniques) seront profondément affectés par ce phénomène dans les années à venir .
Les premiers résultats des observations et des recherches conduites jusqu'ici indiquent que dans un monde à fort taux de CO_2, l'océan deviendrait globalement plus acide, et serait également plus stratifié dans les hautes latitudes.
En outre les concentrations en nutriments dans les eaux de surface des régions de hautes latitudes seraient inférieures, les eaux de surface seraient moins oxygénées, et le phytoplancton subirait une exposition accrue à la lumière du soleil.
Ces changements affecteraient beaucoup d'espèces et changeraient la composition des communautés biologiques dans une proportion et d'une façon qui ne sont pas encore prévisibles et compréhensibles à ce jour.
Beaucoup d'organismes contenant du carbonate de calcium, dont certaines espèces de plancton et coraux, et également des organismes non carbonatés, ne pourraient plus se développer et se reproduire efficacement si les quantités de CO_2 absorbé étaient supérieures et les niveaux de pH inférieurs.
L'élévation des températures - combinée avec une augmentation du CO_2 et une diminution du pH - constitue ainsi et dans un avenir très proche une menace sérieuse pour l'ensemble des écosystèmes marins.

Diminution des glaces et des couvertures neigeuses

Pour le 21e siècle, les scientifiques du GIEC prévoient une diminution de la couverture neigeuse, et un retrait des banquises. Les glaciers et calottes glaciaires de l'hémisphère nord devraient aussi continuer à reculer, les glaciers situés à moins de 3 400 m d'altitude pouvant être amenés à disparaître.
En revanche, l'évolution de la calotte glaciaire antarctique au cours du 21e siècle est plus difficile à prévoir : les scientifiques pensent qu'elle devrait plutôt augmenter du fait des précipitations plus importantes.

La modification des conditions météorologiques (globales et régionales)

Selon le quatrième rapport du GIEC (2007), la répartition des précipitations s'est modifiée au cours du 20e siècle.
En particulier, les précipitations auraient fortement augmenté dans l'est de l'Amérique du Nord et du Sud, dans le nord de l'Europe et dans le nord et le centre de l'Asie, tandis qu'elles diminuaient au Sahel, en Méditerranée, en Afrique australe et dans une partie de l'Asie du Sud.
De plus, on observe depuis 1988 une diminution notable de la couverture neigeuse printanière aux latitudes moyennes de l'hémisphère nord. Cette diminution est préoccupante, car cette couverture neigeuse contribue à l'humidité des sols et aux ressources en eau.
La superficie de certains grands lacs comme le lac Tchad a considérablement varié ces dernières décennies (de 25 000 km^2 à 2 000 km^2), essentiellement en raison de la variabilité des précipitations. Ces grands lacs, tout en permettant la survie de nombreuses espèces animales, offrent de nombreuses ressources et sont à l'origine d'activités économiques importantes. C'est également le cas pour la vallée du Jourdain et la Mer Morte.
Toujours selon le GIEC, une augmentation des précipitations aux latitudes élevées est très probable tandis que dans les régions subtropicales, on s'attend à une diminution, poursuivant une tendance déjà constatée, même si d'autres experts tempèrent cela, estimant les données trop rares et incomplètes pour pouvoir dégager une tendance actuelle à la hausse ou à la baisse.
Les prévisionnistes des Nations Unies prévoient qu'à l'horizon 2025, la moitié de la population mondiale soit en état de stress hydrique, c.-à-d. 4 milliards d'êtres humains privés d'eau potable[13] .

Conséquence sur la biosphère et l'être humain

Au-delà des conséquences directes, physiques et climatiques, le réchauffement planétaire influera sur les écosystèmes, en particulier en modifiant la biodiversité. Les scientifiques commencent à proposer des projections jugées relativement fiables du devenir de la biodiversité sur la base de 5 facteurs déterminants : la dégradation et la destruction des habitats, le changement climatique, la disponibilité des éléments nutritifs, la su-

12 Source: http://www.insu.cnrs.fr/environnement/ocean-littoral/acidification-des-oceans-impact-sur-des-organismes-cles-de-la-faune-oce

13 Source: [MAHAUT 2009]

rexploitation des ressources biologiques et les espèces invasives.
Dans le monde, toujours d'après le GIEC, la capacité de nombreux écosystèmes à s'adapter naturellement sera probablement dépassée par la combinaison :

- des bouleversements climatiques : inondations, incendies de forêt, sécheresses, insectes, acidification des océans ;
- des changements mondiaux : changements d'affectation des sols (déboisement, barrages, etc.), pollution, surexploitation des ressources.

Le déséquilibre naturel qui s'en suivra pourrait entraîner la disparition de plusieurs espèces animales et végétales.
Au niveau biologique et écologique, un consensus scientifique a été atteint sur les points suivants :

- le bilan global du réchauffement climatique en termes de biodiversité sera négatif selon un certain nombre d'études et selon le consensus du quatrième rapport du GIEC qui envisage la disparition de 40 à 70 % des espèces analysées ;
- certains systèmes naturels seront plus affectés que d'autres par le réchauffement planétaire. Les systèmes les plus sensibles seraient : les glaciers, les récifs coralliens, les mangroves, les forêts boréales et tropicales, les écosystèmes polaires et alpins, les prairies humides. Si le réchauffement continue au rythme actuel, on craint une extinction de masse des récifs coralliens à l'échelle planétaire à partir de 2015 - 2020;
- les dommages causés aux systèmes naturels, que ce soit par leur ampleur géographique ou leur intensité, seront proportionnels à l'intensité et à la rapidité du réchauffement planétaire.

Le GIEC prévoit également des conséquences négatives majeures pour l'humanité au 21e siècle :

- une baisse des rendements agricoles potentiels dans la plupart des zones tropicales et subtropicales ;
- une baisse des rendements agricoles potentiels aux latitudes moyennes et élevées (dans l'hypothèse d'un réchauffement élevé);
- une diminution des ressources en eau dans la plupart des régions sèches tropicales et subtropicales ;
- une diminution du débit des sources d'eau issues de la fonte des glaces et des neiges, suite à la disparition de ces glaces et de ces neiges;
- une augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes comme les pluies torrentielles, les tempêtes et les sécheresses, ainsi qu'une augmentation de l'impact de ces phénomènes sur l'agriculture ;
- une augmentation des feux de forêt durant des étés plus chauds ;
- l'extension des zones infestées par des maladies comme le choléra ou le paludisme;
- des risques d'inondation accrus, à la fois à cause de l'élévation du niveau de la mer et de modifications du climat ;
- une plus forte consommation d'énergie à des fins de climatisation.

3. L'acidification de l'atmosphère (phénomène régional)

À partir des années 70, les dépôts atmosphériques de soufre ont été désignés comme responsables du dépérissement de certaines forêts en Allemagne et en Scandinavie.
Aujourd'hui, quelque 14 000 lacs suédois sont affectés par ce phénomène d'acidification, avec comme conséquence des dommages considérables sur la vie végétale et animale[14].
Le lien avec les émissions liées aux activités industrielles a été rapidement établi. Il est maintenant scientifiquement prouvé que les rejets anthropiques d'oxydes de soufre (SO_2), d'oxydes d'azote (NOx), d'ammoniac (NH_3) et de chlore (HCl) dans l'environnement ont tous un effet acidifiant sur les sols et les eaux naturelles.
Ces substances, transportées dans l'atmosphère sur de longues distances par rapport au lieu d'émission, forment une pollution diffuse et transfrontière. L'acidification atmosphérique est donc un phénomène régional et/ou continental et non un phénomène global comme le réchauffement climatique.
Les sources atmosphériques d'acidification sont l'azote atmosphérique et le soufre atmosphérique.
L'azote d'origine anthropique est émis dans l'atmosphère essentiellement sous forme d'oxyde d'azote (NOx) produit par la combustion d'énergies fossiles, d'ammoniac (NH_3), utilisé dans l'agriculture comme fertilisant ou produit par le bétail d'élevage et de protoxyde d'azote (N_2O) et de monoxyde d'azote (NO) produits par la transformation microbienne de fertilisants azotés.
Les activités humaines, dans le monde, émettent environ 100 millions de tonnes de soufre dans l'atmosphère par an, essentiellement par la combustion de charbon et de fuel et sous forme de dioxyde de soufre (SO_2)

Le passage entre les rejets anthropiques et l'acidification des sols et des eaux se fait par étapes.
La première est une réaction d'oxydation, par contact avec les composants de l'air, qui conduit à la formation d'ions sulfate et d'ions nitrate.
Ces ions retombent sur Terre sous forme de dépôts secs (particules sèches ou gaz) ou de dépôts humides (pluies, neige, grêle, brouillards, nuages...).
De plus en plus de preuves indiquent que les dépôts secs causent autant de problèmes environnementaux que les dépôts humides.
En présence d'eau, les ions sulfate et nitrate, mais aussi les ions chlorure forment de l'acide sulfurique, de l'acide nitrique et de l'acide chlorhydrique. Ces substances sont déposées avec les précipitations sur les sols et dans les eaux. C'est ce qu'on appelle les pluies acides avec comme conséquence majeure des effets nocifs et

14 Source: http://www.airclim.org/acidification

irrémédiables sur la faune et la flore, mais également sur notre patrimoine bâti.
Simultanément à l'acidification qui a alors lieu, des réactions chimiques associent le sulfate, le nitrate et les ions chlorure avec les cations[15] basiques (calcium, magnésium, potassium…). Tant qu'il y a des cations dans le milieu récepteur, ils limitent l'acidification. Mais la quantité de cations dans le milieu est restreinte et leur régénération n'est pas immédiate. Les cations sont en effet apportés dans les sols par des processus qui peuvent être irréguliers ou lents, tels que les apports atmosphériques, la dissolution de la roche mère et le recyclage de la matière organique.
Quand, dans le sol, la vitesse d'apport des quantités de substances acidifiantes devient supérieure à la production de cations basiques, le milieu s'acidifie. Cette acidification modifie d'abord la chimie des sols : la mobilité des différents composants chimiques des sols est transformée. En particulier, les métaux, dont l'aluminium, ont tendance à passer des particules à l'eau du sol.
Il s'ensuit une modification de toute la structure biologique : un des symptômes les plus visibles est le dépérissement des arbres. De façon moins évidente, mais simultanée, l'écosystème terrestre perd une grande partie de sa biodiversité lorsqu'il s'acidifie. Le recyclage de la matière organique y est alors ralenti (ce qui entretient l'acidification) et le sol perd de sa fertilité et de sa résistance à l'érosion.
L'acidification des sols influe également sur l'acidification des eaux de surface. Les sources qui émergent dans des zones où le sol a perdu ses réserves en cations basiques sont acides.
Le symptôme le plus apparent de l'acidification des eaux de surface est la disparition des poissons et de façon plus générale une perte de biodiversité.
En plus de leur effet acidifiant, les substances azotées (nitrate et ammoniac) peuvent avoir un effet eutrophisant : l'azote est un nutriment qui limite habituellement la croissance des plantes, mais sa présence en excès favorise la croissance de plantes communes au détriment de celles, plus rares, qui s'accommodent de conditions moins riches. L'accélération de la croissance des plantes augmente aussi leur besoin en éléments minéraux, tels que les cations basiques. Un effet secondaire de l'eutrophisation peut donc être une plus grande sensibilité à l'acidification.

3.1. Acidité et pH

L'acidité d'un sol ou d'une eau de surface est causée par la présence d'ions hydrogènes ou protons (H+). Ils réagissent avec de nombreuses substances de l'eau et du sol, solubilisant les métaux, dissociant les acides organiques et intervenant dans le fonctionnement biologique de nombreux organismes. Leur présence en grande quantité rend un milieu acide, ce qui est mesuré par un faible pH.
Le potentiel hydrogène (ou pH) mesure l'activité chimique des ions hydrogènes (H+) en solution. Le pH mesure l'acidité ou la basicité d'une solution.
Dans un milieu aqueux à 25 °C, une solution avec un pH :
- inférieur à 7 est acide ;
- égal à 7 est neutre;
- supérieur à 7 est basique.

L'échelle de pH varie entre 0 et 14.

Un milieu aqueux dont l'acidité augmente (et le pH diminue) a tendance à devenir oxydant et, à partir d'un certain seuil d'acidité, de moins en moins propice au développement d'organismes vivants.
Le monde terrestre (les sols, les cours d'eau, les pluies) est un milieu naturellement acide.
Le pH de la pluie dans une atmosphère non polluée est de l'ordre de 5,5 à 5,6.
Dans les zones non polluées, sous les latitudes de l'Europe, les sols et les eaux de surface ont des pH habituellement compris entre 3 et 8. Les tourbières sont naturellement acides et les pH qu'on y mesure pour les sols et les eaux sont naturellement de l'ordre de 3 ou 4. Les sols les plus basiques, avec des pH autour de 8, sont les sols calcaires.

3.2. Phénomène de pluie acide

En dehors de toute pollution, le pH de l'eau de pluie se situe autour de 5,5. Ce pH légèrement acide est provoqué par la présence naturelle de gaz carbonique dans l'atmosphère qui forme de l'acide carbonique lorsqu'il se dissout dans l'eau.
S'il y a pollution atmosphérique, la présence d'acide sulfurique, nitrique et chlorhydrique est susceptible d'engendrer une baisse supplémentaire du pH de l'eau de pluie.
On désigne par « pluie acide » toutes les formes de précipitations qui dégradent voire détruisent des écosystèmes et/ou corrodent certains bâtiments anciens et fragiles.
L'acidité de ces retombées a deux origines principales :
- des sources naturelles ou semi-naturelles ; émissions volcaniques soufrées, gaz issus de certaines formes de décomposition biologique terrestres, ou émis par les océans, feux de forêt…
- des sources anthropiques, dont l'industrie, les centrales thermiques, le chauffage et les transports…

Les pluies acides résultent essentiellement de la pollution de l'air par le dioxyde de soufre (SO_2) ainsi que des oxydes d'azote (NOx) produisant des acides nitriques et sulfuriques. D'autres polluants peuvent contribuer aux pluies acides, notamment l'acide chlorhydrique qui a un pouvoir acidifiant très important. Les chlorures ont

15 Un cation (du grec cata- : « en bas » et iôn : « qui va ») est un ion qui, ayant cédé un ou plusieurs électron(s), porte une ou plusieurs charge(s) électrique(s) positive(s) : à l'inverse de l'anion il contient moins d'électrons que de protons

deux sources principales, à savoir les océans et l'activité humaine. S'ils sont d'origine marine, les ions chlorure n'ont pas de pouvoir acidifiant. S'ils sont d'origine anthropique (incinération de matières plastiques dont le PVC, notamment), ils peuvent former de l'acide chlorhydrique.
Les premiers écosystèmes qui sont touchés par les pluies acides sont les écosystèmes forestiers et plus particulièrement les arbres. L'eau de pluie (neige ou gouttelettes de brouillard) tombe sur les arbres, se charge de la matière qui s'est déposée sur les feuilles par temps sec, notamment les polluants acides (dépôts secs) et s'égoutte ensuite vers le sol. Les échanges ou réactions biochimiques entre les substances apportées par l'eau et celles présentes sur les feuilles peuvent perturber la santé des plantes et des arbres (pertes de feuilles ou d'aiguilles, etc.)

3.3. Répartition géographique

Les pays industriels ont été les premiers touchés ; les principales zones de production de polluants ont d'abord été les bassins miniers et industriels de l'hémisphère nord, dont la Ruhr, la Lombardie, les anciens pays miniers français et anglais et ceux de Chine et des États-Unis. Portés par les vents dominants, les acides circulent dans l'atmosphère avec les masses d'air. Ainsi, une bonne partie des pluies acides de Scandinavie résultent des polluants accumulés par les masses d'air venant de la mer et ayant survolé l'Angleterre, la France et l'Allemagne.
Avec les délocalisations industrielles et l'accroissement de l'utilisation de pétrole et charbon en Asie, les pics sont apparus en Asie du Sud-Est et surtout en Chine où les régions du sud-est sont très touchées par les pluies acides ; les émissions d'oxyde d'azote et de dioxyde de soufre étaient vers 2005/2007 devenues 8 à 9 fois plus élevées en Chine que dans les pays développés. Les pluies acides touchent également le Japon. La Chine est devenue le premier émetteur d'oxyde d'azote et de dioxyde de soufre du monde, ainsi que de CO2, mais en grande partie pour produire des biens consommés dans d'autres pays.

3.4. " Acidification Potential " ou potentiel d'acidification atmosphérique

Pour déterminer une contribution à l'acidification atmosphérique, on détermine une valeur de potentiel d'acidification (AP) en kilo équivalent SO_2. L'équivalent SO_2 vaut 1 pour le dioxyde de soufre qui sert de référence. Le potentiel d'acidification global d'un gaz est le facteur par lequel il faut multiplier sa masse pour obtenir une masse de SO_2 qui produirait un impact équivalent sur l'acidification.

Tableau B3.03 : Potentiel d'acidification des principaux gaz acides

Dénomination	Formule	Potentiel d'acidification kg SO2 equ.
Dioxyde de soufre	SO2	1,00
Monoxyde d'azote	NO	1,07
Dioxyde d'azote	NO2	0,70
Oxydes d'azote	NOx	0,70
Ammoniac gazeux	NH3	1,88
Acide chlorydrique	HCl	0,88
Acide fluorhydrique	HF	1,60

Source: [IBO 2008]

3.5. Conséquences de l'acidification de l'air

Les effets de l'acidification de l'air sur l'environnement ne sont aujourd'hui que partiellement connus.
L'acidification de l'air a des impacts avérés sur l'acidification des grands lacs (Canada, Scandinavie…) et des diverses masses d'eau et océans en général, ce qui a pour conséquence majeure la dégradation des écosystèmes aquatiques et la disparition de certaines espèces de poisson et de la diversité des espèces aquatiques.
Les pluies acides et de manière plus générale l'acidification de l'air ont des conséquences importantes sur les écosystèmes forestiers, mais elles affectent aussi la santé humaine (voies respiratoires essentiellement), les bâtiments et peut-être de nombreuses espèces animales et végétales (dont les champignons et les lichens).

Épuisement des sols

Quand le sol s'acidifie, ses nutriments essentiels sont lessivés, ce qui réduit sa fertilité.
Le processus d'acidification libère également des métaux qui peuvent nuire aux micro-organismes présents dans le sol qui sont responsables de la décomposition, ainsi que les oiseaux et les mammifères supérieurs dans la chaîne alimentaire, y compris l'homme.
Un effet secondaire est également le changement de leurs caractéristiques physiques. Les sols acides sont moins résistants à l'érosion et s'humidifient plus difficilement lorsqu'ils s'assèchent que les sols basiques.
Les problèmes d'érosion des sols sont de plus en plus souvent qualifiés de préoccupants à l'échelle mondiale, mais aussi à l'échelle européenne.

Diminution de la biodiversité

Les pluies acides modifient les équilibres chimiques des milieux récepteurs, en particulier lorsque ceux-ci sont déjà naturellement acides (pas d'effet tampon). Ceci peut se répercuter par des atteintes sur la faune et la flore aquatique, des carences nutritives engendrant des chutes de rendement et des lésions visibles chez les végétaux, ainsi que des jaunissements et la défoliation.
Tout cela conduit à une diminution de la résistance de la flore, et donc à une augmentation de la mortalité lors

d'épidémie, de conditions climatiques difficiles, etc. Les impacts générés sur la flore ont des conséquences directes sur la survie de la faune. Les espèces les plus sensibles sont les poissons, lichens, mousses, champignons et certains petits organismes aquatiques.

Conséquence sur les bâtiments

L'acidité des pluies peut accélérer l'érosion naturelle de nombreux matériaux, notamment les calcaires, ainsi que la corrosion de certains métaux (le plomb qui tient les vitraux).
Les matériaux sont essentiellement affectés par la pollution acide liée au dioxyde de soufre SO_2 qui entraîne une dégradation des édifices, monuments ou façades d'immeubles.
Il s'agit bien souvent de la décomposition de certaines pierres calcaires sous l'effet des acides. La pollution atmosphérique met en danger notre patrimoine culturel et occasionne d'onéreux travaux de ravalement de façades ou de restauration des monuments.
À partir des substances acides qu'il génère (acide sulfurique), le dioxyde de soufre (SO_2) apporte sa contribution aux processus de dégradation des matériaux. L'acide sulfurique formé en présence d'eau réagit avec le calcium contenu dans les particules et donne naissance à des cristaux de gypse ($CaSO_4$, $2H_2O$) qui jouent un rôle important dans la dégradation des monuments tant par leur action mécanique que chimique. En cristallisant à l'intérieur des pores des matériaux, le gypse exerce une pression très importante sur la pierre et la fait éclater. Il cimente les microparticules et contribue à la formation des croûtes noires.

Conséquence sur la santé

Le dioxyde de soufre SO_2 est toxique pour l'homme et se révèle particulièrement irritant pour les muqueuses, la peau et les voies respiratoires.
Le dioxyde d'azote NO_2 est un gaz irritant qui pénètre dans les plus fines ramifications des voies respiratoires. Il peut, dès 200 μg/m3, entraîner une altération de la fonction respiratoire, une hyperréactivité bronchique chez l'asthmatique et un accroissement de la sensibilité des bronches aux infections chez l'enfant.
Le monoxyde d'azote NO est un gaz irritant pour les bronches, il réduit le pouvoir oxygénateur du sang.

3.6. Évolutions législatives

Outre la lutte contre les gaz à effets de serre responsables du changement climatique, la législation environnementale a également pour objectif majeur l'amélioration de la qualité de l'air, dont la pollution est responsable notamment d'affections pour la santé humaine et d'atteintes à l'environnement telles que l'acidification ou l'eutrophisation.
La politique européenne s'attaque aux différents types de polluants et aux sources de polluants. Par ailleurs, la Commission a proposé en 2005 une stratégie thématique afin de réduire de 40 %, d'ici à 2020 par rapport aux chiffres de 2000, le nombre de décès liés à la pollution atmosphérique
On peut notamment citer :

- la directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe. Cette directive a comme objectif de fixer des mesures dans le but de réduire les effets nocifs pour la santé et l'environnement; d'évaluer la qualité de l'air ambiant dans les États membres, sur la base de critères et de méthodes communs; de réunir des informations sur la qualité de l'air ambiant afin notamment de surveiller les tendances à long terme; de faire en sorte que les informations sur la qualité de l'air soient tenues à la disposition du public; de préserver la qualité de l'air ambiant lorsqu'elle est bonne et l'améliorer lorsqu'elle ne l'est pas et de promouvoir la coopération entre les États membres en vue de réduire la pollution atmosphérique.
- la directive 2001/81/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2001 fixant les plafonds d'émission nationaux pour certains polluants atmosphériques. Cette directive couvre les émissions exclusives de quatre polluants qui résultent des activités humaines: le dioxyde de soufre (SO2), les oxydes d'azote (NOx), les composés organiques volatils (COV) et les émissions d'ammoniac (NH3);
- la décision 2003/507/CE du Conseil du 13 juin 2003 portant approbation de l'adhésion de la Communauté européenne au protocole à la Convention de 1979 sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance relatif à la réduction de l'acidification, de l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique.

Ce protocole relatif à la réduction de l'acidification, de l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique cherche à réduire les émissions de soufre, de NOX, de NH_3 et de COV causées par des activités humaines et pouvant nuire à la santé et à l'environnement à cause de l'acidification, de l'eutrophisation ou de la formation d'ozone troposphérique suite à un transport transfrontière à longue distance. Le protocole est entré en vigueur le 17 mai 2005.

4. Eutrophisation des écosystèmes (phénomène local)

L'eutrophisation est un phénomène qui a d'abord été décrit pour les eaux de surface et les eaux côtières.
Ce phénomène local correspond à une augmentation de la prolifération d'algues (suivie de leur dégradation) qui conduit à une désoxygénation partielle ou totale du milieu aquatique.
C'est dans les années 60 avec la subite et rapide dégradation des lacs en aval de zones fortement urbanisée qu'on a pris conscience de ce phénomène.
L'eutrophisation est un phénomène lent et naturel correspondant au vieillissement d'un milieu aquatique.

L'eutrophisation est aussi une des étapes du processus naturel qui transforme lentement les lacs peu profonds en marais, puis en prairie et finalement en forêt.
L'eutrophisation s'observe surtout dans les écosystèmes dont les eaux se renouvellent lentement et en particulier dans les lacs profonds. Les littoraux et les estuaires ne sont pas épargnés, car leurs eaux sont peu brassées et reçoivent beaucoup de rejets issus de l'activité humaine.
C'est l'expression du déséquilibre qui résulte d'un apport excessif de nutriments dont notamment l'azote (contenu dans l'ammonium, les nitrates, et les nitrites) et le phosphore (contenu dans les phosphates). Ce déséquilibre est toutefois accéléré par les rejets anthropiques de nutriments ayant comme origines les épandages agricoles excessivement riches en engrais (azote et phosphore) et les rejets anthropiques riches en nitrates, ammoniac et matières organiques non traitées[16].
L'apport de nutriments accroît la productivité du milieu et perturbe les cycles géochimiques naturels, particulièrement en augmentant la demande en oxygène et en modifiant les flux de nutriments lors de la dégradation de la matière végétale à la fin de son cycle de vie. La modification des cycles de nutriments se traduit par de nouvelles proportions entre les concentrations des différents nutriments dans le milieu. Ceci provoque des changements des structures du plancton et par conséquent des changements des espèces aquatiques. Dans un premier temps, les populations d'espèces aquatiques augmentent (en même temps que l'accroissement du plancton), puis elles diminuent quand les niveaux d'oxygène deviennent insuffisants.

4.1. Processus d'eutrophisation des eaux

L'eutrophisation peut se décomposer en plusieurs étapes:

- les matières organiques biodégradables sont dégradées par les bactéries aérobies présentes dans le milieu aquatique. Ce mécanisme consomme beaucoup d'oxygène, ce qui provoque un premier appauvrissement en oxygène dissous;
- des nutriments phosphorés et azotés sont déversés en grande quantité dans le milieu aquatique. L'excès de nutriments entraîne une multiplication en surface du phytoplancton et de certaines plantes aquatiques qui, en mourant, augmentent encore les quantités de matières organiques biodégradables présentes dans le milieu. Les bactéries aérobies, qui vivent dans les profondeurs où se déposent ces matières organiques, prolifèrent et consomment progressivement tout l'oxygène des eaux profondes qui ne peuvent se réoxygéner en raison du faible brassage des eaux;
- on observe alors une différence de plus en plus marquée entre les eaux proches de la surface, très oxygénées, et les eaux profondes, totalement désoxygénées et non éclairées, car la prolifération des algues en surface empêche toute pénétration de lumière. Dans ces profondeurs, la vie disparaît peu à peu : les espèces animales et les bactéries aérobies meurent asphyxiées. Au bout d'un certain temps, seules les bactéries anaérobies survivent dans ce milieu dépourvu d'oxygène : elles se multiplient et provoquent la fermentation de toute la matière organique accumulée, libérant des gaz nauséabonds (hydrogène sulfuré et ammoniac) et du méthane. On dit que le milieu aquatique vieillit.

4.2. Eutrophisation terrestre

Le concept de l'eutrophisation des eaux a été étendu aux écosystèmes terrestres. Ce phénomène génère à la fois un problème de perte de biodiversité et un problème de fragilisation des écosystèmes vis-à-vis des dépôts acidifiants, des parasites et des intempéries.
L'eutrophisation terrestre est généralement provoquée par des apports excédentaires en azote et par son accumulation dans l'écosystème. Elle a pour effet de modifier la flore existante au profit d'espèces qui poussent préférentiellement dans les milieux riches en azote. Ces espèces deviennent dominantes et occupent donc progressivement l'espace et la lumière disponibles. À terme, on observe donc une disparition d'espèces et une baisse de la biodiversité.
La croissance des arbres s'est accélérée au cours des dernières décennies en partie à cause de cet azote et en partie à cause du changement climatique (augmentation de la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère, de la longueur de la période de croissance annuelle, de la température). Mais cette croissance rapide provoque chez les espèces une plus grande fragilité face aux intempéries.
La composition des tissus des plantes semble avoir été modifiée par la pollution azotée : les concentrations en azote ont augmenté dans les feuilles, qui en deviennent plus attrayantes pour les herbivores et les parasites.
De plus, l'accélération de la croissance des plantes augmente aussi leur besoin en éléments minéraux, tels que les cations basiques. Un effet secondaire de l'eutrophisation peut donc être une plus grande sensibilité à l'acidification.
L'eutrophisation, tout comme l'acidification, est un phénomène lié à la pollution de l'air et du sol par les substances azotées. Ces deux phénomènes de pollution et de dégradation des écosystèmes sont intrinsèquement liés puisqu'ils se traduisent essentiellement par une perte de la biodiversité.

4.3. Conséquences de l'eutrophisation

L'eutrophisation est donc souvent synonyme de pollution dont les inconvénients principaux sont au niveau des milieux aquatiques :
- l'augmentation du volume d'algues ;
- l'augmentation de la biomasse du zooplancton géla-

16 Source: http://www.airclim.org/eutrophication

tineux ;
- la dégradation des qualités organoleptiques de l'eau (aspect, couleur, odeur, saveur) ;
- l'envasement plus rapide et l'apparition de vase putride, sombre et malodorante;
- le développement de phytoplancton toxique ;
- le développement de pathogènes par diminution de la pénétration des UV qui ont un pouvoir désinfectant.

Cet effet semble toutefois réversible, puisque sur les parcelles agricoles où l'apport d'azote (sous forme d'engrais) a été interrompu après 10 ans, un redressement significatif du nombre d'espèces a été observé.
La dégradation des milieux aquatiques a également des impacts sur la survie de certaines espèces animales (oiseaux migrateurs entre autre), mais également sur notre santé :
- dans les eaux douces, certaines bactéries produisent des toxines nocives pour l'homme. Certaines provoquent des gastro-entérites, qui agissent sur le foie en étant cancérogènes. D'autres agissent sur le système nerveux (les neurotoxines) ou provoquent des allergies et des irritations cutanées par simple contact. Consécutivement aux enjeux sur la santé humaine, le développement des telles bactéries peut entraîner la fermeture des plans d'eau pour la baignade, voire l'interdiction des activités nautiques et ainsi avoir des impacts négatifs sur une économie locale;
- dans les eaux littorales, différentes algues toxiques sont consommées par les coquillages qui accumulent de ce fait des toxines nocives pour la santé humaine en cas d'ingestion.

Du fait de la toxicité des coquillages contaminés par ces algues toxiques, il est fréquent que des arrêtés interdisent temporairement la pêche, le ramassage et la vente de coquillages, comme c'est déjà régulièrement le cas en Bretagne.

De plus, la dégradation des milieux aquatiques peut entraîner des perturbations au niveau de la qualité de l'eau distribuée et de la production d'eau potable, telles que :
- une complication du processus de traitement des eaux potables due au contrôle soutenu de l'eau brute à traiter, mais aussi à l'ajustage permanent du dosage des réactifs;
- un risque d'apparition de toxines produites par les cyanobactéries lors du pompage de l'eau;
- une nécessité d'éliminer les éventuelles toxines présentes notamment par traitement des eaux par oxydation (ozonation, chloration) et /ou par l'emploi de charbon actif;
- un risque d'odeur et de mauvais goût dans l'eau distribuée induit par les matières organiques;
- une augmentation de la production des boues.

4.4. Le Potentiel d'eutrophisation ou « Eutrophication Potential » en anglais

Le potentiel d'eutrophisation est calculé en kilo équivalent phosphate [kg $(PO_4)^3$ équivalent].
Comme le potentiel d'acidification, il est important de se rappeler que les effets de potentiel d'eutrophisation diffèrent d'une région à l'autre.

5. Les deux pollutions liées à l'ozone

L'ozone (O_3) a été découvert pour la première fois en 1781 par Martin von Marum, puis la molécule fut isolée en 1839 par le chimiste suisse Christian Friedrich Schönbein. Il le dénomma ainsi en se référant à la racine grecque « ozein » qui signifie exhaler une odeur, sentir.
En 1902, Léon Teissenrec de Bort met en évidence le rôle de la couche d'ozone qui absorbe le rayonnement ultraviolet du soleil. La relation entre l'ozone et les oxydes d'azote a été mise en évidence dans les années 1970 par Paul Josef Crutzen, prix Nobel de chimie 1995.
En 1974, deux scientifiques américains, Mario Molina et F. Sherwood Rowland formulent pour la première fois la théorie de l'appauvrissement de la couche d'ozone

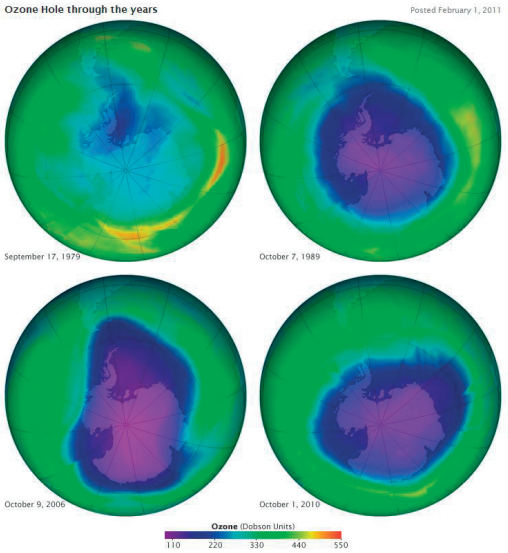


Illustration B3.12 : Trou d'ozone
Source: http://earthobservatory.nasa.gov

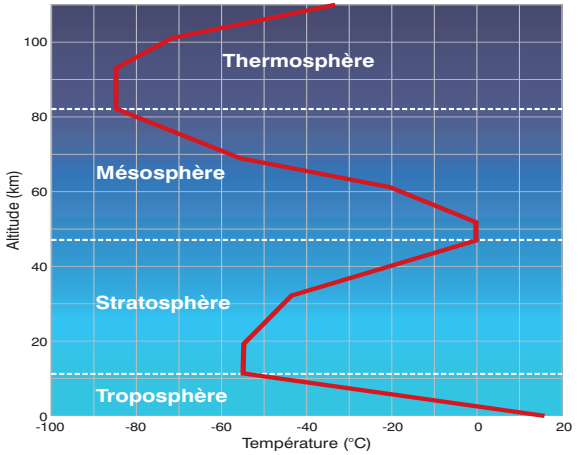


Illustration B3.13 : Les différentes couches de l'atmosphère

sous l'impact des chlorofluorocarbones (CFC).
À la fin des années 1970, des recherches scientifiques en Antarctique ont mis en évidence une diminution périodique, mais importante (jusqu'à 50 %) de l'ozone dans cette région polaire. Ce que l'on a appelé le « trou de la couche d'ozone». Il se forme au printemps dans l'Antarctique (à la fin de la nuit polaire) et s'agrandit pendant plusieurs mois avant de se réduire à l'automne.
Le 15 mars 1988, la NASA[17] diffuse un rapport mené par une centaine de chercheurs dans le monde : la concentration en ozone stratosphérique a diminué en moyenne de 1,7 à 3 % dans l'hémisphère nord entre 1969 et 1986 malgré les variations naturelles constatées de 15 à 20 %. De surcroît, le rayonnement moyen mondial des UV-B au niveau de la surface terrestre s'est élevé de 10 % entre 1986 et 1996.

5.1. Qu'est-ce que l'ozone ?

L'ozone (O_3) est une forme chimique particulière de l'oxygène, très instable et réactive, qui est produite à partir du dioxygène, composé de deux atomes d'oxygène.
Aux altitudes supérieures à 30 km, le rayonnement solaire possède encore une énergie suffisante pour casser une partie des molécules de dioxygène et libérer les atomes.
Un atome d'oxygène tendant à ne pas rester seul pour des raisons de stabilité doit se recombiner à un autre élément ; il interagit donc avec une autre molécule de dioxygène (O_2) présente pour former une nouvelle molécule, composée de trois atomes d'oxygène.

$$O_2 + \text{rayonnement solaire} \rightarrow O + O$$
$$\text{et}$$
$$O + O_2 \rightarrow O_3$$

17 Source: http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov et http://earthobservatory.nasa.gov

Cette réaction chimique est la seule qui, dans la stratosphère, produise de l'ozone.
Contrairement au dioxygène O_2 inodore, l'ozone est perçu par l'odorat humain ; son odeur caractéristique qui rappelle l'eau de Javel est perceptible dans les endroits confinés où règne un champ électrique important. Respiré en grande quantité, il est toxique et engendre irritation de la gorge et toux.
L'ozone est naturellement présent dans l'atmosphère terrestre, formant dans la stratosphère une couche d'ozone entre 13 et 40 km d'altitude (plus fortement vers 35 km) qui intercepte et absorbe la plus grande partie du rayonnement solaire ultraviolet (97 %), qui est dangereux pour les organismes vivants, d'où son appellation « ozone stratosphérique ».
L'ozone est également présent dans les basses couches de l'atmosphère (la troposphère) où il agit en tant que polluant: il agresse le système respiratoire des animaux et d'êtres humains et peut brûler les végétaux les plus sensibles.
La mesure de la quantité d'ozone dans l'atmosphère est réalisée au moyen de l'unité Dobson (DU).
L'unité Dobson (DU) se réfère à une couche d'ozone qui ferait 10 μm d'épaisseur sous température et pression normales. Une unité Dobson est équivalente à $2{,}69 \times 10^{20}$ molécules d'ozone par mètre carré.
Par exemple, 300 DU d'ozone ramené à la surface de la Terre à 0 °C occuperait une couche de seulement 3 mm d'épaisseur.

5.2. Destruction de la couche d'ozone – stratosphère

Équilibre dynamique

Dans la réaction chimique précédente, tout l'oxygène n'est pas transformé en ozone dans le processus de formation de l'ozone.
Il existe donc un facteur limitant sa concentration.
Il y a environ deux milliards d'années, la couche d'ozone est apparue en même temps que l'oxygène atmosphérique. Elle a permis l'apparition de la vie sur Terre.
La concentration en ozone observée aujourd'hui résulte d'un équilibre fragile entre la production d'ozone par le rayonnement solaire et certains processus de destruction: l'ozone est détruit d'une manière naturelle par ce même rayonnement solaire et produit une molécule d'oxygène (O_2) et un atome d'oxygène (O) qui participent à nouveau à la réaction de formation de l'ozone.
C'est ce que l'on appelle un équilibre dynamique.
Le jour, à haute altitude, le rayonnement solaire peut dissocier la molécule d'ozone en une molécule de dioxygène et un atome d'oxygène :

$$O3 + \text{rayonnement} \rightarrow O_2 + O$$

Durant la nuit et en particulier la nuit polaire, cette réaction n'existe pas puisqu'il n'y a plus de rayonnement solaire. Une autre réaction devient alors prépondérante: la recombinaison d'un atome d'oxygène et d'une molécule d'ozone pour donner deux molécules de dioxygène :

$$O3 + O \rightarrow 2\ O_2$$

Mais l'ensemble de ces deux réactions n'est responsable que de 20 % de la destruction naturelle de l'ozone, alors que pour parvenir à un équilibre il faut que la perte soit égale à la production.
Ce problème met en évidence la fragilité de l'équilibre de l'ozone.
L'homme rompt l'équilibre naturel entre la production et la destruction d'ozone stratosphérique. Il favorise la destruction de l'ozone en rejetant certains gaz (composés chlorés, composés bromés et oxydes d'azote). Ceux-ci, sous l'effet des rayons ultraviolets les plus énergétiques (les UV-C), libèrent du chlore ou du brome qui décomposent l'ozone (O_3) et contribuent à la destruction de la couche d'ozone.

Remarque:
Un seul atome de chlore peut détruire jusqu'à 100.000 molé-

cules d'ozone avant de disparaître de la stratosphère. Le brome possède un potentiel d'appauvrissement de l'ozone bien supérieur à celui du chlore.

Des études, menées à l'aide de ballons évoluant à haute altitude et de satellites météorologiques, ont révélé que la proportion d'ozone au-dessus de l'Antarctique est en baisse. Des vols au-dessus de l'Arctique ont mis en évidence des problèmes similaires.

Phénomène de destruction - phénomène global

Chaque année depuis plusieurs décennies, au cours du printemps dans l'hémisphère sud, les réactions chimiques impliquant le brome et le chlore entraînent la destruction rapide et sévère de la couche d'ozone dans la région polaire australe. La diminution de cette couche est appelée le « trou d'ozone ».
Les observations de la quantité totale d'ozone dans l'atmosphère indiquent que, depuis le début des années 80, on assiste à un appauvrissement général de l'ozone dans le monde entier. Les diminutions les plus importantes sont observées dans les régions polaires, en particulier en Antarctique, lors des périodes les plus froides (le froid favorise les réactions de destruction de l'ozone stratosphérique). Ce phénomène porte le nom de trou d'ozone antarctique. Cette diminution varie selon les latitudes et les saisons : elle est due aux activités humaines.
Les scientifiques ont établi que la cause de cette diminution était l'émission des molécules chimiques produites par l'homme : les chlorofluorocarbones (CFC) et les halons. Ces molécules sont composées de carbone, de fluor et de chlore[18].
Inventés dans les années 1930, les chlorofluorocarbures ont connu un développement important à partir des années 1950 à cause de leurs propriétés remarquables (ininflammables, facilement compressibles, non solubles) et, comme ils n'ont qu'une faible réactivité chimique, on les croyait peu toxiques pour l'environnement.
Utilisés principalement dans l'industrie du froid, dans les bombes aérosols comme propulseur, en solvants pour l'industrie électronique, dans les mousses synthétiques et les agents extincteurs, ils sont essentiellement dus à l'activité humaine.
Les halons, contenant du brome, ont été utilisés notamment comme produits extincteurs dans la lutte contre les incendies.
À ces deux catégories de composés sont venues s'ajouter d'autres substances également impliquées dans la dégradation de la couche d'ozone : les solvants chlorés, le bromure de méthyle (pesticide), les HCFC et les HFC, développés par l'industrie pour remplacer les CFC dans la plupart de leurs applications.
Il est à noter que les HCFC et les HFC contiennent de l'hydrogène, ce qui provoque leur dégradation plus rapide dans la haute atmosphère. Ils attaquent également la couche d'ozone, mais moins longtemps que les CFC. Par contre, ils contribuent à accroître l'effet de serre.
Les vents brassant l'atmosphère en permanence, horizontalement et verticalement, ces différentes substances se retrouvent en 2 à 3 ans dans l'atmosphère sous toutes les latitudes, aussi bien à l'équateur qu'aux pôles. Puis, en 15 ans, ils montent dans la haute atmosphère.
En se décomposant sous l'action de la lumière, ces substances libèrent le chlore qui détruit les molécules d'ozone par le jeu de réactions catalytiques.
Les atomes de chlore ayant une durée de vie de l'ordre de 100 ans, ils détruiront plusieurs milliers de molécules d'ozone avant de disparaître. Les CFC présents dans la stratosphère en 1997 sont ceux qui ont été produits entre 1977 et 1982, ce qui ne représente que 40 % de ce qui a été produit jusqu'à ce jour. Les 60 % restants sont encore en train de se mélanger et de monter. Du fait de ce retard, les effets des CFC produits ces dernières années se feront encore sentir dans 60 ans.
Ainsi, la quantité de chlore naturellement présente dans la stratosphère est d'environ 0,6 milliardième, alors qu'aujourd'hui la proportion totale de chlore atteint 3,5 milliardièmes. Elle a été multipliée par 5 en 20 ans, ce qui a entraîné une rupture de l'équilibre dynamique.
Il faut également signaler que des facteurs naturels sont également à l'origine de l'appauvrissement de la concentration en ozone. Il s'agit notamment du cycle des taches solaires (11 ans), des émissions volcaniques d'aérosols de sulfate et des émissions de vapeur d'eau. Cependant, mis à part quelques émissions volcaniques exceptionnelles, les facteurs naturels influent peu sur les changements de la couche d'ozone.

Le danger des rayons ultra-violets

La couche d'ozone stratosphérique est essentielle à la vie sur terre, car elle la protège des rayonnements ultra-violets (UV) nocifs émis par le soleil.
Il existe différents types de rayons UV regroupés en trois grandes classes : les rayons UV-C, les rayons UV-B et les rayons UV-A.
L'impact des UV sur les organismes vivants dépend de la longueur d'onde de ces rayons : plus cette longueur d'onde est courte, plus le danger est grand. Les rayons UV-C sont ainsi les plus dangereux de la gamme. Heureusement, ils sont arrêtés presque en totalité par la couche d'ozone. Or, cette couche protectrice s'est amincie dangereusement, particulièrement à une altitude comprise entre 14 et 20 km.
Comme la concentration en ozone a diminué, le rayonnement moyen mondial des UV-B au niveau de la surface terrestre s'est élevé de 10 % entre 1986 et 1996. Cette augmentation de rayonnement est plus forte lorsqu'on se rapproche des pôles.

18 Source: http://www.atmosphere.mpg.de/enid/2__Ozone/-_chimie_du_chlore_28s.html

• Les risques sanitaires

La surexposition aux rayons ultraviolets peut entraîner des effets nocifs pour la santé :

- à court terme, une augmentation des effets «coup de soleil» c.-à-d. un dessèchement de la peau ainsi que des brûlures superficielles ;
- à long terme, une augmentation des maladies et cancers de la peau ;
- un affaiblissement du système immunitaire;
- une augmentation des affections oculaires : inflammation de la cornée, conjonctivite et problème de cataracte notamment.

• Les risques sur l'environnement

La surexposition aux rayons ultraviolets peut entraîner des effets nocifs pour l'environnement et les écosystèmes, notamment:

- la réduction de la photosynthèse et le ralentissement de croissance des végétaux ;
- la disparition du plancton, premier maillon des chaînes alimentaires aquatiques...
- la diminution de l'immunité face aux maladies infectieuses, ce qui entraîne une diminution de la biodiversité à long terme.

De plus, les UV-B accélèrent la génération du smog photochimique, stimulant ainsi la production de l'ozone troposphérique et diminuant la durée de vie de certains matériaux inorganiques comme les peintures et plastiques.

Potentiel de Destruction de la couche d'Ozone stratosphérique (« Ozone Depletion Potential » en anglais)

Le potentiel de destruction de la couche d'ozone (PDO ou ODP en anglais) d'un composé chimique est la dégradation relative théorique que ce composé inflige à la couche d'ozone, par la destruction de l'ozone en haute atmosphère.

Cette « échelle » a pour objectif de classer la nocivité de l'action de différents gaz - principalement les chlorofluorocarbures (CFC) - sur la couche d'ozone.

La référence de cette échelle est le trichlorofluorométhane (CFC-11), qui a pour potentiel de destruction la valeur 1,0.

Ce potentiel est donc, pour un composé autre que le CFC-11, le rapport de la perte globale d'ozone due à ce composé sur la perte globale d'ozone due à une même masse CFC-11.

La plupart des CFC ont un PDO proche de 1 :

- les composés bromés ont un PDO plus élevé (généralement entre 5 et 15) du fait de la plus grande réactivité du brome avec l'ozone ;
- les hydrofluorocarbures (HCFC) ont un potentiel plus bas (entre 0,005 et 0,2) de par la présence d'hydrogène qui les rend réactifs dans la troposphère.

Le Protocole de Montréal ou l'interdiction européenne de produire et d'utiliser des gaz CFC

Face à ce phénomène global, les pays industrialisés ont adopté un traité international : le Protocole de Montréal du 16 septembre 1987 qui fait suite à la Convention de Vienne de mars 1985.

Ce Protocole, entré en vigueur en 1989, prévoyait de réduire la production de CFC de moitié pour l'an 2000.

Cependant, vu l'urgence engendrée par ce phénomène, l'arrêt total de la production de CFC pour l'an 2000 a été décidé en 1990, suivant deux amendements : Londres puis Copenhague en 1992. Cette décision a ensuite été amendée en 1995 à Vienne, en 1997 à Montréal et en 1999 à Beijing.

Depuis le 16 septembre 2009, le Protocole de Montréal est ratifié par l'ensemble des 196 membres de l'ONU.

Le protocole vise à protéger la couche d'ozone des dommages occasionnés par certaines substances chimiques industrielles connues sous le nom de substances appauvrissant l'ozone (SAO).

Le protocole interdit la production de réfrigérants et de solvants contenant des chlorofluorocarbones (CFC), ainsi que la fabrication d'extincteurs contenant des halons. Il a fixé un calendrier précis aux fins de l'élimination progressive d'autres substances nocives telles que les hydrochlorofluorocarbones (HCFC) et le bromure de méthyle.

5.3. Formation d'ozone photochimique – troposphère

Contrairement aux risques de destruction de la couche d'ozone stratosphérique, la quantité d'ozone contenu dans la troposphère (0-12 km) a augmenté d'un facteur 5 dans l'hémisphère nord depuis la fin du siècle dernier sous l'effet de la pollution anthropique émise principalement par le trafic routier et aérien, les industries, centrales thermiques, etc.

Les conséquences de cette évolution sont importantes pour la santé, la végétation et pour l'effet de serre.

Ce phénomène continental de pollution demeure préoccupant. Chaque année, en période estivale, diverses régions subissent des situations de pointes de pollution photochimique au cours desquelles des seuils jugés nocifs peuvent être atteints, voire dépassés, tant vis-à-vis de la santé de l'homme que des végétaux. Ces pics d'ozone peuvent s'observer de 1 à 2 jours par semaine en été, notamment dans les régions très ensoleillées.

Pollution photochimique

Le diazote (N_2) et le dioxygène (O_2) font partie des substances les plus courantes dans notre atmosphère[19]. Lors des journées ensoleillées, le rayonnement solaire provoque des réactions chimiques dans l'atmosphère impliquant des polluants primaires également appelés « gaz précurseurs » comme les oxydes d'azote (NO et NO_2, regroupés sous le terme NOx) et les composés organiques volatils (COV).

Ces réactions chimiques complexes donnent naissance

19 Voir cycles biogéochimiques : azote, carbone, soufre et phosphore

à des photo-oxydants, dont le plus connu dans nos régions est l'ozone (O_3), molécule formée de trois atomes d'oxygène. Ce phénomène est connu sous le nom de «pic d'ozone » et est assez fréquent en période estivale puisqu'en été, la stabilité de la masse d'air limite la dispersion des polluants.
Étant donné que les émissions d'oxyde d'azote proviennent de la combustion, c'est dans les villes et les zones industrielles que la source de production d'ozone se situe. Mais c'est aussi là qu'il sera le plus facilement détruit.

Explication[20] :
Les deux formes d'oxyde d'azote (NO et NO_2) coexistent avec les deux formes d'oxygène (O_2 et O_3).
Ces composés sont impliqués dans des réactions chimiques imbriquées :
- le polluant NO, émis en grande quantité lors de la combustion, s'oxyde dans l'air et donne naissance au NO_2;
- en présence des rayons solaires, le NO_2 libère un atome d'oxygène. Cela va permettre de former à nouveau du NO et de donner naissance à l'O_3;
- le NO, par contre, aide à détruire l'O_3. En effet, au contact de celui-ci, il se charge d'un atome d'oxygène pour former à nouveau du NO_2 et de l'O_2.

On obtient les réactions suivantes, sous l'action de rayonnements solaires :

$$NO2 \rightarrow NO + O$$

puis

$$O + O2 \rightarrow O3$$

en présence d'autres oxydants, sinon, NO2 se reforme :

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$$

En ville, il y a donc proportionnellement moins de NO_2 qu'à la campagne. En effet, les oxydes d'azote sont fraîchement émis : ils n'ont pas eu le temps de s'oxyder.

20 Source : http://airclimat.wallonie.be/spip/En-quoi-la-pollution-photochimique.html

C'est pourquoi, à la campagne, les réactions chimiques de « production » de l'ozone sont favorisées par rapport à celles de « destruction ».

Rôle des composés organiques volatils

Les composés organiques volatils (COV ou VOC en anglais) sont composés de carbone et d'hydrogène pouvant facilement se trouver sous forme gazeuse dans l'atmosphère. Ils peuvent avoir une origine anthropique comme le raffinage et la combustion des combustibles fossiles, l'évaporation de solvants organiques, etc. Il peuvent également avoir une origine naturelle comme l'émission par certaines plantes ou certaines fermentations.
Les COV sont des précurseurs, avec les oxydes d'azote, de l'ozone troposphérique. Leur caractère volatil leur permet de se propager plus ou moins loin de leur lieu d'émission.
Ils peuvent donc avoir des impacts directs et indirects.
On peut classer les COV en 2 catégories :
- le méthane (CH_4) : ne contient qu'un atome de carbone (C) et est ainsi un des plus persistants;
- les COV non-méthaniques (COVNM) principalement émis par les moteurs à combustion des moyens de transport.

Concrètement, la présence de COV interfère avec l'action de destruction du NO. Le NO est impliqué dans des réactions intermédiaires successives avec les COV pour produire, entre autres, du monoxyde de carbone (CO) et de l'O_3.
Ainsi la présence de COV engendre une augmentation supplémentaire d'ozone dans la troposphère, empêchant le maintien de l'équilibre « naturel » de la composition de l'air.
Il est également à noter que les composés organiques volatils sont également des gaz à effet de serre.
À long terme, les seules actions réellement efficaces pour réduire la pollution photochimique seront de diminuer considérablement les concentrations dans l'air des oxydes d'azote et des composés organiques volatils.

Le danger des excès d'ozone dans la troposphère

L'ozone et les polluants photochimiques sont phytotoxiques, c.-à-d. qu'ils ont des effets nocifs à la fois sur notre santé, mais également sur l'ensemble des écosystèmes.

• les impacts sur la santé

Selon sa concentration dans l'air, l'ozone peut
- irriter les voies respiratoires et les yeux ;
- provoquer des altérations passagères des poumons;
- engendrer des inflammations des voies respiratoires;
- aggraver les symptômes de personnes atteintes de troubles pulmonaires et cardiaques.

On soupçonne également des effets cancérigènes sur les poumons.
Les enfants, les personnes âgées ainsi que les personnes déjà sujettes à des affections respiratoires (asthme notamment) sont plus susceptibles d'avoir des problèmes de santé dus à l'ozone.
En Europe, on considère actuellement que l'ozone est l'un des polluants atmosphériques les plus préoccupants. C'est ainsi que plusieurs études européennes ont signalé un accroissement de la mortalité quotidienne de 0,3 % et des maladies cardiaques de 0,4 % pour chaque augmentation de 10 μg/m3 de la concentration en ozone.
Les valeurs recommandées par l'Organisation mondiale pour la Santé (OMS)[21] pour l'ozone O_3 sont de 100 μg/m3 moyenne sur 8 heures. La concentration limite recommandée précédemment (120 mg/m^3 - moyenne sur 8 heures) a été ramenée à 100 mg/m^3 sur la base des liens établis récemment entre la mortalité quotidienne et des concentrations en ozone inférieures à 120 μg/m^3.

• les impacts sur l'environnement et les écosystèmes

21 Source: [OMS 2005 a et b]

L'ozone diminue l'activité de photosynthèse chez les plantes limitant ainsi leur croissance. Ce qui engendre des pertes de rendement des cultures agricoles et forestières, plus ou moins importantes selon les espèces. L'ozone contribue aussi, avec les dépôts acides et d'autres facteurs défavorables, aux troubles forestiers observés en Europe et en Amérique du Nord.
La concentration d'ozone troposphérique peut contribuer à des modifications climatiques du fait que celui-ci est un gaz à effet de serre.
En outre, un pic d'ozone peut renforcer les effets nocifs d'autres polluants présents dans l'atmosphère
En Wallonie, les sources principales de COV[22] sont le transport routier (45 % de ces émissions en 2003), l'utilisation de solvants (30 %) et l'industrie (14 %).
Il faut également tenir compte des émissions naturelles de COV provenant essentiellement des forêts (1/3 des émissions totales de COV en Région wallonne en 2003).
Entre 1990 et 2003, des diminutions d'émissions de NOx se sont produites dans les secteurs du transport, de l'industrie et de la production d'énergie. En ce qui concerne les émissions de COV, les réductions ont été effectuées dans les transports et l'usage des solvants.

Potentiel de formation d'ozone photochimique ou « PhotoChemical Ozone Creation Potential » en anglais

Le potentiel de création d'ozone photochimique (PCOP) d'un composé chimique est la formation additionnelle théorique d'ozone dans la troposphère par rapport à la situation de base.
Cette « échelle » a pour objectif de classer l'impact de ces différents gaz précurseurs - principalement les oxydes d'azote, le carbone et les COV - sur la formation d'ozone dans les basses couches de l'atmosphère.

22 Source : http://airclimat.wallonie.be/spip/En-quoi-la-pollution-photochimique.html

Tableau B3.04: Potentiel de création d'ozone photochimique de certains gaz

Substance	Formule	POCP *moyen*	POCP *AOT40*	POCP *AOT60*	POCP *AOT90*	POCP *peak*
Monoxyde de carbone	CO	2,0	1,9	2,3	2,2	1,8
Éthane	C2H6	2,1	3,3	4,8	5,9	3,1
Autres alcanes	NC4H10	10	15	19	22	14
Éthylène	C2H4	100	100	100	100	100
Autres alcènes	C3H6	67	75	82	91	76
Isoprène	C5H8	23	33	39	30	29
Composés aromatiques HC, phénol		44	53	59	68	54
COV totaux		41	43	40	45	43
Oxydes d'azote		95	59	66	27	50

Source : Rapport « Détermination des potentiels de formation d'ozone (PCOP) pour les différentes espèces gazeuses à l'échelle de l'Europe de l'Ouest »publié par RECORD, disponible sur http://www.record-net.org/
L' AOT 40 est l'expression d'un seuil de concentration d'ozone dans l'air ambiant, AOT 40 (exprimé en micro g/m³ par heure) signifie la somme des différences entre les concentrations horaires supérieures à 40 parties par milliard (40 ppb soit 80 micro g/m³), durant une période donnée en utilisant uniquement les valeurs sur 1 heure.

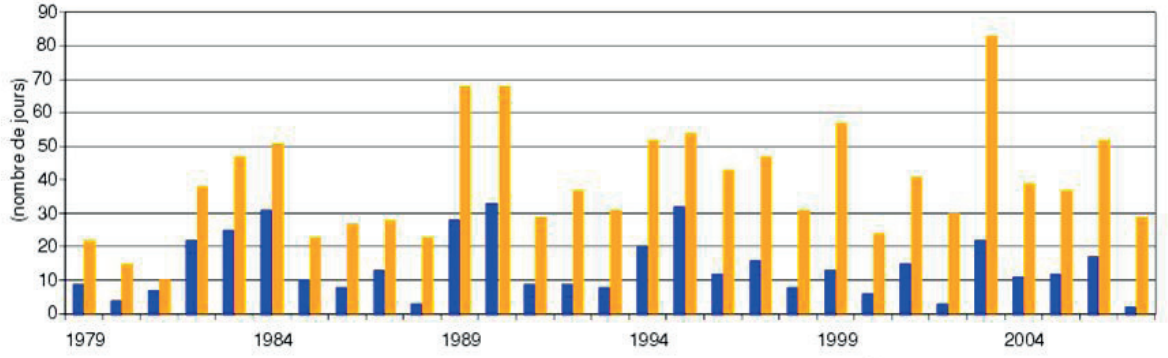


Illustration B3.14 : Nombres de jours respectifs au cours desquels la concentration d'ozone troposphérique dépasse les seuils d'information et d'effet sur la santé en Belgique, 1979-2007 – source : www.plan.be/ IRCEL-CELINE 2008.

La référence de cette échelle est l'éthylène (C_2H_4) qui a pour potentiel de formation une valeur de 1,0.
Le potentiel de création d'ozone photochimique (PCOP) est calculé en kilo éthylène-équivalent (C_2H_4-éq.), c.-à-d. le rapport de la formation d'ozone due à ce composé sur la formation globale d'ozone due au composé de référence :

PCOPx
=
Formation d'ozone avec le polluant X
x
(100 x Formation d'ozone avec l'éthylène)

Les calculs d'évaluation du Potentiel d'Ozone photochimique intègrent notamment les substances suivantes: les oxydes d'azote NOx, les composés organiques volatils COV et le monoxyde de carbone CO.

La concentration en ozone est également un indicateur de la qualité de l'air.
La concentration d'ozone troposphérique est mesurée par deux indicateurs: le nombre de jours au cours desquels la concentration d'ozone dépasse le seuil d'information et le nombre de jours au cours desquels la concentration d'ozone dépasse le seuil d'effet sur la santé.
L'indicateur « nombre de jours au cours desquels la concentration d'ozone dépasse le seuil d'effet sur la santé » est défini dans la directive 2002/3/EC comme le nombre de jours au cours desquels la concentration d'ozone troposphérique dépasse 120 $\mu g/m^3$ pendant 8 heures, à au moins une station de mesure.
Ce seuil d'effet sur la santé est un objectif à long terme de protection de la santé humaine.
L'indicateur nombre de jours au cours desquels la concentration d'ozone dépasse le seuil d'information est défini comme le nombre de jours au cours desquels la concentration d'ozone dépasse 180 $\mu g/m^3$ pendant une heure, à au moins une station de mesure. C'est le seuil d'information de la population défini dans la directive 2002/3/CE, au-delà duquel les personnes à risque doivent prendre des précautions (telles qu'éviter des efforts physiques à l'extérieur). La directive définit également un seuil d'alerte de 240 $\mu g/m^3$ pendant huit heures, à au moins une station de mesure, au-delà duquel l'ensemble de la population doit prendre des précautions. Le dépassement de ces seuils oblige les pouvoirs publics à fournir un certain nombre d'informations au public, telles que la région concernée, la durée prévue, le type de seuil dépassé, la concentration observée, etc.

Les matériaux et leur transport, quels impacts ?

Bien que l'activité de transport soit une demande périphérique liée aux autres activités économiques à savoir la production et la distribution de produits, elle fait partie intégrante du cycle de vie des matériaux de construction. Ce cycle peut d'ailleurs être divisé, au niveau du transport, en plusieurs phases. Chaque phase est caractérisée par l'utilisation d'un ou plusieurs moyens de transport utilisés et par un nombre de kilomètres parcourus, comme le montre l'illustration B4.01 ci-dessous. Lorsqu'on parle de choix écologique de matériaux de construction, nombreux sont ceux qui avancent l'argument de la distance - choisir des matériaux locaux plutôt que lointains - comme relativement significatif dans les bilans énergétiques et environnementaux d'un matériau de construction.

Dans ce chapitre, nous avons voulu nous assurer de la justesse de ce propos. Si choisir des matériaux locaux permet de répondre correctement à un climat local et de promouvoir une économie locale, ce choix s'avère-t-il réellement intéressant en termes de bilans énergétique et environnemental. Permet-il véritablement de réduire la consommation énergétique ? Permet-il de diminuer

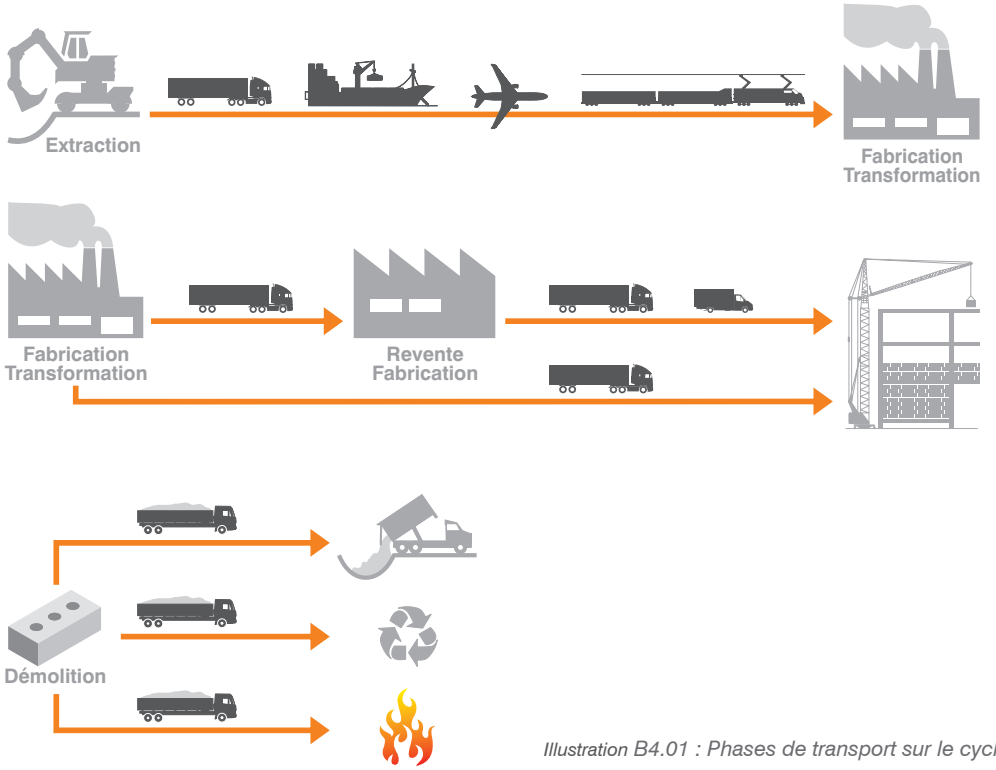


Illustration B4.01 : Phases de transport sur le cycle de vie d'un matériau

sensiblement le poids environnemental d'un produit de construction?
Pour répondre à cette question, nous avons jugé essentiel d'analyser l'évolution du commerce ainsi que l'évolution du transport de marchandises depuis le 19e siècle et les conséquences de ces modifications dans la répartition modale du transport. Cette analyse a été menée de manière générale en étudiant les différents flux de transport à la fois en Europe et en Belgique.
Nous avons ensuite mis en évidence l'impact environnemental des moyens de transport et sur cette base, établi différents scénarii de transport en fonction de l'origine du matériau, du nombre de kilomètres parcourus et du ou des modes de transport utilisés.
Avec l'aide de quelques producteurs et/ou fédérations de fabricants de matériaux de construction, sur base d'un questionnaire, nous présenterons les différentes phases de transport sur le cycle de vie d'un matériau et calculerons leur impact. Enfin, quelques pistes de réflexion sont proposées afin de réduire l'impact énergétique et environnemental du transport de fret qui reste aujourd'hui un secteur très énergivore et polluant.

1. Histoire du commerce et évolution du transport de marchandises

Remarque préalable :
Ce sous-chapitre a été principalement rédigé sur base des études suivantes :
- STRALE, L'évolution récente du transport de marchandises en Belgique, EchoGéo(en ligne), numéro 15/2011, mis en ligne le 11 avril 2011. URL : http://echogeo.revues.org/12311
- DEBAUCHE, Les enjeux du transport de marchandises dans un contexte de mobilité durable, rapport d'étude réalisé pour le XXIème Congrès belge de la Route, ABR/AWW, Gand, 22-25 septembre 2009, thème « Mobilité durable » téléchargeable sur http://www.brrc.be/pdf/gent/VI.A.21.pdf
- HERTVELDT, HOORNAERT et MAYERES : Perspective à long terme de l'évolution des transports en Belgique : projection de référence, publié par le bureau fédéral du Plan, février 2009, téléchargeable sur http://www.plan.be/transport.

1.1. Le développement du commerce : de la sédentarisation à la révolution industrielle[1]

Les premiers échanges commerciaux se sont opérés dans le cadre d'une économie de troc, c'est-à-dire un système dans lequel on échange directement une marchandise contre une autre marchandise.
L'origine du troc remonte à la sédentarisation, période au cours de laquelle l'homme passe du stade de chasseur-cueilleur à celui de producteur sédentaire. L'invention de l'agriculture et de l'élevage assure alors aux hommes une sécurité alimentaire et leur permet d'échanger leurs surplus. Des marchés prennent donc place dans les premiers villages et les hommes y troquent des objets non périssables (perles, outillage de pierre), mais également des céréales, des animaux, des poissons et des coquillages.
Ensuite, durant l'âge du Bronze, avec l'augmentation des villes et l'accroissement des échanges, apparaissent des systèmes économiques liés à des denrées, des objets et des métaux. Rapidement, pour simplifier les échanges, un étalon monétaire s'impose dans chaque société : coquillages, haches de bronze, bijoux, minéraux précieux ou utiles (sel), petits lingots de métal, etc. On sait alors que telle marchandise équivaut à telle quantité du référentiel.
Parallèlement, des circuits d'échange sur de longues distances s'établissent dans l'espace méditerranéen. Ces longues distances sont parcourues essentiellement à l'aide de bateaux. À ce titre, les Phéniciens représentent certainement les plus grands commerçants et marins du monde antique. Pendant le premier millénaire avant J.-C., leurs flottes parcourent toute la Méditerranée. Les Phéniciens organisent des routes commerciales dans toute la Méditerranée et créent de nombreux comptoirs, notamment à Marseille, à Cadix et à Carthage, ainsi que dans les îles de Rhodes et de Chypre. Ils ouvrent ainsi la voie au grand commerce intercontinental.
Il faut attendre l'an 687 avant J.-C. pour voir apparaître la première véritable pièce de monnaie métallique dans une province grecque en Asie Mineure. Il s'agit du statère. Très rapidement, les Grecs vont étendre l'utilisation du statère au bassin de la Méditerranée et à l'Orient.
Le monnayage, s'il représente un moyen de propagande et de diffusion de l'autorité politique, constitue également un moyen de faciliter les échanges et d'assurer le développement du commerce. La monnaie permet, en effet, de mesurer et de comparer la valeur d'objets très différents.
Un autre facteur qui va permettre le développement du commerce est l'utilisation de grandes voies commerciales dont notamment la route de la Soie. Établie aux environs de l'an 100 av. J.-C., elle relie, sur une distance de 6000 km, la Chine au Moyen-Orient et à l'Europe occidentale.
On entre ensuite dans le haut Moyen-Age qui apparaît souvent comme une période troublée de l'histoire et une période de régression en termes d'architecture et d'économie. Mais à partir de l'an mille, l'économie occidentale se développe à nouveau et de manière considérable. Les villes grandissent rapidement et la population augmente très vite.
De nombreuses inventions permettent d'augmenter la productivité agricole : l'amélioration de l'outillage et l'augmentation des surfaces cultivées.
Ce gain de productivité associé à de nombreux progrès dans les transports et à de nouvelles techniques engendre une nette augmentation des échanges et le développement de groupes de commerçants ainsi que l'apparition des prêteurs, ancêtres des banquiers.
Après la Guerre de Cent Ans, qui opposa entre 1337 et 1453 l'Angleterre et la France, avec la période de la Re-

1 Source: www.eduki.ch/fr/doc/Dossier_10_histo.pdf

naissance, l'Europe vit une période d'épanouissement culturel, artistique, technique et économique.
Au 15e siècle, les Portugais entreprennent la reconnaissance systématique des côtes occidentales de l'Afrique dans le but d'établir des comptoirs commerciaux et d'atteindre les Indes. Cette volonté économique et politique est accompagnée de progrès techniques favorisant la navigation : des tables de déclinaison, des cartes marines plus précises et un nouveau bateau, la caravelle qui permet de s'aventurer au large.
Dès le début du siècle, l'une des ambitions est d'atteindre les Indes par l'Ouest. La raison en est simple: depuis le 11e siècle, les musulmans contrôlent les principales routes de commerce entre l'Orient et l'Occident et prélèvent de lourdes taxes sur les épices et les soieries. Les Européens sont donc à la recherche de nouvelles voies de communication leur permettant d'entrer en contact direct avec les Indes et la Chine.
Le 3 août 1492, le navigateur Christophe Colomb se lance dans l'aventure. À la tête de trois navires, il aborde le 12 octobre 1492 ce qu'il croit être l'Inde : il s'agit en fait d'une île des Bahamas qu'il baptisera San Salvadore.
La « découverte » du Nouveau Monde par Christophe Colomb ouvre une période qui durera plus de quatre siècles : la colonisation.
L'occupation espagnole de l'Amérique commence dès octobre 1492. Rapidement, les «conquistadores» espagnols s'emparent d'immenses territoires en Amérique latine dont notamment Cuba en 1511, l'immense Empire aztèque en 1521 et le Pérou en 1532. De son côté, le royaume du Portugal installe des comptoirs au Brésil de façon permanente en 1532.
Si, dans un premier temps, la colonisation a surtout été axée sur les métaux précieux, elle se tourne à partir de 1570, vers la culture intensive des produits tropicaux, dont le café. Le Portugal, qui manque de main-d'œuvre agricole pour l'exploitation intensive de ces produits dans les nouveaux territoires, est le premier pays européen à satisfaire ses besoins en main-d'œuvre en faisant venir des esclaves d'Afrique : c'est le début de la traite des Noirs.
Celle-ci donne naissance à un circuit commercial que l'on appelle le commerce triangulaire : entre 1550 et 1850, les navires négriers partent d'Europe pour l'Afrique occidentale chargés de marchandises qu'ils échangent contre des esclaves. Ces esclaves sont ensuite transportés en Amérique pour être vendus aux colons. Avec le produit de la vente, les négriers achètent sur place des produits tropicaux qu'ils revendent en Europe.
Avec la découverte du Nouveau Monde et celle de voies maritimes menant au continent asiatique, de véritables Empires coloniaux européens se mettent sur pied. Pour caractériser ce phénomène, on parle souvent de «partage du monde». Les Espagnols s'assurent ainsi la domination de toute l'Amérique du Sud, de presque toute l'Amérique centrale, de la majorité des Antilles, ainsi que de certaines parties de l'Amérique du Nord. Plus tard, l'Angleterre va dominer la majorité de l'Inde qui lui confère un pouvoir économique de très grande importance, puis l'Australie.
Une nouvelle géométrie des échanges se met donc en place à partir du 16e siècle : le concept d'économie mondiale s'établit progressivement. En effet, l'espace économique passe d'une échelle essentiellement tournée vers l'étranger proche à une échelle mondiale. D'abord par l'implantation de comptoirs économiques européens sur l'ensemble de la planète entre le 16e et le 18e siècle et ensuite par les différentes phases de la colonisation territoriale en Amérique (16e et 17e siècles), en Afrique et en Asie du Sud et du Sud-Est (19e siècle).
L'Europe occidentale est le centre du système. Les Européens transforment profondément l'économie des territoires colonisés. Ils cherchent avant tout à s'assurer un approvisionnement en matières premières nécessaires à leurs industries et à développer les cultures d'exportation comme les épices ou le café.
Depuis la découverte du Nouveau Monde par Christophe Colomb en 1492, l'ensemble des circuits commerciaux est parcouru à l'aide de navires. Les voies d'eau, qu'elles soient fluviales ou maritimes sont en plein épanouissement.
Parallèlement à l'élargissement de l'espace économique des nations européennes, la conception du commerce se modifie : il est dorénavant conçu comme un moyen d'enrichissement, sa finalité consistant à attirer les richesses du dehors afin de les conserver au-dedans, c'est le mercantilisme[2].

1.2. Le développement du transport avec et après la Révolution industrielle

À partir des années 1770-80, une nouvelle transition économique se profile en Grande-Bretagne : il s'agit de la première Révolution industrielle, c'est-à-dire le passage d'une économie artisanale et agricole vers une économie mécanisée et industrielle.
Elle se propage dans l'Europe de l'Ouest à partir de 1820/1830 : d'abord en France, puis en Allemagne et aux États unis, avant d'atteindre la Russie et le Japon à la fin du 19e siècle. La Révolution industrielle représente un tournant majeur de l'histoire économique mondiale. Les historiens mettent en avant plusieurs éléments explicatifs de cette transition, mais insistent sur l'importance d'une invention : la machine à vapeur. Parallèlement, au début des années 1800, de nouveaux procédés métallurgiques permettent d'améliorer les alliages et de produire de l'acier.
Ce dernier est d'abord utilisé dans l'architecture et la construction civile avant d'être utilisé pour la construc-

2 Mercantilisme: Le mercantilisme est une doctrine économique des XVIe, XVIIe et première moitié du XVIIIe siècle qui prône le développement économique par l'enrichissement de l'Etat au moyen du commerce extérieur - source: http://fr.wikipedia.org

tion de voies ferrées et de donner naissance au chemin de fer.
L'acier devient ensuite un produit couramment utilisé pour la construction de navires, de rails, de charpentes, d'édifices et de machines à vapeur.
En Europe et en Amérique du Nord, la période de plus grand développement du chemin de fer va de 1848 à 1914. Ce développement a permis l'acheminement de marchandises depuis et/ou vers des contrées de plus en plus lointaines et ainsi le développement du commerce international.
Après la Première Guerre mondiale, le chemin de fer continue à se développer, notamment sur les lignes secondaires à voie étroite, mais il est fortement concurrencé, sur les courtes distances, par l'automobile et le camion.
Après la Seconde Guerre mondiale arrive la concurrence de l'avion sur les longues distances. Avec l'essor du transport automobile (camions, camionnettes, automobiles), les lignes ferroviaires secondaires quant à elles disparaissent petit à petit dans de nombreux pays européens.
Cependant, ce n'est qu'avec la crise pétrolière de 1973 que le transport de fret et la logistique y afférant ont subi de profonds changements. Ces changements sont également liés à une réorganisation des structures de production que l'on connaît depuis plusieurs décennies:

- Évolution de la nature des produits transportés

Depuis plusieurs décennies, on est passé d'une économie industrielle à une économie tertiaire : l'industrie lourde (charbon, acier…) pour laquelle le chemin de fer et les voies navigables étaient des transports adéquats a fait place à une économie tournée vers les services et les produits à plus haute valeur ajoutée.

- Modification structurelle de production

Avec le passage d'une production de masse, planifiée à long terme, avec des stocks importants de marchandises à une production plus dynamique, s'adaptant à

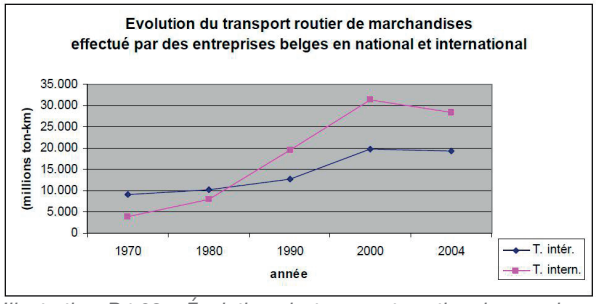


Illustration B4.02 : Évolution du transport routier de marchandises - Source: [DEBAUCHE 2009]

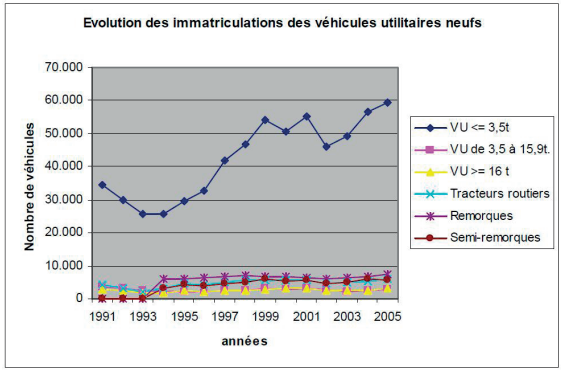


Illustration B4.03 : Évolution des immatriculations Source: [DEBAUCHE 2009]

une demande fluctuante, avec des stocks réduits au minimum, on assiste à un fractionnement du transport de marchandises : les entreprises se font livrer au fur et à mesure en fonction de leurs besoins, de petites quantités, mais plus fréquemment. Les stocks sont devenus « roulants » et le transport assure une livraison « just on time ».

- Éclatement et dispersion des structures de production et de distribution

Les entreprises délocalisent leurs sites de production

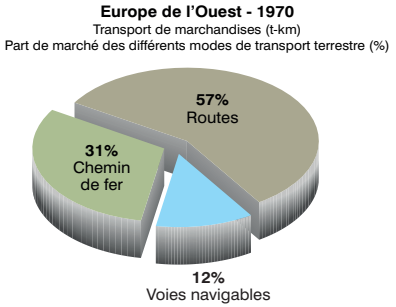


Illustration B4.04 : Part de marché des différents modes de transport - 1970 :

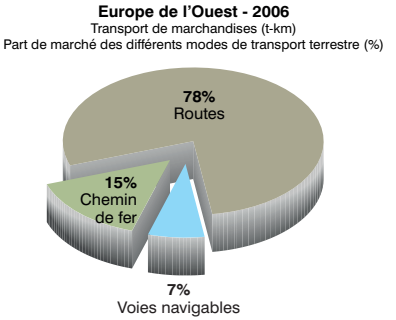


Illustration B4.05 : Part de marché des différents modes de transport - 2006

vers des régions ou des pays où les coûts – en particulier les coûts de main-d'œuvre – sont moins importants, donnant ainsi lieu à un élargissement des zones d'approvisionnement en matières premières et des zones de distribution. Ces délocalisations ont été rendues possibles ou réalisables grâce au coût relativement peu élevé du transport par route, qui de surcroît, par sa flexibilité, répond parfaitement à cet éclatement des réseaux sur le territoire.

- L'ouverture des frontières

L'ouverture des frontières, notamment sous l'effet des accords internationaux après la Seconde Guerre mondiale et de la création de l'Europe, a facilité les échanges tant d'un point de vue administratif que technique ou logistique.
En plus de ces changements liés aux structures actuelles de production, le transport de fret a dû répondre aux besoins de plus en plus stricts des utilisateurs : prix compétitif, fiabilité, flexibilité et sécurité.
Jusqu'à aujourd'hui, seul le transport par route a pu répondre à celles-ci, ce qui a contribué également à l'insuccès du chemin de fer et des voies navigables.
L'ensemble de ces changements et des exigences ont eu des conséquences importantes sur le transport en général : l'internationalisation du transport et l'allongement des distances ainsi que l'évolution des moyens de transport avec une prédominance du transport routier.
Suivant le graphe B4.02 ci-avant, on voit apparaître progressivement l'internationalisation des échanges.
Au milieu des années 80, le transport international devient dominant. Ceci a pour conséquence l'allongement des distances. Selon les statistiques du SPF Mobilité[3], en 1970, une tonne de marchandises parcourait en moyenne 42 km tandis qu'en 2004, elle parcourt 138 km en moyenne soit 3 fois plus.
Au cours des dernières décennies, la demande de transport a considérablement augmenté, et ce tant pour la mobilité des personnes que des marchandises. Selon les prévisions de l'OCDE[4], la croissance du transport devrait se poursuivre de façon importante en Europe dans les années à venir et principalement celle du transport de marchandises.

3 SPF Mobilité : Service public fédéral Mobilité et Transport - www.mobilit.fgov.be/fr/index.htm
4 OCDE : Organisation de coopération et de développement économiques

Dans ce contexte de demande en hausse constante, le transport routier demeure le mode dominant, tant au niveau européen que belge.
Le transport routier domine en Europe avec 44 % du fret total déplacé en 2005[5].
Le transport maritime est également en plein essor et représentait, en 2005, 39 % du fret total déplacé.
Le transport par rail augmente dans la plupart des pays de l'UE 25. Le transport intérieur fluvial de marchandises reste relativement marginal en Europe (5,6 % du fret total déplacé en 2008[6]).
En Belgique, le transport de marchandises a connu une hausse rapide de 1980 à 2000 suivie d'une stagnation. Cette augmentation a été principalement absorbée par le transport routier (74 % du fret total déplacé en 2008[7]).
Le rail et la voie d'eau ont connu un déclin relatif (d'environ 25 % du fret total déplacé en 1970 à 12 % en 2008[8]).
Cependant, il semble que ces deux modes de transport connaissent un regain d'intérêt pour les liaisons entre les ports maritimes et les terminaux intérieurs pour le transport de marchandises lourdes ou volumineuses.
Au niveau du parc, on remarque une utilisation accrue de petits véhicules (inférieurs à 3,5 tonnes).
Cette augmentation est essentiellement due à plusieurs facteurs dont notamment l'influence de l'économie en « stocks roulants » dans laquelle les entreprises se font livrer de petites quantités, l'influence des réglementations locales concernant la circulation et le stationnement de gros véhicules de marchandises et l'influence

5 Source : « Transports et environnement : comparaisons européennes », Ifen, 2009
6 Source : « L'évolution récente du transport de marchandises en Belgique», M.Strale, 2010
7 Source : « L'évolution récente du transport de marchandises en Belgique», M.Strale, 2010
8 Source : « L'évolution récente du transport de marchandises en Belgique», M.Strale, 2010

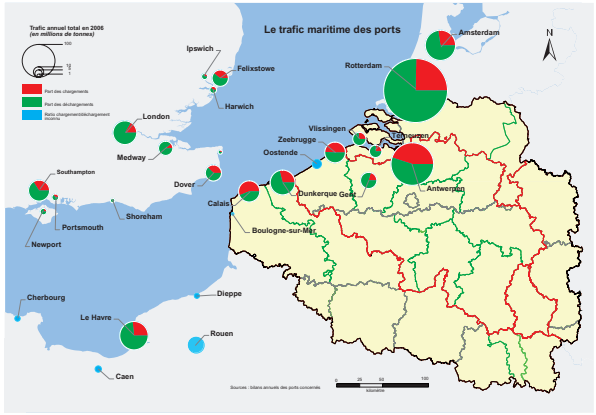


Illustration B4.06 : Le trafic maritime en Mer du Nord

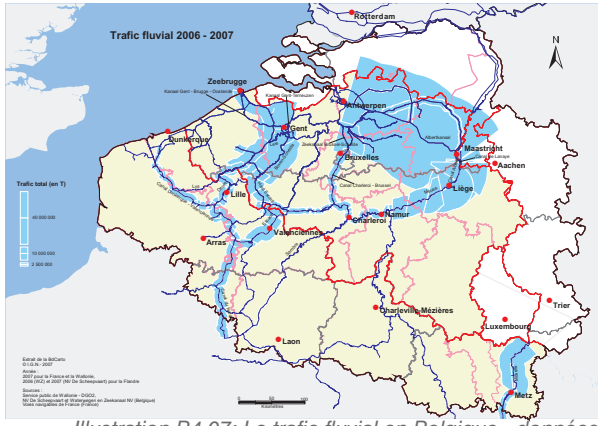


Illustration B4.07: Le trafic fluvial en Belgique - données 2006/2007

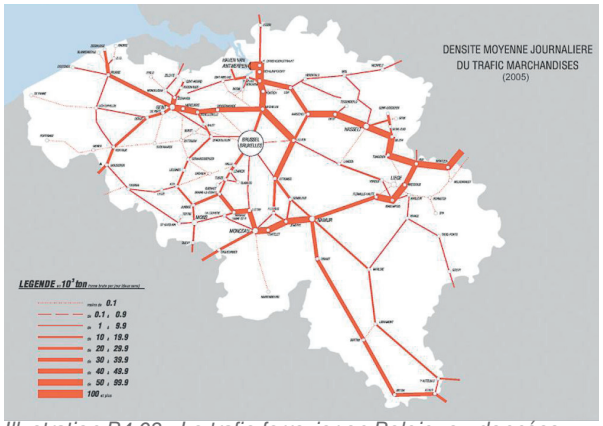


Illustration B4.08 : Le trafic ferrovier en Belgique - données 2005 - Source: bCargo

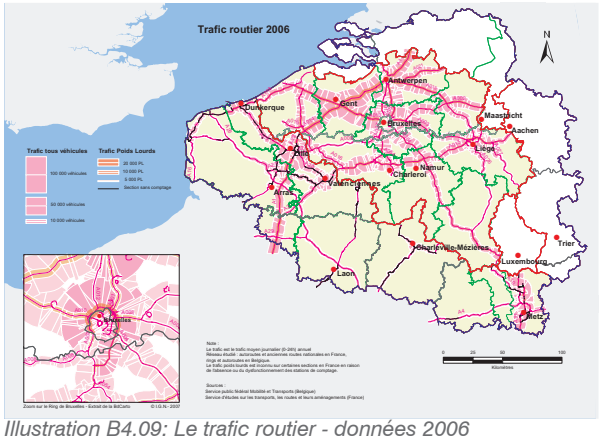


Illustration B4.09: Le trafic routier - données 2006

des réglementations sociales .
Parallèlement à l'utilisation accrue de petits véhicules de transport, les gros-porteurs et les semi-remorques connaissent également une progression grâce notamment à l'augmentation des flux internationaux à longues distances.

2. Géographie des flux de transport en Belgique

Les quatre cartes[9] ci-avant présentent la géographie des flux de marchandises au travers des modes de transport par route, par rail et par voie navigable.
On remarque rapidement combien la Belgique est une plaque tournante d'échanges de marchandises qui s'inscrit dans l'axe urbain et économique allant de l'Angleterre vers la France et l'Allemagne et cela depuis de nombreux siècles.
Historiquement, la Belgique doit ce statut à sa situation centrale au niveau de l'Europe et en bordure de la Mer du Nord ainsi qu'à ses villes portuaires d'Anvers et de Bruges. Dès le Moyen-Age, son faible relief et les nombreux cours d'eau présents sur le territoire permettent à la Belgique de devenir un des carrefours d'échanges européens.
Les différents réseaux et infrastructures de transports, particulièrement denses, vont dès cette période se développer. L'ensemble du territoire a été doté de voies d'eau reliant les bassins fluviaux entre eux et aux grandes villes (Bruxelles, Anvers, Bruges…) dès le 16e siècle. Ces voies d'eau sont mises en place pour l'approvisionnement des villes et pour le transport de marchandises liées aux industries naissantes, dont celle du textile.
Le chemin de fer s'est fortement développé dès la seconde moitié du 19e siècle, nécessité par les nouveaux acteurs industriels dont notamment les charbonnages et la métallurgie.
La Flandre va ainsi bénéficier d'un réseau important de voies navigables. La Wallonie, quant à elle, va bénéficier d'un axe navigable «Sambre/Meuse» et d'un réseau ferroviaire dense.
Le port d'Anvers devient la porte d'entrée de l'économie belge et un pôle industriel important.
Cette situation perdure jusqu'à la Seconde Guerre mondiale.
L'après-guerre voit apparaître le développement de l'automobile et du camion. Ce développement va avoir comme conséquence la création d'un réseau routier dense couvrant l'ensemble du pays et la délocalisation des entreprises qui vont préférer s'établir dans des sites périphériques le long des autoroutes en délaissant les sites proches des réseaux ferroviaires ou fluviaux
Les réseaux ferroviaires et fluviaux vont ainsi connaître un déclin progressif qui va de pair avec celui de l'industrie lourde.
Ces tendances se poursuivent jusqu'aux chocs pétroliers de 1973 et 1979 où l'on voit apparaître les mêmes modifications/évolutions du transport de fret que cités précédemment au point 1.
Durant la période 1970 – 2000, on assiste également à une réduction significative des investissements réalisés par les pouvoirs publics en matière d'infrastructure, notamment sur les réseaux ferroviaires. De plus, les entreprises publiques de transport sont progressivement privatisées dans l'ensemble de l'Europe.
Cependant, si l'on revient aux quatre cartes présentées plus haut et qui sont le reflet d'une situation ancienne et glorieuse, on peut aisément concevoir que la Belgique, en termes de transport de fret, puisse rapidement retrouver un certain équilibre entre les différents modes de transport, et ce, malgré des investissements importants en termes d'infrastructures ferroviaires, vu l'ancienneté et les nombreux problèmes de congestion du réseau actuel.

9 Source: http://www.insee.fr/fr/regions/nord-pas-de-calais/default.asp?page=themes/ouvrages/atlas/08_06_trafics_maritimes.htm

3. Les modes ou moyens de transport alternatifs à la route

3.1. Répartition modale en Belgique selon le Bureau fédéral du Plan

Les modes de transport routier sont largement dominants, tant pour les personnes que pour les marchandises.
Pour le transport de marchandises, la part modale de la route était en 2006 de 75 %, celle de la voie d'eau de 12,8 % et celle du rail de 12,2 %.
Ces parts modales n'évoluent que lentement au fil du temps. Depuis 1970, la tendance a été à la hausse de la part modale de la route, qui est passée de 65 % en 1970 à 83 % en 2000 pour les personnes et de 48 % à 76 % pour les marchandises. Ces dernières années, cette tendance s'est inversée, la part modale de la route en 2006 étant légèrement inférieure à celle de 2000, notamment à cause de l'augmentation des prix des carburants et des politiques de promotion des modes alternatifs à la route.

3.2. Le transport maritime – acteur majeur de la mondialisation

Le commerce international est la pierre angulaire de la vie économique mondiale, nationale et régionale.
La majeure partie des échanges commerciaux, à l'échelle mondiale, sont réalisés par le trafic maritime. Les flottes de pétroliers, de porte-conteneurs et de cargos transportent chaque année des milliards de tonnes de marchandises.
Certains ports très anciens jouent depuis des siècles un rôle majeur dans le trafic maritime à l'instar de Marseille depuis l'Antiquité, mais surtout Venise, Gênes, Anvers, Amsterdam ou Londres pour ne parler que de l'Europe. Beaucoup d'autres ports sont en revanche de développement plus récent, depuis le 19e ou le 20e siècle, comme Rotterdam, Hong-Kong, Singapour ou encore Shanghai qui depuis 2005 est le premier port mondial en termes de flux de marchandises. La mondialisation et la libéralisation des échanges commerciaux surtout depuis les années 1990 ont développé les flux maritimes. Ceux-ci ont aussi bénéficié de la conteneurisation qui a considérablement accru, standardisé et rationalisé ces échanges. Aujourd'hui, plus de 5 milliards de tonnes de marchandises sont échangées par voie maritime : environ 2 milliards pour les produits pétroliers et leurs dérivés, 2 autres milliards pour les produits manufacturés et 1 milliard pour les matières premières.
La moitié de ces diverses marchandises est transportée par conteneurs.
En Europe, les flux de marchandises se concentrent essentiellement autour de Rotterdam, Anvers, Hambourg et le Havre avec cependant une légère concurrence des ports de Marseille et Gênes.

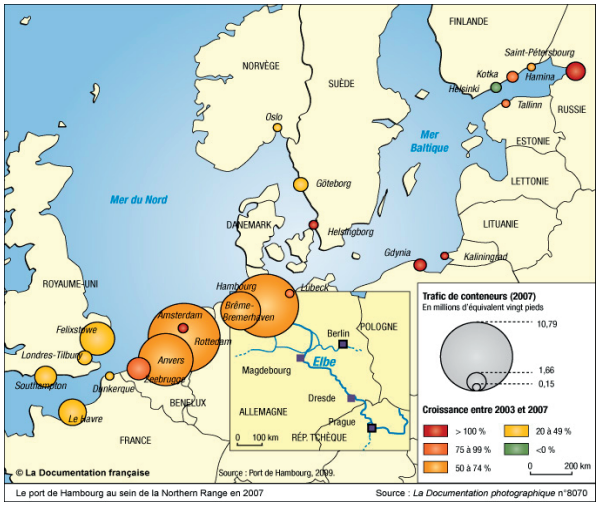


Illustration B4.10 : les grands ports autour de la Belgique

Il est à noter que plus de la moitié des centres de distribution européens sont aux Pays-Bas, qui se trouvent à l'intersection des ports d'Anvers, de Rotterdam et de Hambourg.

3.3. Transport par voie fluviale

Le transport fluvial est un moyen de transport fiable, ponctuel, respectueux de l'environnement et économique.
Depuis quelques années, l'on assiste à un regain d'intérêt pour le transport fluvial dont le potentiel de développement est considérable. Ainsi, d'après la « Direction générale opérationnelle de la Mobilité et des Voies hydrauliques », le trafic pourrait être deux fois plus dense sur le Canal Albert, sans qu'il y ait congestion ou allongement des temps d'attente aux écluses.
La route étant saturée et le rail ayant de grandes difficultés à accroître sa capacité de transport de fret, la voie d'eau apparaît de plus en plus comme la solution d'avenir. Le long des voies navigables, des aménagements sont réalisés pour le chargement, le déchargement et le stockage des cargaisons.
Le matériel de navigation a fortement évolué ces dernières années. Aujourd'hui, des bateaux modernes, de tous types et de toutes dimensions, équipés des dernières technologies en matière de télécommunication et d'appareils d'aide à la navigation (radars, pilotes automatiques, GPS, cartes de navigation électroniques, ordinateurs de bord, moteurs d'étrave, etc.) permettent de répondre aux attentes les plus diverses des chargeurs.
De plus, grâce au conteneur, tout type de marchandises peut être transporté par voie fluviale.

3.4. Transport ferroviaire – Moyen en perte de vitesse

Pour le transport de marchandises, le rail est en concurrence principalement avec le transport routier, plus flexible et plus sûr. Sur certains axes, il est en concurrence également avec la voie fluviale et les transports

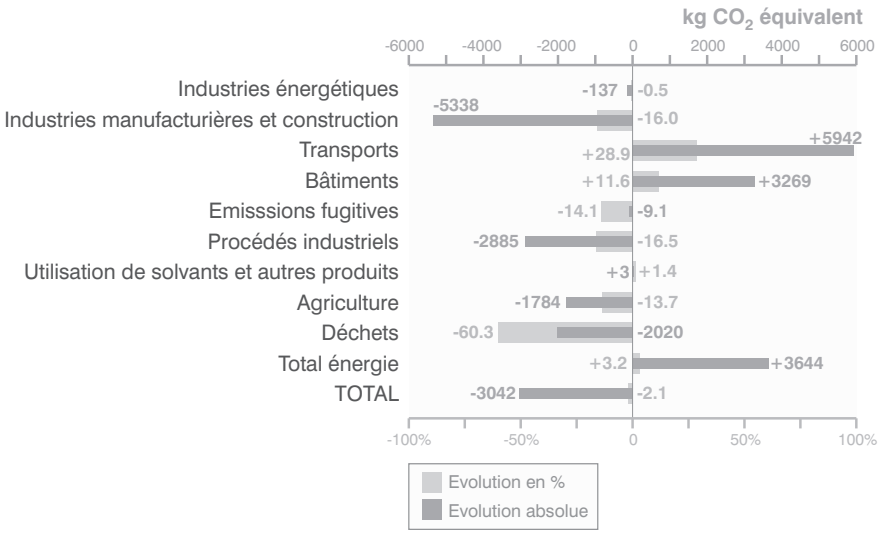


Illustration B4.11 : Évolution des émissions de gaz à effet de serre par secteur d'activités - entre 1995 et 2007 - source: Inventaire national des gaz à effet de serre (2007)

par installations fixes (gazoducs, oléoducs).
Le transport par voie ferroviaire, pour être compétitif en termes d'échanges commerciaux européens ou extra-européens (vers l'Asie ou l'Union Soviétique), nécessiterait une harmonisation au niveau des infrastructures. En effet, de nombreux problèmes d'interopérabilité subsistent dont notamment les différences d'écartement des voies, les différences de signalisations, les variations en termes d'alimentation électrique et en termes de gabarit du matériel roulant. Ces différences ont freiné considérablement le transport ferroviaire international.

4. Les impacts environnementaux des différents moyens de transport

Les différents moyens de transport, quels qu'ils soient, consomment des ressources énergétiques (essence, diesel, fuel, électricité…) et ce faisant ont des impacts sur la qualité de l'air atmosphérique et sur l'environnement.
Il est d'ailleurs à noter que si l'ensemble des secteurs économiques essaie depuis plusieurs années de limiter leurs impacts environnementaux, notamment en matière d'émission de GES, le secteur du transport, quant à lui, est caractérisé par une augmentation croissante des impacts environnementaux, notamment en termes d'émission de CO_2.
Selon le rapport d'étude réalisé en 2009 par l'Institut français de l'environnement (Ifen[10]) intitulé « Transports et environnement : comparaisons européennes », le secteur du transport est le deuxième émetteur de GES en Europe, après la production d'énergie. De 1990 à 2004, les émissions de GES ont été en constante augmentation. Ce sont principalement les émissions du transport routier qui dominent même si ce sont celles qui ont le plus diminué par rapport aux émissions des autres modes de transport.
De 1990 à 2004, les pollutions acides des transports routiers ont diminué respectivement de 42 %, celles des gaz précurseurs de l'ozone troposphérique de 52 % et celles des particules de 38 %[11]. Ces baisses résultent essentiellement de l'amélioration de la qualité des carburants, des progrès techniques de l'industrie automobile et de l'introduction de normes européennes de plus en plus strictes.
En Belgique, les émissions de gaz à effet de serre des transports représentaient, en 2005, 18,4 % des émissions nationales[12]. Le CO_2 émis par le transport routier (94 %) représente la plus grande partie.
Le transport routier génère également des émissions de N_2O (3 % des émissions du secteur des transports). Les émissions du transport fluvial et ferroviaire ne contribuent que très marginalement aux émissions totales du secteur (respectivement à hauteur de 1 % et de 0,5 %).
Suite à une très forte hausse de la demande de mobilité par la route au cours de la période 1990-2005 (transport de personnes : +23 % ; transport marchandises : + 93 %), les émissions de gaz à effet de serre des transports ont augmenté de 29 % au cours de cette même période.
Conformément aux lignes directrices de la CCNUCC[13], les émissions issues du transport aérien et maritime international ne sont pas comptabilisées dans les émissions nationales totales. En 2005, le niveau de ces émis-

10 Ifen : www.ifen.fr

11 Source : « Transports et environnement : comparaisons européennes », Ifen, 2009

12 Source : http://www.klimaat.be/IMG/pdf/Emissions_de_GES_2007.pdf

13 CCNUCC : Convention-cadre des Nations Unies sur les Changement Climatiques

Tableau B4.01 : Impacts environnementaux des différents modes de transport

Moyens de transport	Bases de données	Impacts environnementaux				
		Energie grise *MJ/tkm*	Effet de serre *kCO₂/tkm*	Acidification *kgSO₂/tkm*	Eutrophisation *kgPO₄/tkm*	Ozone troposphérique *kg C₂H₂/tkm*
Camion 16t	Ecosoft	5,9	0,37	0,00264	0,00046	0,00009
	KBOB 2007	5,27	0,318	/	/	/
	ECOINVENT	5,511702	0,33384	0,0017912	0,0033337	0,000059612
	CLIMAT	5,511702	0,333840	0,001791	0,000460	0,000060
Camion 28t	Ecosoft	3,7	0,22	0,0016	0,00027	0,00008
	KBOB 2007	3,76	0,223	/	/	/
	ECOINVENT	4,595289	0,19439	0,0010596	0,0019749	0,000037076
	CLIMAT	3,760000	0,212463	0,001059	0,000270	0,000037
Camion 40t	Ecosoft	2,7	0,15	0,00108	0,00016	0,00007
	KBOB 2007	2,84	0,165	/	/	/
	ECOINVENT	1,977356	0,11727	0,00056487	0,0010044	0,000019357
	CLIMAT	2,700000	0,150000	0,000565	0,000160	0,000019
Camionnette (<3,5t)	Ecosoft	27,1	1,65	0,00844	0,00115	0,0014
	KBOB 2007	19,5	1,16	/	/	/
	ECOINVENT	/	1,5718	0,0056272	0,0072329	0,00079057
	CLIMAT	19,500000	1,571800	0,007356	0,001150	0,000791
Train de marchandises	Ecosoft	1,2	0,06	0,0004	0,00004	0,00001
	KBOB 2007	0,606	0,0138	/	/	/
	ECOINVENT	0,716884	0,039543	0,00021161	0,00022926	8,8767E-06
	CLIMAT	0,716884	0,039543	0,000212	0,000040	0,000009
Navigation intérieure	Ecosoft	0,9	0,06	0,00041	0,00006	0,00001
	KBOB 2007	0,657	0,0457	/	/	/
	ECOINVENT	0,650593	0,046401	0,0003361	0,00061414	6,5004E-06
	CLIMAT	0,657	0,050700	0,000336	0,00006	0,000007
Navigation haute mer	Ecosoft	0,1	0,01	0,00026	0,00001	0
	KBOB 2007	0,17	0,0106	/	/	/
	ECOINVENT	/	0,0090391	0,00022775	0,00017264	7,1141E-06
	CLIMAT	0,100000	0,010000	0,000228	0,000010	0,000000
Avion de fret europe	Ecosoft	/	/	/	/	/
	KBOB 2007	/	/	/	/	/
	ECOINVENT	32,943769	1,6689	0,0064768	0,0085938	0,00027032
	CLIMAT	32,943769	1,668900	0,006477	0,008594	0,000270
Avion de fret intercontinental	Ecosoft	/	/	/	/	/
	KBOB 2007	16,4	1,08	/	/	/
	ECOINVENT	16,334347	1,0675	0,0041314	0,0054769	0,00017271
	CLIMAT	16,3343465	1,0675	0,004131	0,005477	0,000173

sions correspondait à 19 % des émissions nationales, le transport maritime étant la source la plus importante (87 % des émissions du transport international). Les émissions liées au transport aérien international ont augmenté de 15 % depuis 1990, tandis que celles dues au transport maritime ont grimpé de 69 %.

Les impacts environnementaux générés par les différents modes de transport sont repris dans le tableau ci-après. Ils sont calculés par rapport à la tonne-kilomètre (tkm).
La tonne-kilomètre est une unité de mesure de quantité de transport correspondant au transport d'une tonne sur un kilomètre.
La quantité de transport exprimée en tonnes-kilomètres se calcule en effectuant le produit de la masse transportée exprimée en tonnes (t), par la distance parcourue exprimée en kilomètres (km).
On distingue les tkm brutes, incluant la tare du véhicule de transport, et les tkm nettes, qui ne reprennent que le poids de la marchandise. Pour les conteneurs, il est d'usage de comptabiliser la tare du conteneur en tant qu'élément transporté, faisant partie des tkm nettes.

Les impacts environnementaux générés par les différents modes de transport ont été calculés suivant les taux de chargement suivants :

- <3,5 tonnes : 0.19 tonne
- 3,5 à 7,5 tonnes : 5 tonnes
- 7,5 à 16 tonnes : 7.5 tonnes
- 16-32 tonnes : 10 tonnes
- > 32 tonnes : 18 tonnes
- > 16 tonnes : 15.07 tonnes

Ces taux de chargement sont légèrement en dessous

des taux de chargement moyens européens[14].
On peut observer que plus le moyen de transport est petit, plus il consomme de l'énergie et plus il émet de polluants atmosphériques : la camionnette, le camion 16t, le camion 28t, le camion 40t… Il faut cependant faire une exception pour le transport aérien qui apparaît comme le mode de transport le plus énergivore et le plus polluant.
Il est également intéressant de remarquer que si le transport par rail consomme plus d'énergie que le transport fluvial intérieur, il émet moins de polluants. Cela s'explique simplement par le fait que le transport ferroviaire fonctionne à l'électricité tandis que tous les autres modes de transport utilisent principalement du fioul. En Europe, l'électricité est en partie produite à partir de l'énergie nucléaire (+/- 17 %).

En termes de polluants atmosphériques, et particulièrement par rapport aux GES, l'énergie nucléaire apparaît comme une énergie propre. Cependant, selon l'OCDE, certaines émissions indirectes peuvent être imputées à l'énergie nucléaire de par l'usage de sources d'énergies fossiles lors des phases du cycle de vie du combustible nucléaire. De plus, l'énergie nucléaire pose de nombreuses questions non résolues en termes de sécurité, de sûreté et d'élimination de déchets problématiques.

5. Scénarios de transport

Avec l'objectif de répondre à la question posée en début de chapitre, à savoir si le transport d'un matériau produit localement a moins d'impact que le transport d'un matériau produit en Europe ou en dehors des frontières de l'Europe, nous avons, dans un premier temps, établi différents scénarios de transport en fonction de la distance parcourue par un matériau et calculé l'impact environnemental de ceux-ci. Pour chaque scénario l'objectif est d'atteindre le centre-ville de Bruxelles.
Suite à un entretien avec madame Isabelle Thomas du CORE (Center for Operations Research and Econometrics, UCL), s'est posée la question du bien-fondé de cette destination finale. En effet, suivant les différentes études qu'Isabelle Thomas a menées sur le logement en Belgique[15], il s'avère que:

- si la maison individuelle ouverte représente la typologie la plus courante en région wallonne et région flamande, ce n'est pas le cas de la région bruxelloise qui est constituée essentiellement de logements collectifs: appartements, flats et studios;
- la région bruxelloise présente un taux élevé de rénovation, une grande partie de son patrimoine bâti datant d'avant 1970 et donc un faible taux de construction neuve face aux deux autres régions.

Cependant, au vu des différentes échelles étudiées en termes de transport (jusqu'à 10 000km) et la superficie relativement petite de la Belgique, nous avons estimé que la différence en termes de kilomètres parcourus, était négligeable. De plus, travailler avec un objectif au centre de Bruxelles permettait de mettre en évidence les différentes infrastructures de transport : port de Bruxelles, gare du Midi...

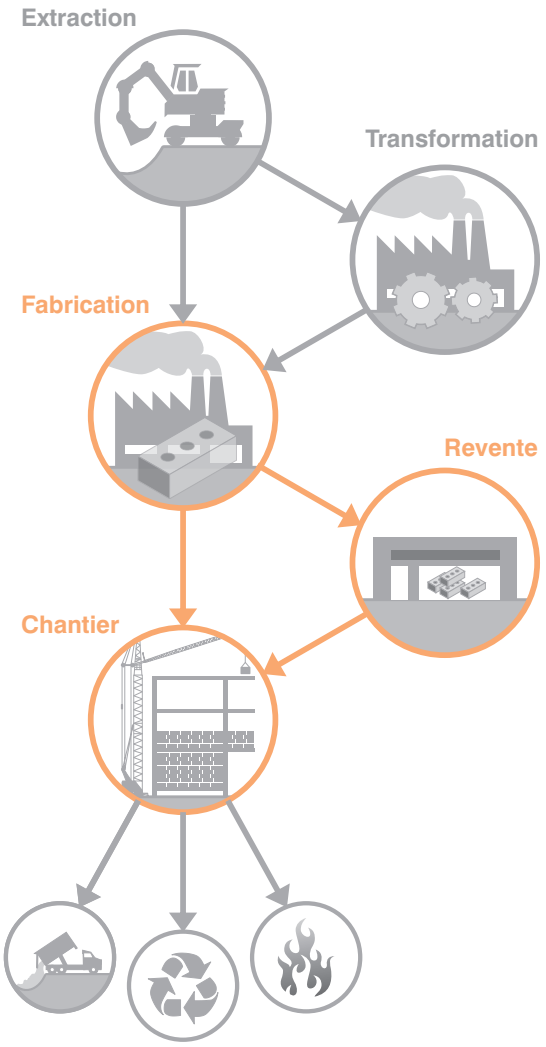


Illustration B4.12 : Phases de transport ayant été étudiées dans ce chapitre

5.1. Phases de transport considérées

Le transport des matériaux peut, à l'image du cycle de vie d'un produit, être constitué de plusieurs phases. Celles-ci sont présentées par la figure B4.12.
Pour l'évaluation de l'impact du transport, nous avons uniquement considéré la phase de transport reliant

14 Source : CSTC : Bepalingsmethode Milieu gerelateerde Materiaalprestatie van gebouwelementen (MMG), mei 2010

15 Le logement en Belgique, Enquête socio-économique 2001 Monographies, Dominique Vanneste, Isabelle Thomas et Luc Goossens, financé par la Politique scientifique fédérale dans le cadre du programme «Atlas: valorisation des résultats de l'Enquête socioéconomique 2001».

l'usine de fabrication au chantier, situé au centre de Bruxelles.

On peut en effet considérer que cette phase de transport est la plus conséquente dans la mesure où :

- les sites de transformation et de fabrication se situent généralement à proximité des sites d'extraction des matières premières. C'est notamment le cas pour les matériaux en terre cuite, les matériaux pierreux, les bétons et les ciments, certains isolants…
- les sites de traitement des déchets se situent dans un rayon relativement proche des chantiers: en Belgique, on répertorie de nombreux sites autorisés à effectuer le tri-recyclage des déchets inertes de construction et de démolition (voir illustration B4.13 qui cible principalement les sites wallons).

Concernant le transport des matériaux lié à leur élimination ou traitement en fin de vie, deux cas peuvent se présenter :

- soit les matériaux sont réutilisés sur place dans le cas d'un chantier de rénovation. Dans ce cas, il n'y a pas de phase de transport à considérer;

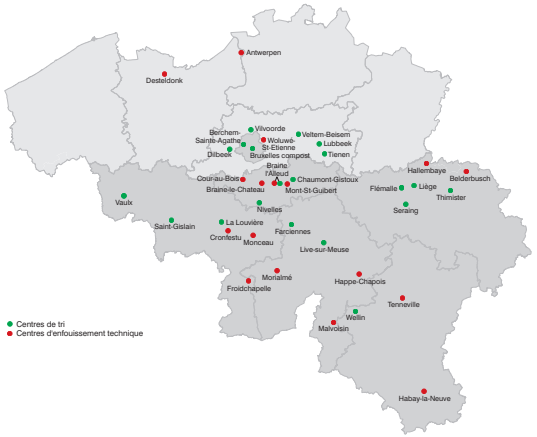


Illustration B4.13 : Implantation des différents sites de traitements des déchets

Tableau B4.02 : Organisation et mode de transport selon la catégorie de produit

Catégorie de produits	Organisation du transport		Modes de transport (en Belgique) [zone 1]						
	direct de l'usine au chantier	via un revendeur	de l'usine au chantier			de l'usine au revendeur	du revendeur au chantier		
			camion (> 16 t)	camion (3.5 - 16 t)	camionette (< 3.5 t)	camion (> 16 t)	camion (> 16 t)	camion (3.5 - 16 t)	camionette (< 3.5 t)
Matériaux en vrac pour gros-œuvre	75 %	25 %	100 %	30 %	0 %	100 %	90 %	10 %	
Béton coulé sur place	100 %	0 %	100 %	0 %	0 %	/	/	/	/
Produits préfabriqués pour gros-œuvre	100 %	0 %	100 %	0 %	0 %	100 %	100 %	0 %	0 %
Produits simples pour gros-œuvre (blocs, briques, revêtements de toiture, ...)	40 %	60 %	100 %	0 %	0 %	100 %	85 %	15 %	0 %
Silico-calcaire	40 %	60 %	100 %	0 %	0 %	100 %	85 %	15 %	
Isolation	40 %	60 %	100 %	20 %	0 %	100 %	85 %	15 %	
Produits de finition Revêtements de sol	10 %	90 %	20 %	80 %	5 %	100 %	90 %	10 %	
Produits de finition Carrelages	10 %	90 %	20 %	80 %	5 %	100 %	90 %	10 %	
Produits de finition Plâtre, enduits intérieurs, plaques	40 %	60 %	50 %	50 %	0 %	100 %	50 %	50 %	0 %
Produits de finition Menuiserie	90 %	10 %	50 %	45 %	5 %	100 %	40 %	50 %	10 %
Produits de finition Peintures et vernis	10 %	90 %		100 %	0 %	100 %	0 %	80 %	20 %
Equipements (chauffage, ventilation, ...)	0 %	100 %	/	/	/	100 %	0 %	80 %	20 %

Tableau repris de l'étude «Bepalingsmethode Milieugerelateerde Materiaalprestatie van gebouwelementen, réalisée par le CSTC, VITO et la KUL à la demande de l'OVAM, rapport de mai 2010

- soit le ou les matériaux doivent être évacués du chantier. Dans ce cas, après avoir étudié la localisation des différents sites de traitement en Wallonie et en extrapolant cette situation à la Flandre, nous avons considéré que l'ensemble du transport d'élimination est réalisé en Belgique grâce à des camions 16t et que la distance moyenne parcourue est d'environ 35 km, ce qui équivaut à la génération des impacts environnementaux suivants :
    - énergie grise: 193MJ/tonne
    - effet de serre: 33kgCO_2equ/tonne
    - acidification: 0,16kgSO_2equ/tonne
    - eutrophisation: 0,03kgPO_2equ/tonne
    - ozone photochimique: 0,015kgC_2H_2/tonne

Pour la phase de transport considérée, à savoir depuis la sortie d'usine jusqu'au chantier situé au centre de Bruxelles, il faut considérer deux alternatives : soit les matériaux sont directement transportés jusqu'au chantier, soit ils sont amenés chez un revendeur avant d'être transportés sur chantier. Le tableau B4.02 présente à la fois la répartition du transport (direct sur chantier ou via un revendeur) ainsi que le mode de transport utilisé pour la zone [1] en fonction du type de matériau. Mis à part les matériaux de gros-œuvre (béton et produits préfabriqués) et les éléments de châssis, la plupart des matériaux passent par un revendeur. Cette étape supplémentaire sera intégrée dans les différents scénarios.

5.2. Zonage géographique

Sept zones géographiques ont été définies pour l'établissement de scénarios.

[1] Zone « Belgique »

Après analyse de la situation géographique des différents producteurs de matériaux de construction en Belgique, nous avons estimé une distance moyenne à parcourir par le matériau de construction de 90 km.

[2] Zone « Benelux »



Figure B4.14 : Identification des différentes zones reprises dans les scénarios

Nous avons estimé, après analyse de cartes géographiques et traçage de cercles concentriques de différents rayons autour de Bruxelles, une distance moyenne à parcourir de 200 km.

[3] Zone « Régions limitrophes »

Les régions limitrophes considérées sont les Pays-Bas, l'Allemagne et la France. Nous avons estimé, par la même méthode que la zone [2], la distance moyenne à parcourir de 500 km.

[4] Zone « Pays limitrophes »

Les pays limitrophes considérés sont les Pays-Bas, l'Allemagne et la France. L'entièreté de leur territoire est prise en compte dans cette zone géographique. Nous avons donc considéré une distance moyenne à parcourir de 1000 km.

[5] Zone « Europe proche »

La zone géographique considérée reprend les pays suivants : Espagne, Portugal, Autriche, Suisse, le sud de la Scandinavie, la République Tchèque, une partie de la Pologne, le nord de l'Italie… La distance moyenne à parcourir a été estimée à 2000 km.

[6] Zone « Europe élargie »

La zone géographique considérée englobe les régions autour de la mer Baltique, la Méditerranée, la mer Egée…jusqu'au bord de la mer Noire. La distance moyenne à parcourir a été estimée à 4500 km.

[7] Zone « reste du Monde »

La distance moyenne à parcourir a été estimée à 10.000 km bien qu'il soit évident que certains matériaux venus d'Asie ou de Chine parcourent des distances encore plus importantes.

5.3. Mode de transport utilisé et/ou répartition modale

En termes de transport, il est important de considérer le mode ou les modes de transport utilisés pour parcourir une distance déterminée. En effet, sur une même distance, l'utilisation d'un camion 16T, d'un train de marchandises ou d'un transport par voie fluviale n'entraînera ni les mêmes coûts, ni les mêmes consommations d'énergie, ni les mêmes émissions de polluants atmosphériques.

Pour la zone **[1]**, nous avons considéré deux scénarios ou répartitions modales :

- La répartition modale du transport national de marchandises pour la catégorie « Minéraux bruts ou manufacturés et matériaux de construction » estimée par le bureau du Plan pour la période 2000 à 2006[16] à savoir :
  - 86 % par camions +28t
  - 8 % par transport fluvial
  - 5 % par camions 3,5-28t
  - 1 % par transport ferroviaire
- Une répartition plus en adéquation avec une mobilité durable, à savoir :
  - 55 % par camions +28t
  - 20 % par transport fluvial
  - 5 % par camions 3,5-28t
  - 20 % par transport ferroviaire

Pour les autres zones, nous avons considéré une dizaine de scénarios différents, en estimant que:

- les matériaux ou produits de construction étaient acheminés vers un revendeur puis transportés sur une petite distance en camionnette;
- plus la distance parcourue est importante, plus les moyens de transport par rail et par voie navigable sont utilisés.

Les différents scénarios sont les suivants:

[2] Zone « Benelux »

- scénario 1 : 100 % camionnette
- scénario 2: 100 % camion 16t
- scénario 3: 100 % camion 28t
- scénario 4: 100 % camion 40t
- scénario 5: 75 % train et 25 % camionnette
- scénario 6: 50 % camion 16 t et 50 % camionnette
- scénario 7: 50 % camion 28 t et 50 % camionnette
- scénario 8: 75 % camion 16 t et 25 % camionnette
- scénario 9: 75 % camion 28 t et 25 % camionnette
- scénario 10: 75 % voie navigable et 25 % camionnette

[3] Zone « Régions limitrophes »

- scénario 1 : 100 % camionnette
- scénario 2: 100 % camion 16t
- scénario 3: 100 % camion 28t
- scénario 4: 100 % camion 40t
- scénario 5: 90 % camion 16 t et 10 % camionnette
- scénario 6: 90 % camion 28 t et 10 % camionnette
- scénario 7: 90 % camion 40t et 10 % camionnette
- scénario 8: 90 % train et 10 % camionnette
- scénario 9: 90 % voie navigable et 10 % camionnette
- scénario 10: 50 % camion 28 t et 50 % train
- scénario 11: 50 % train, 40 % camion 28 t et 10 % camionnette

[4] Zone « Pays limitrophes »

- scénario 1 : 100 % camionnette
- scénario 2: 100 % camion 16t
- scénario 3: 100 % camion 28t
- scénario 4: 100 % camion 40t
- scénario 5: 100 % train
- scénario 6: 100 % voie navigable
- scénario 7: 95 % camion 16 t et 5 % camionnette
- scénario 8: 95 % camion 28 t et 5 % camionnette
- scénario 9: 95 % camion 40t et 5 % camionnette
- scénario 10: 90 % train et 10 % camion 28t
- scénario 11: 90 % voie navigable et 10 % camion 28t
- scénario 12: 50 % train et 50 % camion 28t
- scénario 13: 50 % voie navigable et 50 % camion

16 Source: Bureau fédéral du Plan : www.plan.be/transport

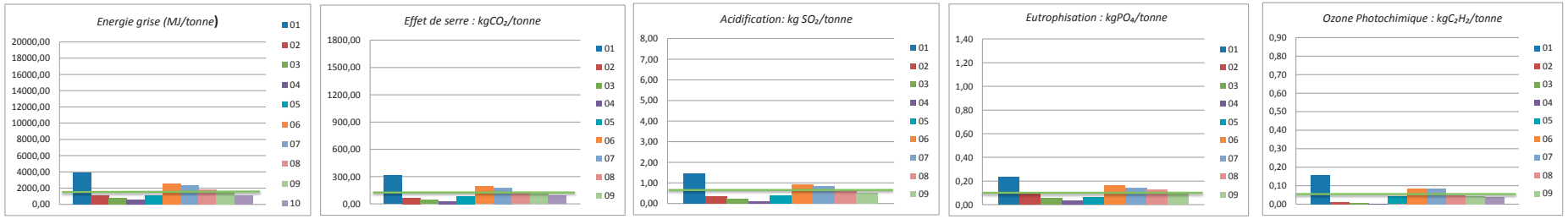


Illustration B4.15 : Scénarios Benelux

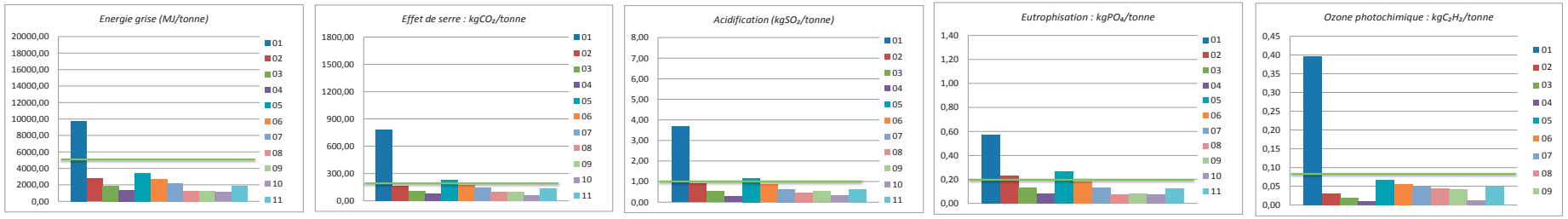


Illustration B4.16 : Scénarios régions limitrophes

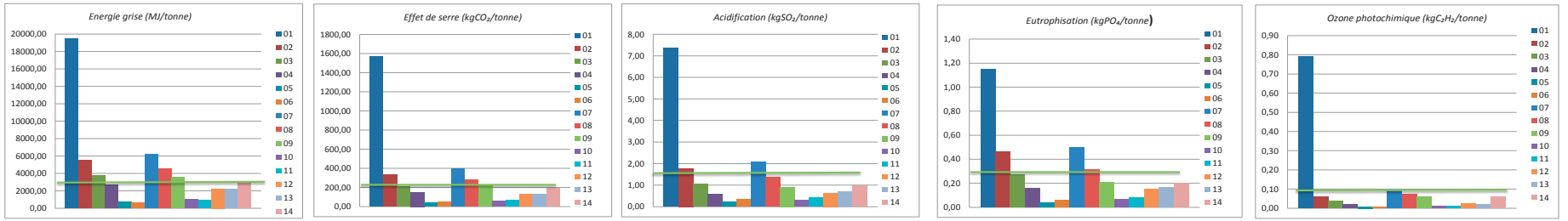


Illustration B4.17 : Scénarios pays limitrophes

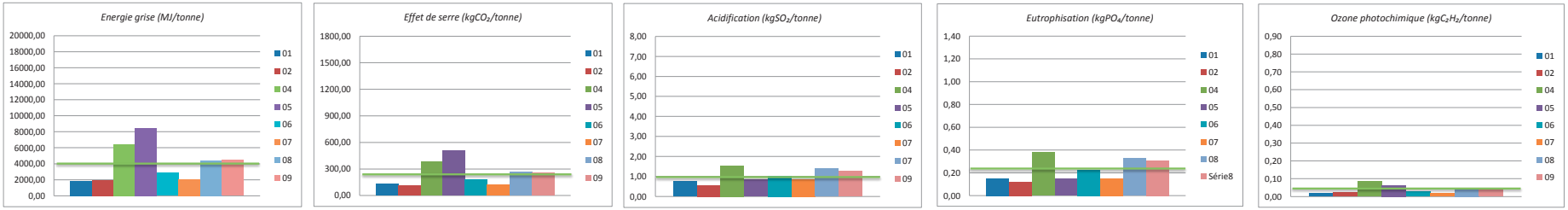


Illustration B4.18 : Scénarios Europe proche

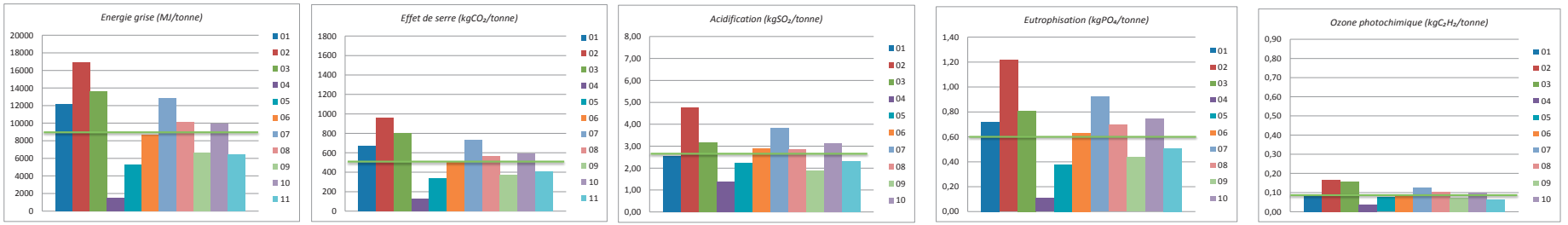


Illustration B4.19 : Scénarios Europe élargie

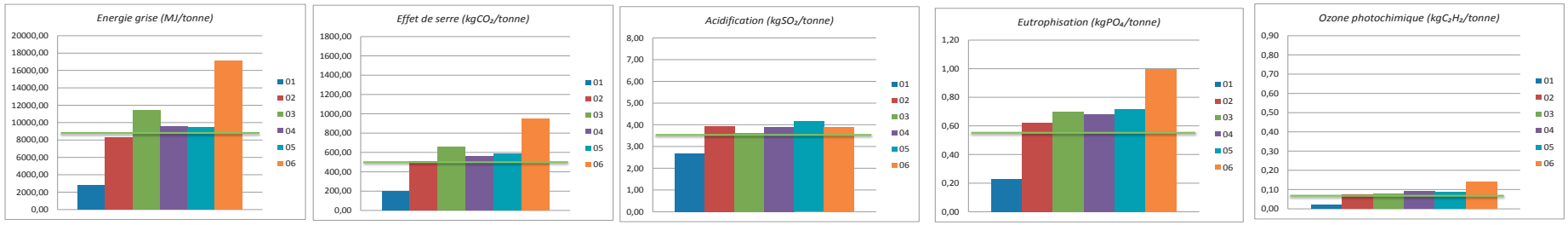


Illustration B4.21 : Scénarios reste du monde

28t
- scénario 14: 55 % voie navigable, 40 % camion 28 t et 5 % camionnette

[5] Zone « Europe proche »

- scénario 1 : 95 % voie fluviale et 5 % camion 28t
- scénario 2: 95 % voie maritime et 5 % camion 28t
- scénario 3: 95 % avion de fret et 5 % camion 28t
- scénario 4: 97 % camion 40 t et 3 % camionnette
- scénario 5: 97 % camion 28 t et 3 % camionnette
- scénario 6: 75 % voie fluviale et 25 % camion 28t
- scénario 7: 75 % voie maritime et 25 % camion 28t
- scénario 8: 50 % voie fluviale et 50 % camion 28t
- scénario 9: 50 % train et 50 % camion 28t

[6] Zone « Europe élargie »

- scénario 1 : 100 % camion 40t
- scénario 2: 100 % camion 28t
- scénario 3: 98 % camion 40 t et 2 % camionnette
- scénario 4: 98 % voie maritime, 1 % camion 28 t et 1 % camionnette
- scénario 5: 75 % voie maritime, 24 % camion 28 t et 1 % camionnette
- scénario 6: 50 % voie maritime et 50 % camion 28t
- scénario 7: 25 % voie maritime et 75 % camion 28t
- scénario 8: 50 % train et 50 % camion 28t
- scénario 9: 75 % train et 25 % camion 28t
- scénario 10: 50 % voie fluviale et 50 % camion 28t
- scénario 11: 75 % voie fluviale et 25 % camion 28t

[7] Zone « reste du Monde »

- scénario 1 : 95 % voie maritime et 5 % camion 28t
- scénario 2: 80 % voie maritime et 20 % camion 28t

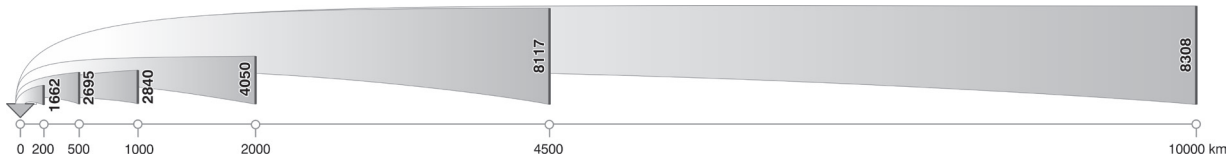


Illustration B4.21 : Consommation d'énergie grise par « tonne x le nombre de kilomètres parcourus

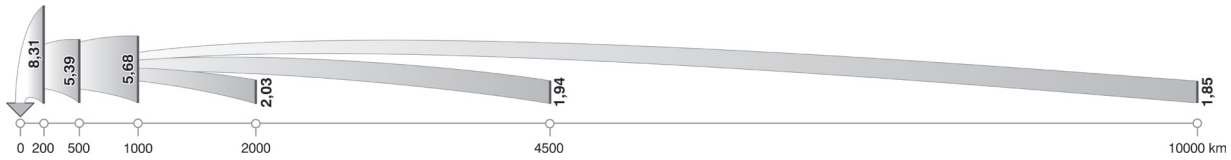


Illustration B4.22 : Consommation d'énergie grise par « tkm »

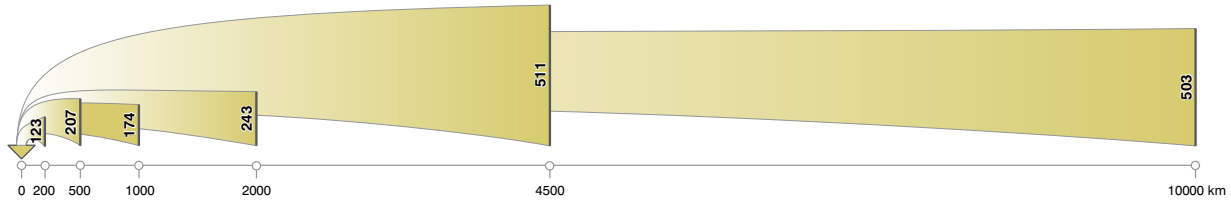


Illustration B4.23 : Émission de gaz à effet de serre par « tonne x le nombre de kilomètres parcourus

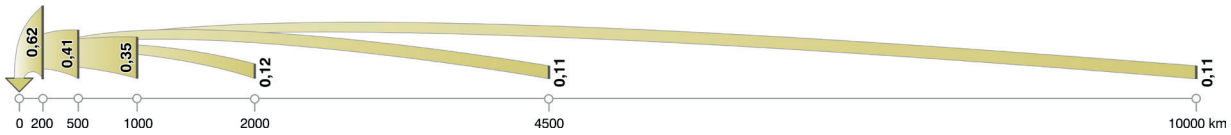


Illustration B4.24 : Émission de gaz à effet de serre par « tkm »

- scénario 3: 60 % voie maritime et 40 % camion 40t
- scénario 4: 60 % voie maritime et 20 % train et 20 % camion 28t
- scénario 5: 60 % voie maritime, 20 % voie fluviale et 20 % camion 28t
- scénario 6: 50 % train et 50 % camion 40t

5.4. Résultats et conclusions

L'ensemble des scénarios et le calcul de leurs impacts environnementaux sont présentés aux pages précédentes sous forme de graphe. Bien que ces scénarios restent relativement approximatifs, notamment dans la répartition modale ou l'estimation du nombre de kilomètres parcourus, ils permettent cependant de tirer quelques conclusions.

S'il paraît évident que plus la distance parcourue est importante, plus la phase de transport nécessitera de l'énergie et aura des impacts négatifs sur l'environnement, il est clair que le mode de transport influence considérablement le bilan énergétique et environnemental.

En effet, même sur de courtes distances, la camionnette est le mode de transport le plus consommateur et le plus polluant. Ses impacts dépassent largement la moyenne.

En outre, on remarque que la combinaison de plusieurs modes de transport alternatifs avec du transport routier permet de diminuer sensiblement l'impact énergétique et environnemental du transport en général. Ceci se remarque à la fois sur des courtes et longues distances.

Pour approfondir cette conclusion, nous avons étudié l'impact moyen en termes de consommation d'énergie grise et d'émission de gaz à effet de serre sous forme de graphe avec la distance parcourue en abscisse et l'importance de l'impact considéré en ordonnée.

- les graphes en gris présentent la consommation d'énergie grise.
- les graphes en jaune présentent les émissions de gaz à effet de serre.

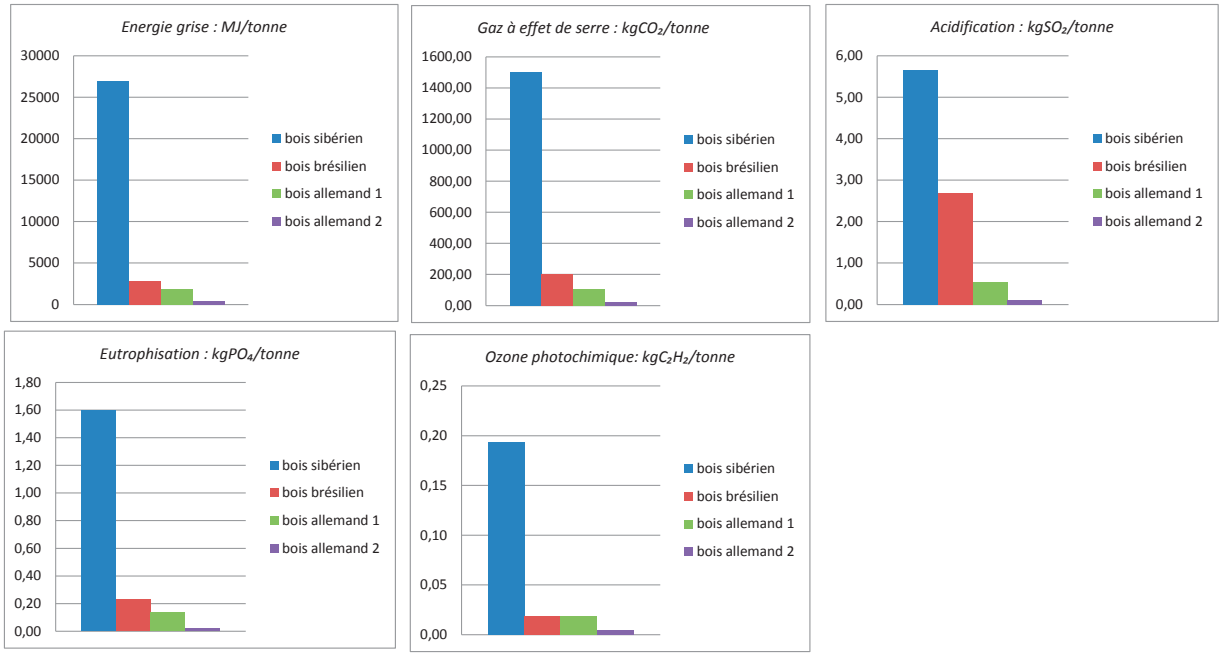


Illustration B4.25 : Impact du transport selon l'origine - cas du bois

Les graphes B4.21 et B4.23 donnent les consommations d'énergie grise et les émissions de gaz à effet de serre par «tonne x le nombre de kilomètres parcourus». Tous deux démontrent que la consommation d'énergie grise et les émissions de gaz à effet de serre ne sont pas linéaires: leur augmentation n'est pas proportionnelle à celle du nombre de kilomètres.

Les graphes B4.22 et B4.24 donnent les consommations d'énergie grise et les émissions de gaz à effet de serre par «tkm». Tous deux démontrent l'influence du mode de transport à la fois sur la consommation d'énergie grise et sur les émissions de gaz à effet de serre : plus la distance à parcourir est importante, plus le mode de transport est conséquent, moins il consomme de l'énergie et moins il émet de gaz à effet de serre.

On remarque également que lorsque la distance à parcourir augmente, les modes de transport utilisés évoluent vers des modes de transport plus conséquents en volume: train de marchandises, voie fluviale, voie maritime. Ceci a pour conséquence de diminuer sensiblement l'impact environnemental du transport. Pour étayer cette conclusion, nous avons, à titre d'exemple, établi une comparaison environnementale du transport entre un bois provenant de Sibérie, un bois provenant

du Brésil et un bois provenant des forêts allemandes[17] (voir illustration B4.25):

- un bois provenant de Sibérie va parcourir environ 10 000 kilomètres. Cette distance va être couverte essentiellement par transport routier;
- un bois provenant du Brésil va parcourir environ 10 000 kilomètres. Cette distance va être couverte en grande partie par transport maritime (90 %) et par transport routier (10 %);
- un bois provenant d'Allemagne va parcourir environ 500 km. Cette distance va être couverte essentiellement par transport routier;
- une alternative par train de marchandises a été calculée pour le bois allemand.

Les graphiques de l'illustration B4.25 montrent l'impact environnemental des différents bois, en fonction de la distance parcourue et du moyen de transport utilisé.
On remarque de manière évidente que le mode de transport a toute son importance dans le bilan environnemental du transport : les bois sibérien et brésilien parcourent tous les deux la même distance, mais avec un mode de transport différent. Le mode de transport par voie maritime permet de diminuer les impacts environnementaux par huit. Il en est de même sur des courtes distances avec le bois allemand.
Ces bilans environnementaux du transport sont à comparer avec les bilans environnementaux des processus d'extraction et de fabrication qui, pour un bois résineux européen, sont les suivants:

- énergie grise : 24,3 MJ/kg
- effet de serre: -1, 36 kgCO_2/kg
- acidification : 0,00082 kgSO_2/kg
- ozone photochimique: 0,00006 kgC_2H_2/kg

17 Il s'agit uniquement d'une comparaison environnementale liée au transport. Nous n'avons pas pris en considération les différentes caractéristiques des bois considérés: bois tropical, bois résineux,...

En se basant sur les différents graphes, on peut conclure que si, dans un objectif de réduction des impacts environnementaux liés au transport, on souhaite encourager l'utilisation de matériaux locaux, régionaux et/ou européens, il est essentiel de considérer non seulement la distance, mais plus encore, les modes de transport qui sont utilisés pour acheminer les produits de construction.

6. Transport et cycle de vie de quelques matériaux

Si dans un premier temps, les différents scénarios envisagés au point 5 ont permis d'identifier certaines problématiques et l'influence du mode de transport sur le bilan environnemental du transport, il nous paraissait important de faire le lien avec la réalité quotidienne des fabricants, en termes de transport (approvisionnement de matières premières, transport des produits finis vers les revendeurs, identification des filières de traitement en fin de vie, etc.).
Nous avons donc établi un questionnaire relatif au transport qui, après entrevue avec plusieurs fabricants belges de produits de construction ainsi qu'avec certaines fédérations de fabricants, leur a ensuite été envoyé.Le questionnaire est présenté ci-après par la figure B4.27.

L'objectif était d'identifier les flux de transport entre les lieux d'extraction et de fabrication, entre les lieux de fabrication et les lieux de distribution, mais également entre un chantier potentiel au centre de Bruxelles et les lieux de traitement en fin de vie.

Seule, l'entreprise Knauf nous a fourni les informations demandées pour deux produits: un produit à base de plâtre, mentionné sous le terme «MP75» et un isolant pour toiture inclinée mentionné sous le terme «TI135U».

1. Informations générales

A. Coordonnées de la personne remplissant le questionnaire

Nom
Prénom
Société
Fonction
Téléphone
Adresse mail

B. Informations sur un produit

nom du fabricant
site internet
nom commercial du produit

2. Transport des matières premières (principale = > 10% de la masse)

par rapport au produit mentionné ci-dessus

nombre de matières premières
par matière première:
pourcentage de la matière (% de la masse)
origine géographique de la matière première
moyen de transport pour l'acheminement jusqu'à l'usine

3. Situation du ou des lieux de fabrications

nombre de lieux de transformation
situation géographique des lieux de transformation
par lieu de fabrication:
moyen de transport pour l'acheminement des produits finis
nombre de revendeurs sur la Belgique
présence de revendeurs dans un rayon de 30km autour de BXL

4. Filières de traitement en fin de vie

A. Traitement actuel en fin de vie

classe du déchet
traitement actuel
situation géographique des filières
(par rapport à un chantier situés au centre de BXL)

B. Potentiel de recyclage

type de recyclage
situation géographique des filières
(par rapport à un chantier situés au centre de BXL)

Illustration B4.26: Questionnaire transport

Sur base des informations données par le fabricant, nous avons pu établir le cycle de vie «transport» pour ces deux produits.

6.1. Cycle « transport » - produit «TI135U»

Le produit «TI 135U» est produit à Visée (Liège).
Différentes matières premières entrent dans le processus de fabrication et dans la composition du produit:

- matière 1 (5 à 10 %) 190 km - camion 28t
- matière 2 (15 à 20 %) 90 km - camion 28t
- matière 3 (5 à 10 %) 6000 km - bateau
  125 km - camion 28t
- matière 4 (50 à 60 %) 350 km - camion 28t
- matière 5 (5 à 10 %) 250 km - camion 28t

Une fois fabriqué, le produit fini peut être acheminé par camion 28t vers différents chantiers ou revendeurs dans un rayon de maximum 500 km.
En termes d'approvisionnement du produit, 34 revendeurs ont été pointés dans un rayon de 30 km autour de Bruxelles-Ville. Dans le cas de l'approvisionnement en matériaux, deux scénarios peuvent être imaginés:

- le camion 28t parcourt les 115 km entre Visé et Bruxelles centre pour alimenter directement le chantier
- la distance est répartie comme suit : 85 km parcourus en camion 28t et 30 km parcourus en camionnette. Pour les calculs d'impact, nous avons considéré la moyenne de ces deux cas.

Arrivé en fin de vie, le produit étant considéré comme un déchet inerte (classe III), il devra être transporté par camion ou camionnette vers un centre d'enfouissement technique, soit en région wallonne, soit en région flamande. Pour ce faire, il parcourera en moyenne une distance de 30 km, soit en camion 28t soit en camionnette.

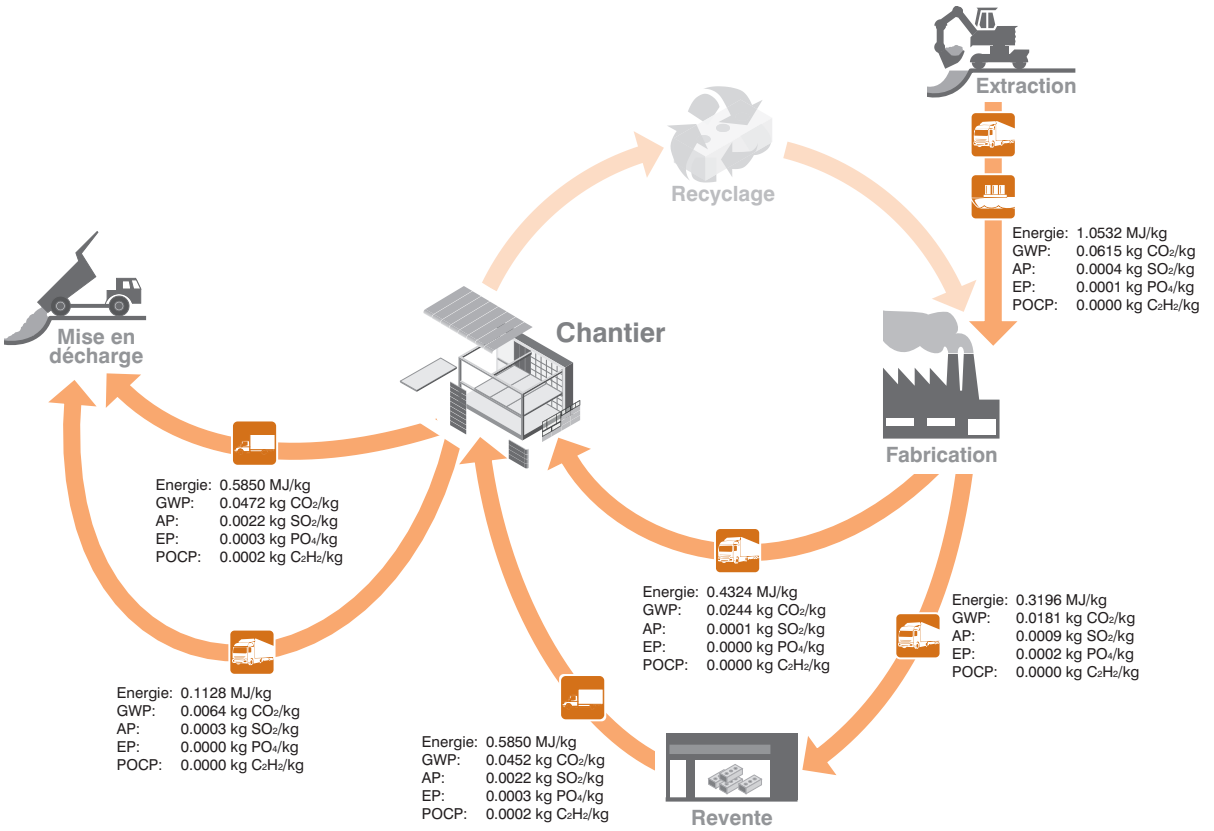


Illustration B4.27 : Produit TI135U : Calcul de l'impact du transport - par phase

Calcul d'impact et résultats

Le calcul des impacts environnementaux a été établi comme suit:

- Acheminement des matières premières vers l'usine

Le calcul est réalisé pour chaque matière première selon la proportion de celle-ci dans la composition du produit, en fonction du nombre de kilomètres parcourus et du mode de transport utilisé.
Les résultats ont été ensuite additionnés puis remis à l'échelle du «kg de matière produite».

• Acheminement de l'usine vers le chantier

Différents calculs d'impact ont été réalisés pour cette phase du cycle de vie:
- le calcul d'impact suivant la distance maximale parcourue par le produit fini sortant d'usine;
- le calcul d'impact suivant les deux scénarios proposés plus haut;
- le calcul d'impact suivant la moyenne de deux scénarios.

Deux modes de transport ont été considérés: le camion 28t et la camionnette.

• Acheminement du produit « déchet » du chantier vers le centre technique d'enfouissement

Deux calculs d'impact ont été réalisés pour cette phase:
- le calcul d'impact pour une distance de 30 km parcourue en camion 28t;
- le calcul d'impact pour une distance de 30 km parcourue en camionnette;
- la moyenne des deux précédents calculs.

Les résultats sont présentés sous forme graphique par l'illustration B4.27.
On constate que:
- la phase d'acheminement des matières premières est la phase de transport qui a le plus d'impact. En effet, les distances parcourues sont relativement importantes et se font principalement en camion, excepté pour la matière 3 qui est acheminée par bateau;
- dès qu'un acheminement se fait en camionnette, l'impact de celui-ci augmente considérablement, même si la distance parcourue est relativement peu conséquente (30 km).

Par rapport aux impacts générés par le processus de fabrication du produit[18] en question, l'impact généré par la phase de transport " extraction vers fabrication " a un impact relativement faible : entre 1 % et 9 % suivant l'indicateur.
Par contre, si on tient compte de l'ensemble des phases de transport sur la durée de vie du produit, l'impact transport devient plus important : entre 2,5 % et 23 % suivant l'indicateur.

6.2. Cycle « transport » - produit MP75

Le produit MP75 est un enduit à base de plâtre fabriqué dans l'usine Knauf à Engis, le long de la Meuse.
Deux matières premières interviennent dans la fabrication de ce produit:
- la matière première 1 est la matière de base, elle intervient à raison de 80 à 100 % (90 %) dans la composition du produit fini. Elle provient de l'usine Prayon, de l'autre côté de la Meuse, et est acheminée par bande transporteuse jusqu'à l'usine Knauf.
- la matière première 2 intervient pour 0 à 20 % (10 %) dans la composition du produit fini. Elle vient d'Allemagne (300 km) par bateau.

En termes d'approvisionnement du produit, 54 revendeurs[19] ont été pointés dans un rayon de 30 km autour de Bruxelles-Ville. Dans le cas de l'approvisionnement en matériaux, deux scénarios peuvent être imaginés:
- le camion 28t parcourt les 109 km entre Engis et Bruxelles-centre pour alimenter directement le chantier
- la distance est répartie comme suit : 79 km parcourus en camion 28t et 30 km parcourus en camionnette. Pour les calculs d'impact, nous avons considéré la moyenne de ces deux cas.

18 Par mesure de confidentialité, ces impacts ne seront pas communiqués dans cette thèse.
19 Sur l'ensemble du territoire belge, il y a environ 250 revendeurs des produits Knauf à base de plâtre

Arrivé en fin de vie, le produit est considéré comme un déchet inerte (classe III). Si une usine de recyclage des enduits à base de plâtre est en fonctionnement à Anvers, il s'avère difficile de décoller l'enduit de son support; seulement 0 à 5 % des enduits sont recyclés. La plupart des enduits seront donc acheminés vers un centre d'enfouissement technique, soit en région wallonne, soit en région flamande. Pour ce faire, il parcourera en moyenne une distance de 30 km, soit en camion 28t soit en camionnette.

Calcul d'impact et résultats

Le calcul des impacts environnementaux a été établi comme suit:

• Acheminement des matières premières vers l'usine

Le calcul est réalisé pour chaque matière première selon la proportion de celle-ci dans la composition du produit, en fonction du nombre de kilomètres parcourus et du mode de transport utilisé.
Les résultats ont été ensuite additionnés puis remis à l'échelle du « kg de matière produite ».

• Acheminement de l'usine vers le chantier

Différents calculs d'impact ont été réalisés pour cette phase du cycle de vie:
- le calcul d'impact suivant la distance maximale parcourue par le produit fini sortant d'usine;
- le calcul d'impact suivant les deux scénarios proposés plus haut;
- le calcul d'impact suivant la moyenne de deux scénarios.

Deux modes de transport ont été considérés: le camion 28t et la camionnette.

• Acheminement du produit « déchet » du chantier vers le centre technique d'enfouissement

Deux calculs d'impact ont été réalisés pour cette phase:
- le calcul d'impact pour une distance de 30 km parcourue en camion 28t;
- le calcul d'impact pour une distance de 30 km parcou-

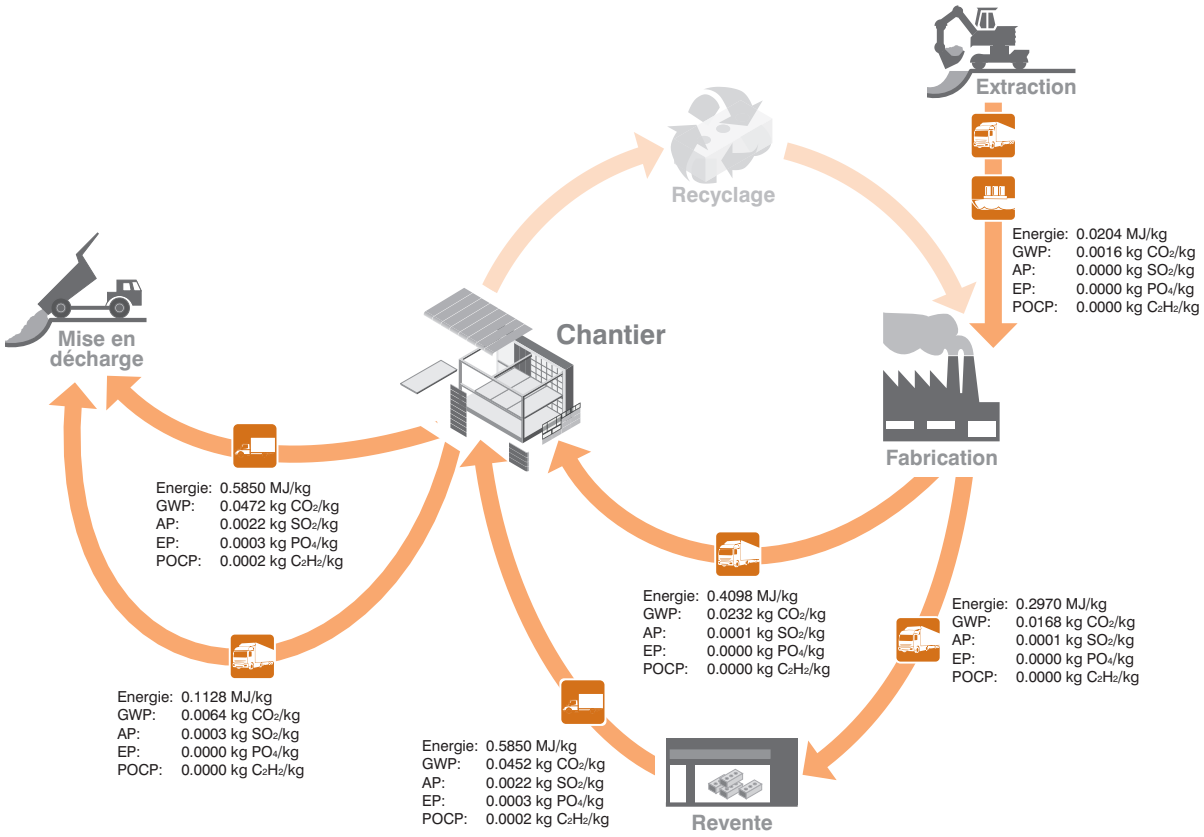


Illustration B4.28 : Produit MP75 : Calcul de l'impact du transport - par phase

rue en camionnette;
- la moyenne des deux précédents calculs

Les résultats sont présentés sous forme graphique par l'illustration B4.28.

On constate que:
- la phase d'acheminement des matières premières est la phase de transport qui a le moins d'impact. En effet, les matières premières parcourent de courtes distances au moyen de modes de transport économes en énergie et peu polluants;
- dès qu'un acheminement se fait en camionnette, l'impact de celui-ci augmente considérablement, même si la distance parcourue est relativement peu conséquente (30 km)

Par manque d'information, nous n'avons pas pu évaluer l'impact environnemental des phases de transport par rapport à l'impact global du produit spécifique.

Cependant, en reprenant les données d'inventaires des différentes bases de données consultées (ECOINVENT, KBOB, ECOSOFT) pour un enduit à base de plâtre, nous avons pu établir que, par rapport aux impacts générés par le processus de fabrication du produit en question, l'impact généré par la phase de transport " extraction vers fabrication " a un impact relativement faible: entre 1 % et 2 % suivant l'indicateur.

7. Quelques pistes de réflexion pour un transport de marchandises plus soutenable.

De par son évolution et sa configuration actuelle, le transport de marchandises – principalement routier – ne répond pas de manière adéquate aux priorités du développement durable et aux enjeux de la mobilité soutenable.

En effet,
- au niveau environnemental, l'augmentation du nombre de véhicules et l'augmentation du nombre de tonnes de marchandises transportées participent quotidiennement au phénomène de congestion des réseaux

routiers, particulièrement dommageables pour l'environnement, car les progrès techniques réalisés par l'industrie automobile pour limiter la pollution atmosphérique et la consommation de ressources énergétiques ont été contrés par l'augmentation importante du trafic routier;

- au niveau économique, l'épuisement des ressources fossiles est un enjeu majeur pour le secteur du transport. Cet enjeu pourrait, sur une échelle de temps plus ou moins courte, modifier sa configuration actuelle;
- au niveau social, un des enjeux majeurs est l'impact des particules fines émises par les véhicules équipés d'un moteur diesel sur la santé. Cet impact, scientifiquement avéré notamment par les recherches réalisées par l'Organisation mondiale de la santé (OMS[20]) pourrait s'accentuer dans la mesure où les particules sont de plus en plus fines.

Si tout un chacun s'accorde sur le fait que le transport routier est le mode le plus polluant, il n'en reste pas moins que peu d'initiatives sont prises pour modifier ou transformer la configuration des flux actuels de transport. Au contraire, on remarque une utilisation accrue de petits véhicules (<3,5 tonnes) sur des petites et moyennes distances.

Face à ces constats, nous proposerons ci-après quelques pistes de réflexion:

Répartition adaptée et utilisation adéquate des modes de transport

Comme nous l'avons déjà dit plus haut, le transport par route demeure le seul mode à répondre aux exigences de ponctualité, de fiabilité, de souplesse et de réactivité, et ce, malgré des problèmes de congestion de plus en plus fréquents et importants en zone urbaine et périurbaine.

Si le transport par voie d'eau retrouve un certain dynamisme dans certains pays européens, le transport par rail a toujours des difficultés à convaincre les industriels: ancienneté des réseaux, congestion fréquente, investissements coûteux nécessaires…

Malgré ces différents constats, il semble qu'une répartition modale favorable aux modes alternatifs est possible sous certaines conditions :

- les réseaux ferroviaire et fluvial devraient davantage se pencher sur une amélioration potentielle de leur service en termes de fiabilité et de flexibilité.
- la densification des réseaux et surtout leur entretien doivent être pensés dans une approche multimodale où l'ensemble des déplacements est pris en compte. L'intérêt commun et collectif doit primer sur l'intérêt individuel et local.
- les réseaux ferroviaire et fluvial doivent être véritablement être intégrés en milieu urbain puisque c'est là qu'aboutissent la plupart des échanges de marchandises. La plupart des grandes villes belges sont à la fois accessibles en train et par voie navigable. C'est un atout dont les entreprises et fabricants doivent profiter.

Implantation des entreprises et des industries

La vraie question relative au transport n'est pas celle de la distance à parcourir mais bien celle du mode de transport utilisé.

L'historique de l'évolution du transport a clairement mis en évidence la situation privilégiée de la Belgique en ce qui concerne les réseaux de transport alternatifs:

- la présence de deux grands ports belges en bordure de l'Atlantique: Anvers et Zeebrugge;
- la proximité de deux autres grands ports en bordure de l'Atlantique: Dunkerque et Amsterdam;
- un réseau de voies navigables conséquent vers la France, l'Allemagne et les Pays-Bas. L'ensemble des grandes villes belges sont accessible par voie d'eau;
- un réseau ferroviaire important vers l'Allemagne

D'un point de vue environnemental, social et économique, il est important que les pouvoirs publics et les administrations gérant le territoire et l'urbanisme saisissent cette opportunité, repensent l'implantation des entreprises et des industries par rapport à la question du transport et encouragent les industriels à utiliser les modes de transports alternatifs pour leurs approvisionnements en matières premières notamment, et ce, par divers moyens législatifs, fiscaux ou financiers.

Modification des structures de production et de distribution

Les systèmes de production et de distribution de marchandises ont connu des modifications majeures après les chocs pétroliers de 1973 et 1979: nous sommes passés d'une production de masse, planifiée à long terme avec des stocks importants à une production plus dynamique s'adaptant à la demande et avec des stocks réduits.

Ceci a donné lieu à un fractionnement du transport et à une augmentation du nombre de véhicules sur la route. Vu les contextes économique et environnemental peu favorables, les systèmes de production et de distribution pourraient connaître de nouvelles modifications. Il est donc intéressant d'à la fois, repenser la structure des chaînes « production – distribution » mais également l'intégration du transport (distance et mode).

Traçabilité des produits et de leur mode de transport

S'il est aujourd'hui possible de connaître l'origine d'un produit ou d'un matériau, il n'est pas encore aisé d'identifier avec certitude les modes de transport utilisés ni les distances parcourues avec ceux-ci.

En outre, il n'est pas rare sur chantier d'obtenir un matériau d'une provenance autre que celle prescrite dans le cahier des charges.

20 Source : Publication OMS : « Air quality Guidelines, global update 2005, Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide»

Il devient donc essentiel, en termes de réduction d'impact environnemental, de connaître avec précision l'origine des produits et les modes de transport utilisés pour les acheminer jusqu'en Belgique.

Réduction des besoins de transport

La réduction des besoins de transport de marchandises est une notion qui dépasse largement la responsabilité des producteurs et des distributeurs. En tant consommateur, nous avons tous un rôle à jouer.
Notre consommation actuelle pourrait ou devrait, dan sun objectif de développement durable, d'abord être revue à la baisse, non en qualité, mais en quantité.
Ensuite, lorsque nous consommons, il est important d'identifier l'origine des produits pour d'une part limiter l'impact environnemental du transport et d'autre part de prendre en considération l'aspect social lié à l'extraction ou à la fabrication d'un produit.

Révision du prix du transport – taxe CO_2

Malgré la hausse du prix des carburants, il s'avère que le transport de marchandises reste relativement bon marché. De plus, les coûts sont encore trop rarement pris en compte dans les bilans financiers des constructions et le prix d'achat des matériaux.
Cependant, l'initiative prise par l'Union européenne autorisant l'intégration des coûts externes liés aux émissions de CO_2 dans la « taxe kilométrique » des poids lourds pourrait être une avancée positive et marquerait sans doute un tournant dans l'évolution du transport routier.

L'avenir du transport passe donc par une sérieuse remise en question de la répartition modale de transports, du développement et entretien des réseaux, des structures de production, de distribution, mais également et surtout par une remise en question de nos modes de consommation.

Les matériaux de construction et la santé

« Les enfants sont notre avenir et l'avenir du développement durable commence par la protection de la santé de nos enfants »
Kofi Annan, secrétaire général des Nations Unies, 2003

Le 24 octobre 2011, à Bruxelles, s'est ouvert un procès « environnemental » important.
Sur le banc des accusés, la société Eternit qui, à Kapelle-op-den-Bos, pendant des années et jusqu'en 1998 a fabriqué des produits de construction à base d'amiante, principalement des produits de toiture.
Sur le banc des plaignants, cinq victimes d'une même famille: quatre victimes « environnementales » (la mère et deux enfants, tous trois décédés d'un mésothéliome, ou cancer de la plèvre, provoqué par l'amiante) et une victime « du travail » (le père, ingénieur employé par Eternit, mort en 2000 du même cancer).
La société Eternit n'en est pas à son premier procès environnemental puisqu'un autre procès est en cours à Turin avec 3000 victimes environnementales.
Si le dommage est établi et si le lien de causalité entre la présence massive d'amiante dans l'environnement de cette famille, voisine de l'usine Eternit, et la maladie mortelle qui a emporté les quatre victimes ne fait plus de doute, l'enjeu du procès sera de prouver qu'Eternit a commis une faute c.-à-d. qu'en toute connaissance de cause elle a méprisé le principe de précaution et la santé publique au profit de son expansion commerciale en continuant à produire des matériaux « nocifs », à cacher volontairement cette nocivité à la collectivité et à en minimiser l'impact par une politique lobbyiste influente.
En effet, les dangers liés à la manipulation de l'amiante ont été clairement identifiés dans les années 20 (asbestose, fibrose pulmonaire), puis dans les années 60 où on a mis en évidence le potentiel cancérigène de l'amiante (cancers broncho-pulmonaires) et, pour finir, dans les années 80 où l'on a établi le lien de causalité entre l'amiante et le mésothéliome.
Ce fait divers de l'actualité belge, en introduction de ce chapitre, est intéressant dans la mesure où il soulève plusieurs problématiques liées aux matériaux de construction et à leurs impacts potentiels sur la santé:

- d'une part, il met en évidence l'impact sanitaire des matériaux ou des matières sur les ouvriers qui les manipulent lors de leur fabrication, lors de leur mise en œuvre et de leur démolition;
- d'autre part, il met l'accent sur le danger sanitaire encouru par l'ensemble de la population du fait de la dégradation de l'environnement. Dans ce cas précis, cette dégradation est due à l'émission dans l'air de certaines substances et à leur inhalation par le système respiratoire. Le danger sanitaire peut également être engendré par la mise en contact avec des substances toxiques émises par certains matériaux durant leur « vie en œuvre »

La qualité de l'air que nous respirons, que ce soit à l'extérieur des bâtiments ou à l'intérieur est un facteur influençant sensiblement notre santé.
Les constatations ci-après, faites par l'Organisation mondiale de la santé (OMS)[21] en termes de pollution de l'air et d'impact sur la santé permettent de clairement situer cette problématique dans un contexte de développement durable:

- la pollution de l'air représente un risque environnemental majeur pour la santé. En diminuant les niveaux de pollution atmosphérique, on peut aider les pays à réduire la charge mondiale de morbidité imputable aux infections respiratoires, aux cardiopathies et au cancer du poumon;
- la santé respiratoire (à court et à long terme) et cardiovasculaire de la population d'une ville dépend directement du niveau de pollution de l'air;
- la pollution de l'air intérieur serait responsable d'environ 2 millions de décès prématurés, principalement dans les pays en développement. Pratiquement la moitié de ces décès sont dus à la pneumonie chez les enfants de moins de 5 ans;
- la pollution atmosphérique en milieu urbain serait

21 Source: http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/fr/index.html

responsable d'1,3 million de décès dans le monde par an. Les habitants des pays à revenu moyen supportent une part disproportionnée de ce fardeau;
- plus de 25 % des maladies sont liées aux dégradations de l'environnement;
- la contribution des polluants environnementaux dans l'incidence, la prévalence, la morbidité et la mortalité est forte pour quatre maladies: l'intoxication par le plomb, l'asthme, le cancer et les troubles neurocomportementaux.

Si dans les pays en voie de développement, de nombreux décès peuvent être attribués à des environnements malsains (mauvaise qualité de l'eau, paludisme, assainissement insuffisant, forte pollution de l'air intérieur par fumées de cuisson et de chauffage...), les pays occidentaux sont principalement touchés par les maladies allergiques et les cancers qui affectent l'ensemble de la population, y compris un grand nombre d'enfants. Ainsi, le projet EnVIE[22] a démontré, en recensant les cas de maladies pouvant être directement attribués à une mauvaise qualité de l'air intérieur par pays que, par exemple, en Belgique, annuellement, 12.000 cas d'asthme ainsi que 10.000 cas de maladies cardiovasculaires, 3000 cas de cancer des poumons ou 12.000 cas de SBS (syndrome du bâtiment malsain) sont dus à une mauvaise qualité de l'air intérieur. L'étude montre que sur la totalité des cas de pathologie précédemment évoqués en Belgique, 7000 cas par an verraient leur origine dans la présence de COV à des concentrations trop élevées.

22 Le projet européen EnVIE (co-ordination action on indoor air quality and health effects - http://www.envie-iaq.eu) vise à dresser un premier état des lieux de la recherche dans le domaine de la qualité de l'air intérieur en Europe, de mettre en évidence ses effets avérés sur la santé pour préparer les évolutions futures de la politique communautaire.

Que ce soit en manipulant les matières premières et les matériaux de construction ou durant nos activités quotidiennes dans nos environnements extérieur et intérieur, nous sommes en permanence en contact direct avec des « polluants » physiques et chimiques.

Nous n'aborderons dans ce chapitre ni la pollution électromagnétique, ni la pollution par les biocontaminants.
La pollution électromagnétique est constituée pas les champs électriques et magnétiques présents dans notre environnement et dus à l'activité humaine.
Par biocontaminant, on entend polluant d'origine biologique. L'occupation d'une habitation génère ce type de polluants par la présence d'être humains, d'animaux, de plantes et de végétaux, d'acariens...

Ces polluants physiques et chimiques sont d'une part dégagés par les matières et matériaux eux-mêmes et d'autre part présents dans l'air que nous respirons.
Dans les deux cas, ces polluants peuvent provoquer des nuisances allant d'une simple irritation des mains ou des yeux (lors d'une manipulation) à une irritation des voies respiratoires dont les effets peuvent aller d'affections temporaires à des dysfonctionnements respiratoires permanents ou des maladies chroniques.
Les poumons et le système respiratoire sont la première cible de ces polluants. En effet, nos poumons représentent une surface de près de 90 m^2 en contact, chaque jour avec environ 15 m^3 d'air, soit près de 20 kg, alors que l'ingestion quotidienne d'eau n'est que d'environ 2 kg et celle des aliments de 1 à 2 kg.

C'est pourquoi nous développerons dans ce chapitre à la fois l'impact sanitaire lié à la pollution atmosphérique et l'impact sanitaire lié à la pollution de l'air intérieur.
Nous développerons également un point sur les nuisances encourues par les ouvriers lors de la manipulation des matériaux durant leur mise en œuvre ou leur fin de vie.
Pour chaque problématique, nous présenterons les réglementations et législations en vigueur.

Il est important de rappeler que l'impact des matériaux sur la santé des êtres humains est un domaine de recherche relativement récent et peu avancé.
De nombreuses inconnues demeurent, notamment sur les matières premières « nocives » introduites dans les procédés de fabrication ou de mise en œuvre, sur la manière dont celles-ci réagissent au sein du matériau, sur la manière dont celles-ci réagissent à un taux d'humidité plus ou moins important, en quelle quantité ces substances deviennent réellement nocives pour la santé…
Cependant, des informations scientifiques existent déjà sur certaines substances ou polluants et c'est sur cette base là que nous aborderons les différents points cités plus haut.

1. L'impact sanitaire des polluants atmosphériques

La pollution de l'air extérieur n'est plus à démontrer et ses conséquences ont été révélées par un épisode de smog survenu à Londres, en 1952, épisode considéré encore aujourd'hui comme la pire pollution atmosphérique de toute l'histoire du Royaume-Uni.
Du 5 au 9 décembre 1952, un phénomène de smog particulièrement dense s'abat sur Londres. Les premiers comptes rendus de l'époque avaient laissé penser que ce phénomène de pollution avait entraîné la mort d'environ 4000 personnes et rendu malades 100 000 autres, mais des recherches plus récentes ont démontré que le nombre de morts liées au smog avait été sous-estimé.
Cet épisode a eu pour effet, d'une part, de présenter au grand jour le danger mortel que pouvait représenter la pollution atmosphérique pour la santé des populations urbaines et, d'autre part, d'être l'élément déclencheur de recherches et de réglementations environnementales.

1.1. Sources de pollution atmosphérique

Différentes activités contribuent à la pollution de l'air :

- la production d'énergie thermique génère des émissions importantes de gaz de combustion et de poussières. Cette production concerne à la fois les industriels et les particuliers (chauffage des logements);
- l'industrie qui, outre les gaz de combustion et les poussières, génère en fonction de la nature de son activité des composés organiques volatils (COV), des odeurs, etc.;
- les moyens de transport;
- le traitement des déchets (centre d'enfouissement technique, stations d'épuration, dalle de compostage, centre de regroupement de boues de dragage, unité de biométhanisation);
- les activités agricoles (élevages) peuvent être à l'origine de nuisances olfactives importantes et peuvent contribuer à la pollution en ammoniac.

Si le secteur industriel a fourni ces dernières années un effort considérable en termes de réduction d'émission de polluants atmosphériques, ce n'est pas le cas du secteur du transport qui est en constante augmentation. Selon l'ADEME[23], la circulation automobile en France, serait responsable de l'émission de 69 % des oxydes d'azote, 64 % du monoxyde de carbone, de 33 % des particules en suspension, de 49 % des composés organiques volatils et de 33 % du dioxyde de carbone.

1.2. Polluants primaires et polluants secondaires

Un polluant primaire est un polluant émis dans l'air (extérieur ou intérieur) directement par une source donnée. Un polluant secondaire n'est pas directement émis en tant que tel, mais se forme à la suite de réactions chimiques entre plusieurs polluants primaires présents dans l'atmosphère.

Exemple:
L'ozone, qui se forme lorsque les hydrocarbures (HC) et les oxydes d'azote (NOx) réagissent avec la lumière du soleil, est un exemple de polluant secondaire, tout comme le dioxyde d'azote (NO2), qui se forme quand le monoxyde d'azote (NO) réagit avec l'oxygène de l'atmosphère, ou encore les pluies acides, qui se forment lorsque le dioxyde de soufre ou les oxydes d'azote réagissent avec l'eau.

1.3. Les polluants atmosphériques et leurs impacts sur la santé

Les principaux polluants atmosphériques ayant un impact potentiel sur la santé sont le dioxyde de soufre (SO_2), le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NOx), l'ozone (O_3), les hydrocarbures (HC), les métaux lourds comme le plomb (Pb) et le cadmium (Cd) et les particules en suspension, surtout les plus fines (PM10 et PM2.2). Ci-après nous présenterons quelques polluants atmosphériques et leur influence à la fois sur la santé, sur l'environnement et sur le patrimoine bâti.

Ammoniac (NH_3)

L'ammoniac est surtout lié aux activités agricoles. En ville, sa présence est notamment liée à l'utilisation de produits de nettoyage, à la décomposition de matières organiques et à l'usage de voitures à catalyseurs.
L'ammoniac est un gaz acidifiant dont les émissions sont relativement importantes. Après transformation en nitrates (NO_3), il contribue à l'acidification de l'environnement (air, sol, eau) et porte préjudice aux écosystèmes : dépérissement forestier, acidification des lacs et atteinte aux chaînes alimentaires aquatiques.
Il porte également préjudice au patrimoine ancien, notamment toutes les constructions en pierre calcaire.
L'ammoniac n'a pas d'influence connue ou avérée sur la santé.

Composés organiques volatils (COV - hors méthane)

Les composés organiques volatils (COV) correspondent à des molécules formées principalement de liaisons entre des atomes de carbone et des atomes d'hydrogène. Les composés organiques présents dans l'air ambiant sont divisés en deux catégories : les composés organiques volatils (COV) et les hydrocarbures polyaromatiques ou hydrocarbures aromatiques (HPA ou HAP). Ces composés sont émis par le transport routier, l'utilisation de solvants dans les procédés industriels ou de mise en œuvre (colles, vernis, peintures) et lors de la combustion d'énergies fossiles.
Les plus connus sont les BTX, des hydrocarbures aromatiques monocycliques : benzène, toluène, xylène. Ce sont également les plus toxiques.
Les autres COV sont les aldéhydes, les cétones et les hydrocarbures halogénés de faible poids moléculaire.
Les COV interviennent dans la formation d'ozone troposphérique et contribuent au phénomène des pluies acides qui attaquent les végétaux.
Les composés organiques volatils les plus fréquemment mesurés sont : benzène, toluène, éthylbenzène, meta, para-Xylènes, ortho-Xylène, styrène, trichloroéthylène, tétrachloroéthylène, n-décane, n-undécane.
Les effets sur la santé des COV sont très différents selon le polluant envisagé. Ils peuvent générer une certaine gêne olfactive et une irritation voire une diminution de la capacité respiratoire.
Les aldéhydes sont très irritants pour les muqueuses oculaires et respiratoires. Certains d'entre eux, tel le formaldéhyde, sont également à l'origine d'allergies de contact cutanées.
Les cétones induisent des effets neuro-comportementaux (céphalée et somnolence).
Le benzène provoque une dépression de l'immunité cellulaire, des atteintes du système nerveux et des leucémies.
Le toluène et le xylène sont des irritants cutanés et peuvent provoquer des troubles du système nerveux central : troubles de la mémoire, insomnies, diminution

23 Source: www.ademe.fr

des performances intellectuelles, troubles de la personnalité.
Des nuisances olfactives peuvent aussi être liées aux émissions de COV, notamment aux émissions de composés soufrés (thiols), amoniaqués (amines) et les aldéhydes.
Certains hydrocarbures sont considérés comme des substances potentiellement cancérogènes.

Les sources potentielles spécifiques aux COV se retrouvent essentiellement dans l'air intérieur. C'est pourquoi nous donnerons les valeurs limites au point 3.3.

Dioxyde de soufre (SO_2)

Le dioxyde de soufre (SO_2) est essentiellement émis lors de la combustion de matières fossiles (charbon, pétrole) et dans une moindre mesure par certains procédés industriels.
Depuis une quinzaine d'années, le développement de l'énergie électronucléaire, la régression du fuel lourd et du charbon, une bonne maîtrise des consommations énergétiques et la réduction de la teneur en soufre des combustibles (et carburants) ont permis la diminution les concentrations ambiantes en SO2 en moyenne de plus de 50%[24].
En présence d'humidité, le dioxyde de soufre forme de l'acide sulfurique (H_2SO_4) qui contribue à l'acidification de l'environnement avec pour conséquences le dépérissement forestier, l'acidification des lacs et l'atteinte aux chaînes alimentaires aquatiques.
En tant que facteur acidifiant, le dioxyde de soufre peut entraîner la dégradation du patrimoine ancien, notamment des pierres calcaires.
Le dioxyde de soufre est un gaz irritant qui agit en synergie avec d'autres substances, notamment les particules en suspension. Il provoque des irritations oculaires, cutanées et respiratoires. Des expositions courtes à des valeurs élevées ou des expositions prolongées à des valeurs plus faibles peuvent provoquer des bronchites chroniques, de l'asthme chronique, des grippes chroniques... Des études cliniques ont montré que l'exposition au dioxyde de soufre à des concentrations d'environ 1 000 microgrammes par mètre cube peut engendrer ou exacerber des affections respiratoires (toux chronique, dyspnée, augmentation des infections) et entraîner une augmentation du taux de mortalité par maladie respiratoire ou cardio-vasculaire[25].

Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques[26]

Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) sont une famille de composés organiques volatils (COV). Ils sont constitués de composés formés de 4 à 7 noyaux benzéniques. Plusieurs centaines de composés sont générés par la combustion des matières fossiles (notamment par les moteurs diesels) sous forme gazeuse ou particulaire. Le plus étudié est le benzo(a) pyrène (BAP). Du fait de cette grande diversité, seuls certains HAP peuvent être identifiés par les analyses. Dans les années 80, l'EPA, l'agence de protection de l'environnement des États-Unis, a classé 16 HAP dans sa liste des polluants prioritaires (priority pollutants, tableau 1). Depuis lors, on procède généralement à l'analyse de ces 16 HAP en considérant qu'ils sont représentatifs de l'ensemble de la classe des HAP. Les analyses se limitent même souvent au seul benzo(a)pyrène, puisqu'il se trouve toujours en proportion relativement constante, environ 10 %, dans les mélanges contenant des HAP.
Certains matériaux à base de caoutchouc, à l'instar des pneus de voiture ou des manches d'outils, sont aussi susceptibles de contenir des HAP.
La structure moléculaire de certains types de HAP les amène à être transformés dans l'organisme en composés extrêmement toxiques, appelés époxydes. Les époxydes réagissent très facilement avec l'ADN, ce qui peut entraîner des mutations génétiques menant parfois au cancer. Certains HAP peuvent également affecter la reproduction ou le développement foetal. Ces effets des HAP ont été démontrés en expérimentation animale, mais le risque existe également pour l'homme. Le benzo(a)pyrène est particulièrement toxique sur ce plan, puisque ses effets cancérogènes sont prouvés pour l'homme et qu'on le considère aussi comme mutagène, tératogène et toxique pour le développement. Le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a réévalué les HAP en 2006 et en a classé 15[27] parmi les substances probablement ou possiblement cancérogènes pour l'homme.

Métaux lourds

Cette dénomination regroupe l'ensemble des métaux présentant un caractère toxique pour la santé et l'environnement : le mercure (Hg), l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le nickel (Ni), le zinc (Zn), le manganèse (Mn), le plomb (pb), etc.
Les métaux lourds sont émis lors de la combustion d'énergie fossile (transport, industrie...). On les retrouve également dans de nombreux produits de la vie courante et dans les matériaux de construction.
Les métaux s'accumulent dans l'organisme et provoquent des effets toxiques à court et/ou à long terme. Ils peuvent affecter le système nerveux, les fonctions

24 Fiches polluants - ORAMIP - www.oramip.org

25 Fiches polluants - ORAMIP - www.oramip.org

26 Source: http://www.bag.admin.ch/themen/chemikalien/00228/05582/index.html?lang=fr

27 Source: http://monographs.iarc.fr/search.php?cx=009987-501641899931167%3A2_7lsevqpdm&cof=FORID%3A9&ie=UTF-8&ie=ISO-8859-1&oe=ISO-8859-1&q=Air+Pollution%2C+Part+1%2C+Some+Non-heterocyclic+Polycyclic+Aromatic+Hydrocarbons+and+Some+Related+Industrial+Exposures&sa=Search

rénales, hépatiques, respiratoires ou autres[28].
Leurs effets[29] sur la santé sont les suivants:

- Plomb (Pb): effets hématologiques et cardiovasculaires (hypertension) et atteintes rénales.
  Le plomb peut également provoquer des effets neurologiques et psychiatriques: dépressions allant jusqu'au suicide, manque d'attention, atteinte à l'intelligence visuelle et aux fonctions motrices, troubles de la mémoire, difficulté d'apprentissage, état de fatigue, agitation, agressivité, psychoses, hallucinations, polyneuropathie périphérique, encéphalopathie et saturnisme;
- Cadmium (Cd)[30]: une exposition chronique induit des maladies des reins pouvant évoluer vers une insuffisance rénale. L'effet irritant observé dans certains cas d'exposition par inhalation est responsable de rhinites, de pertes d'odorat et de broncho-pneumopathies chroniques. Sur la base de données expérimentales, le cadmium est considéré comme un agent cancérigène, notamment pulmonaire;
- Chrome (Cr)[31]: par inhalation, les principaux effets sont une irritation des muqueuses et des voies aériennes supérieures et parfois inférieures. Certains composés doivent être considérés comme des cancérogènes, en particulier pulmonaires, par inhalation, même si les données montrent une association avec d'autres métaux;
- Mercure : lésions du cerveau, maladies auto-immunes (arthrite rhumatique, lupus, sclérose en plaques), maladies cardiovasculaires (hypertension et autres), cancer du foie. Le mercure peut également provoquer des effets neurologiques et psychiatriques: diminution de l'intelligence, troubles de la parole, agitation, agressivité, troubles visuels et auditifs, polyneuropathie, myasthénie grave, maladie d'Alzheimer;
- Arsenic (As)[32] : les principales atteintes d'une exposition chronique sont cutanées. Des effets neurologiques, hématologiques ainsi que des atteintes du système cardio-vasculaire sont également signalés. Les poussières arsenicales entraînent une irritation des voies aériennes supérieures. L'arsenic et ses dérivés inorganiques sont des cancérigènes pulmonaires.

Monoxyde de carbone

Voir point 3.2.

Oxydes d'azote (NOx)

Les oxydes d'azote sont des gaz émis essentiellement par des processus de combustion à haute température (transport, chauffage,…).
On les retrouve sous forme de monoxyde d'azote NO (90 %) et de dioxyde d'azote NO_2 (10 %).
Les oxydes d'azote participent aux phénomènes des pluies acides, à la formation de l'ozone troposphérique, dont ils sont l'un des précurseurs, à l'atteinte de la couche d'ozone stratosphérique et à l'effet de serre.
Les oxydes d'azote contribuent à l'acidification de l'environnement avec pour conséquences le dépérissement forestier, l'acidification des lacs et l'atteinte aux chaînes alimentaires aquatiques.
En tant que facteur acidifiant, les oxydes d'azote peuvent entraîner la dégradation du patrimoine ancien (pierre calcaire).
Le dioxyde d'azote est un gaz irritant qui pénètre dans les plus fines ramifications des voies respiratoires.
Dès que sa concentration atteint 200 μg/m3, il peut entraîner une altération de la fonction respiratoire, une hyperréactivité bronchique chez l'asthmatique et un accroissement de la sensibilité des bronches aux infections chez l'enfant.

Ozone (O_3)

Dans la stratosphère, l'ozone se forme sous l'action du rayonnement ultraviolet. Les concentrations maximales d'ozone sont situées en moyenne de 25 à 30 km d'altitude. Cette couche d'ozone, qui serait épaisse de 3 mm si on rassemblait tout l'ozone stratosphérique, absorbe les ultraviolets et nous protège de leurs actions néfastes.
Dans la troposphère, l'ozone est un constituant naturel de l'atmosphère. Il devrait normalement être présent à des teneurs faibles, mais du fait des activités humaines, les niveaux d'ozone dans les basses couches peuvent être élevés à certaines périodes de l'année
La pollution par l'ozone au niveau du sol résulte d'un mécanisme complexe. L'ozone troposphérique est créé par réaction photochimique, lors d'interactions entre les rayonnements ultraviolets solaires et des polluants primaires précurseurs tels que les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone, les hydrocarbures et la famille des Composés Organiques Volatils (COV) présents dans les gaz d'échappement. Cet ozone s'ajoute à l'ozone naturel. Les concentrations en ozone dans l'atmosphère augmentent ainsi de 2% par an; il est maintenant considéré comme un polluant.
Les plus fortes concentrations se rencontrent lors de conditions de fort ensoleillement et de stagnation de l'air. Il se forme dans les zones polluées, puis est transporté. Dans les villes, à proximité des foyers de pollution, il est immédiatement détruit par interaction avec le monoxyde d'azote. Les pointes de pollution sont donc plus fréquentes en dehors des villes.
L'ozone, en tant que superoxydant, est un polluant majeur de l'air, nocif pour l'environnement, la faune et la flore, mais également pour l'être humain.
En quantité très élevée, l'ozone contribue à l'acidification de l'environnement (air, sol, eau) et porte atteinte aux écosystèmes. L'ozone a un effet néfaste sur la végé-

28 Fiches polluants - ORAMIP - www.oramip.org
29 Sources: [COE 2011]; [INERIS 2010], [DGS 2002]
30 Fiches polluants - ORAMIP - www.oramip.org
31 Fiches polluants - ORAMIP - www.oramip.org
32 Fiches polluants - ORAMIP - www.oramip.org

tation et sur certains matériaux. Il contribue à l'effet de serre et aux pluies acides.
L'ozone est un gaz oxydant extrêmement réactif. Il exerce une action irritante locale sur les muqueuses oculaires et respiratoires, des bronches jusqu'aux alvéoles pulmonaires.
On observe une inflammation et une altération des fonctions pulmonaires dès 160 μg/m3 durant quelques heures. Les effets sont amplifiés par l'exercice physique.
Les atteintes oculaires apparaissent rapidement, pour des expositions de 400 à 1 000 μg/m3
En outre, l'ozone est considéré comme un gaz potentiellement cancérogène[33].

En Europe, on considère actuellement que l'ozone est l'un des polluants atmosphériques les plus préoccupants. C'est ainsi que plusieurs études européennes ont signalé un accroissement de la mortalité quotidienne de 0,3 % et des maladies cardiaques de 0,4 % pour chaque augmentation de 10 μg/m3 de la concentration en ozone.

Particules en suspension (fines et très fines)

« Particules » ou « poussières » est un terme générique désignant toutes les particules en suspension dans l'air ambiant.
Ce terme recouvre une vaste gamme de tailles et de compositions physico-chimiques. On distingue notamment trois types différents de particules :

- les particules totales : ensemble des particules dans l'air;
- les particules fines (PM10) : les particules de diamètre inférieur à 10 μm;
- les particules très fines (PM2,5) : les particules de diamètre inférieur à 2,5 μm.

Les particules en suspension peuvent être d'origine naturelle (érosion des sols, pollens...) ou anthropique.
Dans ce cas, elles sont issues majoritairement de la combustion incomplète des combustibles fossiles et de l'usure des matériaux.
Les PM10 sont essentiellement des particules issues de l'abrasion mécanique de matières solides (frottement, construction/démolition, traitements des sols…)
Les PM2,5 sont de deux types :

- les PM2,5 primaires, particules carbonées provenant de la combustion du bois, du charbon et des gaz d'échappement (diesel);
- les PM2,5 secondaires, provenant de réactions chimiques entre gaz émis dans l'atmosphère (SO_2, NOx, COV).

Les poussières et particules absorbent et diffusent la lumière, limitant ainsi la visibilité.
Elles peuvent avoir une odeur désagréable et leur dépôt peut entraîner l'apparition de salissures et autres dégradations.
Les grosses particules (diamètre > 10 μm) n'ont qu'un faible impact sur la santé : elles se déposent très rapidement sur le sol ou sont arrêtées au niveau du nez et ne pénètrent pas dans l'organisme.
Les particules fines et très fines pénètrent plus ou moins profondément dans l'organisme en fonction de leur taille (PM10 : voies respiratoires supérieures et moyennes, PM2.5 : alvéoles pulmonaires).
Ces deux dernières catégories sont responsables de troubles respiratoires, d'irritations des voies respiratoires, de l'altération de la fonction respiratoire surtout chez l'enfant ainsi que de l'augmentation des fréquences et de l'intensité des crises d'asthme.
Les particules « ultrafines » sont suspectées de provoquer également des effets cardio-vasculaires (infarctus du myocarde[34]). Elles peuvent également avoir des propriétés mutagènes et cancérigènes : c'est notamment le cas de certaines particules émises par les moteurs diesel qui véhiculent certains hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).
Les particules en suspension ont plus d'effets sur la santé que tout autre polluant. Les principaux composants en sont les sulfates, les nitrates, l'ammonium, le chlorure de sodium, le carbone, les matières minérales et l'eau. Elles se composent d'un mélange de substances organiques et minérales, sous forme solide ou liquide, et sont classées en fonction de leur diamètre aérodynamique: PM10 (diamètre de moins de 10 μm); PM2,5 (diamètre de moins de 2,5 μm). Ces dernières sont plus dangereuses, car, après inhalation, elles peuvent atteindre la région alvéolaire et altérer les échanges gazeux à l'intérieur des poumons.
Les particules fines ont également des atteintes évidentes sur notre environnement bâti: dépôt de poussières, salissures...

Polluants organiques persistants (POPs)

Les polluants organiques persistants (POPs) sont des molécules définies par les propriétés suivantes :

- toxicité : elles présentent un ou plusieurs impacts nuisibles prouvés sur la santé humaine et l'environnement;
- persistance dans l'environnement : ce sont des molécules qui résistent aux dégradations biologiques naturelles;
- bioaccumulation : les molécules s'accumulent dans les tissus vivants et les concentrations augmentent donc le long de la chaîne alimentaire;
- transport longue distance : de par leurs propriétés de persistance et de bioaccumulation, ces molécules ont tendance à se déplacer sur de très longues distances et à se déposer loin des lieux d'émission, typiquement des milieux chauds (à forte activité humaine) vers les milieux froids (en particulier l'Arctique).

Ces polluants ont deux origines principales : la production de produits chimiques, en particulier celle des

33 Source: : [DEOUX 2006]

34 Source: [DEOUX 2006]

pesticides, des PCB et de l'hexachlorocyclohexane[35] et la production non intentionnelle, en particulier par combustion. Cette deuxième origine concerne principalement les dioxines, les furanes et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).
Les polluants organiques persistants (POPs) présentent des effets toxiques sur la santé humaine et sur la faune et sont associés à une vaste gamme d'effets nuisibles : dégradation du système immunitaire, effets sur la reproduction et sur le développement et propriétés cancérigènes.
De par leur nature persistante, ces molécules présentent potentiellement la particularité de provoquer des perturbations par une exposition chronique même à de faibles concentrations. En outre, de par leur propriété de bioaccumulation, les impacts sur la faune et la santé humaine peuvent être observés à proximité, mais aussi très loin des sources d'émission.

1.4. Valeurs guides de l'Organisation mondiale de la santé (OMS)

Les lignes directrices de l'OMS concernant la qualité de l'air constituent l'évaluation la plus largement reconnue et la plus à jour en matière d'effet de la pollution de l'air sur la santé.
Ces lignes directrices préconisent des objectifs de qualité de l'air qui permettraient de réduire fortement les risques sanitaires.
Les lignes directives « OMS 2005 »[36] concernant la qualité de l'air sont conçues pour donner des orientations mondiales et réduire les conséquences de cette pollution sur la santé. Ces directives parues pour la première fois en 1987 puis actualisées en 1997 concernaient uniquement l'Europe.
Les nouvelles directives (2005) s'appliquent au monde entier et se fondent sur l'évaluation des données scientifiques actuelles par des experts. Les concentrations limites recommandées ont été révisées pour un certain nombre de polluants: particules en suspension, ozone (O3), dioxyde d'azote (NO2) et dioxyde de soufre (SO2), et concernent toutes les régions du monde.

Observations fondamentales des lignes directrices de 2005[37]

On peut établir une relation quantitative entre le niveau de pollution et certains critères sanitaires (augmentation de la mortalité ou de la morbidité). On obtient ainsi des indications précieuses sur les progrès de la santé auxquels on peut s'attendre si l'on réduit la pollution de l'air.
Même à des concentrations relativement faibles, on a associé les polluants atmosphériques à divers effets nuisibles sur la santé.
La mauvaise qualité de l'air à l'intérieur des locaux pourrait constituer un risque sanitaire pour plus de la moitié de la population mondiale. Dans les domiciles utilisant des biocombustibles ou du charbon pour la cuisine et le chauffage, les teneurs en particules peuvent être de 10 à 50 fois supérieures aux valeurs indiquées par la directive.
Actuellement, les particules en suspension (ou matières particulaires) et l'ozone constituent un risque sanitaire grave dans de nombreuses villes des pays développés et en développement.

Valeurs limites guides OMS / Europe

Une valeur limite est définie, par polluant, comme le *niveau maximal de concentration de ce polluant dans l'atmosphère, fixé dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs de ces substances pour la santé humaine et/ou l'environnement.*
Une valeur cible est définie, par polluant, comme un *niveau de pollution fixé dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine et/ou l'environnement dans son ensemble, à atteindre dans la mesure du possible sur une période donnée*.
Un seuil d'alerte est défini comme *un niveau de pollution au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine ou de dégradation de l'environnement et à partir duquel des mesures d'urgence doivent être prises.*
Un seuil d'information est défini comme un *niveau de pollution atmosphérique qui a des effets limités et transitoires sur la santé en cas d'exposition de courte durée et à partir duquel une information de la population est susceptible d'être diffusée*[38]

- Ammoniac
  Il n'y a pas de valeur limite dans l'air ambiant extérieur pour l'ammoniac .
  La zone du seuil olfactif de l'ammoniac va de 350 à 3500 $\mu g/m^3$ selon la perception moyenne des odeurs par chaque individu.
- Composés organiques volatils

35 Hexachlorocyclohexane : « L'hexachlorocyclohexane ou HCH (C6H6Cl6) est un composé chimique faisant partie de la famille des organochlores. Il existe sept isomères de cette substance: l'alpha, le beta, le gamma, le delta, le lambda, l'epsilon et le nu hexachlorocyclohexane. Les trois derniers sont obtenus à l'état de traces lors de la synthèse du lindane (c'est-à-dire le produit dans lequel l'isomère gamma du HCH représente au moins 99%). Le HCH se présente sous l'aspect d'un solide blanc cristallin qui se dégage dans l'air par des vapeurs incolores avec une légère odeur de moisissures (ATSDR, 2005a). Seul le lindane est utilisé pour ses propriétés insecticides, les autres isomères sont dits « inactifs ». En agriculture, le lindane est utilisé contre les organismes suceurs et rongeurs; il est également employé pour ses propriétés antiparasitaires dans les mesures d'hygiène humaine et vétérinaire (PARNA, 2006). » Source http://rsde.ineris.fr

36 Source: [OMS 2005a]

37 Source: http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/fr/index.html

38 Source: http://eur-lex.europa.eu

Tableau B5.01 : Pictogrammes devant être étiquetés sur les produits chimiques

Pictogrammes	Dangers qu'ils représentent
	Produit pouvant exploser suivant le cas, au contact d'une flamme, d'une étincelle, d'électricité statique, sous l'effet de la chaleur, d'un choc, de frottements...
	Produit pouvant s'enflammer suivant le cas, au contact d'une flamme, d'électricité statique, sous l'effet de la chaleur, au contact de l'air, au contact de la peau (s'il dégage des gaz inflammables)
	Produit pouvant provoquer ou aggraver un incendie, ou même une explosion s'il est en présence de produits inflammables = produit comburant
	Gaz sous pression contenus dans un récipient. Certains gaz peuvent exploser sous l'effet de la chaleur. Les gaz liquéfiés réfrigérés peuvent être responsables de brûlures ou blessures liées au froid

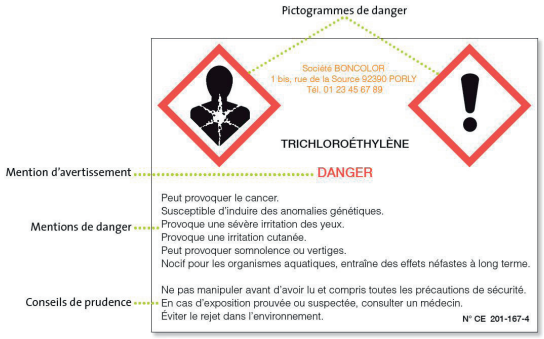


Illustration B5.01 : Description des étiquettes de produits chimiques - Source: Etiquette de produits chimiques, dossier INRS

Pictogrammes	Dangers qu'ils représentent
	Produit corrosif suivant les cas: - peut attaquer ou détruire les métaux; - ronge la peau et/ou les yeux en cas de contact ou projection
	Produits cancérogènes, produits mutagènes (modifient l'ADN), produits toxiques pour la reproduction, produits modifiant le fonctionnement de certains organes, produits pouvant affecter gravement les poumons et/ou être mortels en pénétrant les voies respiratoires, produits pouvant provoquer des allergies respiratoires
	Produit empoisonnant rapidement, même à faible dose. Peut provoquer des effets très variés sur l'organisme: nausées, vomissements, maux de tête ou d'autres troubles plus importants entraînant la mort.
	Produit pouvant avoir les effets suivants: empoisonnement à forte dose, irritant pour les yeux, la peau ou les voies respiratoires, peut provoquer des allergies cutanées et peut provoquer une somnolence ou des vertiges
	Produit provoquant des effets néfastes sur les organismes du milieu aquatique.

Source: Etiquettes de produits chimiques, dossier INRS

voir point 3.3.

- Dioxyde d'azote (NO_2)
  OMS:
  40 μg/m^3 moyenne annuelle
  200 μg/m^3 moyenne horaire
  Europe (seuils 2010):
  40 μg/m^3 moyenne annuelle
  200 μg/m^3 moyenne horaire
  seuil d'alerte: 400 μg/m3 moyenne horaire

- Dioxyde de soufre (SO_2)
  OMS:
  20 μg/m^3 moyenne sur 24 heures
  500 μg/m^3 moyenne sur 10 minutes
  Europe (seuils 2010):
  125 μg/m^3 moyenne sur 24 heures
  350 μg/m^3 moyenne horaire
  seuil d'alerte: 500 μg/m^3 moyenne horaire

- Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
  Aucune valeur n'est proposée

- Métaux lourds
  OMS:
  Plomb (Pb)
  0.5 μg/m^3 moyenne annuelle
  Europe (seuils 2010):
  Plomb (Pb)
  0.5 μg/m^3 moyenne annuelle
  Arsenic (As)
  valeur cible : 6 ng/m^3 moyenne annuelle
  Cadmium (Cd)
  valeur cible : 5 ng/m^3 moyenne annuelle
  Nickel (Ni):
  valeur cible : 20 ng/m^3 moyenne annuelle

- Monoxyde de carbone

OMS:
10 000 μg/m^3 moyenne sur 8 heures
30 000 μg/m^3 moyenne horaire
Europe (seuils 2010):
10 000 μg/m^3 moyenne sur 8 heures

- Ozone (O_3)

OMS :
100 μg/m^3 moyenne sur 8 heures
La concentration limite recommandée auparavant, 120 mg/m3 (moyenne sur 8 heures), a été ramenée à 100 mg/m3 sur la base des liens concluants établis récemment entre la mortalité quotidienne et des concentrations en ozone inférieures à 120 μg/m3.
Europe:
120 μg/m3 moyenne sur 8 heures
seuil d'information: 180 μg/m3 moyenne sur 1 heure
seuil d'alerte: 240 μg/m3 moyenne sur 1 heure

- Particules fines et très fines

OMS:
Particules très fines (PM2.5)
10 μg/m^3 moyenne annuelle
25 μg/m^3 moyenne sur 24 heures
Particules fines (PM10)
20 μg/m^3 moyenne annuelle
50 μg/m^3 moyenne sur 24 heures
Europe (seuils 2010):
Particules très fines (PM2.5)
25 μg/m^3 moyenne annuelle
Particules fines (PM10)
40 μg/m^3 moyenne annuelle
50 μg/m^3 moyenne sur 24 heures

2. Fabrication et mise en œuvre: produits toxiques et substances nocives

Certains produits de construction, dont principalement les matériaux de second-œuvre et de finition, sont de plus en plus complexes et associent de nombreux composants et additifs issus de la chimie et/ou de la pétrochimie.
Ces substances chimiques passent encore souvent inaperçues bien qu'elles soient omniprésentes dans notre quotidien et dans l'industrie de la construction et qu'elles aient des effets avérés sur notre santé et sur l'environnement.
Ces substances chimiques sont présentes dans tous les secteurs d'activité.
Elles sont utilisées de façon délibérée en tant que substances (pures) ou plus fréquemment en tant que mélanges: synthèse industrielle, analyse en laboratoire, traitement de surface, dépotage, dégraissage, nettoyage… Elles peuvent également être émises par une activité ou un procédé (combustion, dégradation…) sous forme de poussières, fumées, vapeurs, gaz ou brouillards.
Les secteurs d'activité qui exposent le plus leurs salariés aux produits chimiques sont les services à la personne, **la métallurgie, les activités de transformation des métaux, la construction, l'industrie des produits minéraux,** le commerce, la réparation automobile et la chimie. Parmi les produits chimiques les plus fréquemment utilisés, on relève les solvants et les tensioactifs (détergents, savons, shampoings)[39].

Les produits chimiques qui entrent en contact avec le corps humain par les voies respiratoires, la peau ou la bouche peuvent perturber le fonctionnement de l'organisme. Ils peuvent notamment provoquer, d'une part, des intoxications aiguës avec des effets plus ou moins graves et, d'autre part, des intoxications chroniques : le contact répété avec certains agents chimiques, même à de faibles doses, peut alors porter atteinte aux poumons, aux nerfs, au cerveau, aux reins…

39 Source: http://www.inrs.fr/accueil/risques/chimiques.html

Les produits chimiques sont, en outre, parfois à l'origine d'incendies et d'explosions et peuvent avoir des répercussions au-delà de l'entreprise sur l'environnement, en cas entre autres de dysfonctionnements (renversement ou déversement accidentel, rupture de confinement, fuite…).

Repérer ces produits, les mélanges ou les procédés chimiques dangereux et connaître leurs effets, c'est la première étape pour mettre en œuvre des moyens de prévention adaptés et ainsi limiter leurs effets sur la santé. En effet, la prévention des risques chimiques repose notamment sur une identification des produits dangereux présents dans l'entreprise, quelle que soit son activité, et sur une évaluation des risques exhaustive et rigoureuse.

2.1. Les règlements REACH[40] et CLP[41]

Règlement REACH

La prévention des risques chimiques, en particulier les risques pour la santé en milieu de travail, passe par une connaissance suffisante des propriétés et des utilisations des substances et par une approche cohérente et systématique d'évaluation des risques de ces substances.
C'est principalement pour répondre à cet objectif que la Commission européenne a proposé en octobre 2003 et mis en place en 2006 un nouveau dispositif réglementaire, baptisé REACH, un système intégré d'enregistrement, d'évaluation, d'autorisation et de restriction des substances chimiques.
Ce faisant, une agence européenne des produits chimiques ECHA a été instituée pour gérer les procé-

40 Réglementation REACH: règlement (CE) N° 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil du 18 décembre 2006
41 Règlement CLP: regulation (EC) n°1272/2008 : Classification, Labelling and Packaging of substances and mixtures,

dures d'enregistrement, d'évaluation, d'autorisation et de restriction relatives aux substances chimiques, afin d'assurer la cohérence au niveau de l'Union européenne.
Le règlement est entré en vigueur le 1er juin 2007. Il rationalise et améliore l'ancien cadre réglementaire de l'Union européenne (UE) sur les produits chimiques.
Les principaux objectifs de REACH sont d'assurer un niveau élevé de protection de la santé humaine et de l'environnement contre les risques que peuvent poser les produits chimiques, de promouvoir des méthodes d'essai alternatives, d'encourager la libre circulation des substances au sein du marché intérieur et de renforcer la compétitivité et l'innovation.
Le règlement européen REACH oblige les entreprises qui fabriquent et importent des substances chimiques à évaluer les risques résultant de leur utilisation et à prendre les mesures nécessaires pour gérer tout risque identifié. La charge de la preuve de la sécurité des substances chimiques fabriquées ou commercialisées appartient à l'industrie.
REACH fait porter à l'industrie la responsabilité d'évaluer et de gérer les risques posés par les produits chimiques et de fournir des informations de sécurité adéquates à leurs utilisateurs. En parallèle, l'Union européenne peut prendre des mesures supplémentaires concernant des substances extrêmement dangereuses, quand une action complémentaire au niveau européen se révèle nécessaire.
La liste des substances devant être enregistrées est accessible sur le site internet de l'ECHA[42] (http://echa.europa.eu/chem_data/authorisation_process/candidate_list_table_en.asp).

Règlement CLP

La plupart des composés chimiques, quelle que soit leur nature, doivent être identifiés avant d'être mis sur le marché européen.
Certaines substances dangereuses font depuis quelques années l'objet d'une classification et d'un étiquetage harmonisés.
Le 20 janvier 2009 est entré en vigueur le Règlement (CE) N° 1272/200 822[43] du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2008 relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges, modifiant et abrogeant les directives 67/548/CEE et 1999/45/CE et modifiant le règlement (CE) N° 1907/2006.
Ce règlement, appelé couramment CLP, met en œuvre au niveau européen le Système Général Harmonisé (SGH) de classification et d'étiquetage des produits chimiques (SGH) établi au niveau mondial.
Le Tableau 3.1.23 de l'Annexe VI au Règlement CLP est une liste de classification et d'étiquetage harmonisés pour certaines substances ou groupes de substances, en conformité avec les critères du SGH mis en œuvre au sein de l'UE.
Depuis le 1er décembre 2010, toutes les substances doivent être classées et étiquetées en conformité avec le Règlement CLP et le Tableau 3.1.
Le 1er juin 2015, cette obligation s'appliquera également aux mélanges.
À chaque substance dangereuse, identifiée de manière univoque par ses numéros « CAS[44]» ou « EC[45]», est associée:

- une ou plusieurs mentions de danger correspondant aux risques pour l'environnement et la santé;
- une indication sur l'étiquetage à adopter;
- des valeurs limites de concentration de la substance dans des mélanges.

Les mentions de danger[46] sont les informations les plus précises dont on dispose sur l'impact de chaque produit. Les mentions associées aux dangers pour la santé portent un code sous la forme « H3xx », celles associées à l'environnement « H4xx ». Elles sont regroupées en classes de dangers qui sont chacune signalées par un pictogramme selon le SGH.
Dans l'Annexe I du Règlement CLP, la procédure pour déterminer la classification et l'étiquetage associés à chaque substance ou mélange est détaillée. Il existe des valeurs de concentration minimale au-delà desquelles la présence d'une substance dangereuse dans un mélange doit être prise en compte.
Pour chaque classe de danger, une formule existe pour déterminer le risque résultant de la présence de plusieurs composés.
Les mentions de danger concernant la santé sont re-

42 ECHA : Agence européenne des produits chimiques

43 Règlement en français : http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32008R1272:FR:NOT. Voir aussi pour la version .doc en anglais : http://echa.europa.eu/legislation/classification_legislation_en.asp

44 CAS (Chemical Abstracts Service) is a division of the American Chemical Society. CAS Registry Numbers are unique identifiers for chemical substances. A CAS Registry Number itself has no inherent chemical significance but provides an unambiguous way to identify a chemical substance or molecular structure when there are many possible systematic, generic, proprietary, or trivial names. Source : http://cas.org

45 Numéro EC : soit numéro EINECS (European Inventory of Existing Commercial chemical Substances) avant 1981, soit numéro ELINCS (European List of Notified Chemical Substances) à partir de 1981.

46 Hazard Statements ou « Phrases H »



Illustration B5.02 : Marquage CE - description

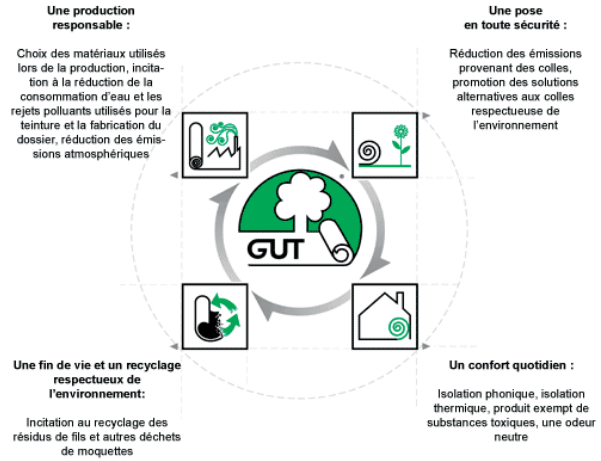


Illustration B5.03 : Label GUT - critères

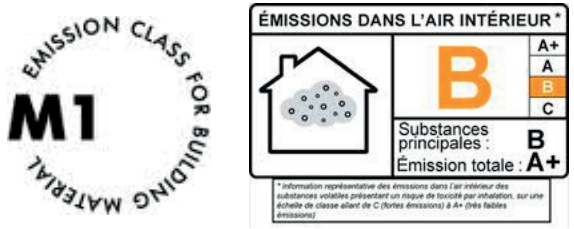


Illustration B5.04 : Label M1 et étiquetage AFSSET

groupées en différentes classes[47] :

- 3.1. Toxicité aiguë – orale
- 3.1. Toxicité aiguë – cutanée
- 3.1. Toxicité aiguë – inhalation
- 3.2. Corrosion/irritation cutanée
- 3.3. Lésions oculaires graves / irritation oculaire
- 3.4. Sensibilisation – cutanée
- 3.4. Sensibilisation – respiratoire
- 3.5. Mutagénicité sur les cellules germinales
- 3.6. Cancérogénicité
- 3.7. Toxicité pour la reproduction
- 3.8.Toxicité pour les organes cibles – exposition unique
- 3.9. Toxicité pour les organes cibles – expositions répétées
- 3.10. Danger par aspiration

Au sein de chacune de ces classes de danger, différents niveau de danger existent. Ces niveaux de danger sont représentés par un code et un symbole de danger spécifiques. Pour chaque classe de danger, il faudra définir des exigences minimales, en veillant à tenir compte de la concentration de chaque produit dans le matériau final et des éventuels mélanges de produits.

L'information dont nous disposons à ce jour est encore largement incomplète. En effet, la dernière mise à jour du Tableau 3.1, au 18 juin 2010, comptait 4136 entrées. Au 3 janvier 2011, deadline pour la remise des notifications de substances dans le cadre du CLP, l'ECHA avait reçu des notifications concernant 24 529 substances. Il faudra donc attendre quelques mois pour analyser plus finement toute une série de substances.

Le Règlement CLP oblige néanmoins les fabricants à informer leurs clients de la nouvelle classification et du nouvel étiquetage des substances par le biais des Fiches de Données de Sécurité. Celles-ci contiennent notamment des informations sur les précautions à prendre lors de l'utilisation des substances.

2.2. Étiquetage européen des produits chimiques

Le règlement CLP impose également le cadre réglementaire pour la classification, l'emballage et l'étiquetage des substances et préparations chimiques dangereuses. Il a pour objectif d'assurer la protection des personnes (qui peuvent entrer en contact avec elles) et celle de l'environnement.

La classification permet d'identifier les dangers que peuvent présenter les produits chimiques du fait de leurs propriétés physico-chimiques, de leurs effets sur la santé et sur l'environnement.

L'étiquetage est la première information, essentielle et concise, fournie à l'utilisateur sur les dangers sur la santé et sur l'environnement et sur les précautions à prendre lors de l'utilisation des produits chimiques.

Un exemple d'étiquette est présenté par la figure B5.01 ci-après et le tableau B5.01 reprend l'ensemble des pictogrammes et leur signification.

2.3. Le problème des fibres[48]

Les fibres sont des polluants physiques émis par un matériau. Dans le cas de matériaux isolants, le problème des fibres est bien présent, surtout dans la phase de mise en œuvre où les ouvriers sont en contact direct avec le matériau.

En hygiène et sécurité, le terme « fibre » désigne une particule allongée dont la longueur est au moins trois fois supérieure au diamètre.

Les fibres qui peuvent être inhalées et se déposer dans le poumon profond (jusqu'aux alvéoles pulmonaires) sont celles ayant un diamètre inférieur à 3.5 μm, c'est-à-dire moins du dixième de l'épaisseur d'un cheveu.

En règle générale, plus les fibres sont fines et longues, plus elles sont dangereuses pour la santé, car elles pénètrent profondément dans l'organisme via les voies respiratoires et sont difficiles à éliminer.

La dangerosité des fibres dépend aussi d'autres carac-

47 Source: [AUBECQ 2011]

48 Source: [AUBECQ 2011]

téristiques comme leur composition chimique, leurs dimensions, leurs propriétés de surface, leur biopersistance, etc.
Les conséquences de l'absorption de fibres pour la santé peuvent aller d'une irritation de la peau et des muqueuses à des réactions inflammatoires au niveau des bronches et des alvéoles, et des fibroses pulmonaires ou pleurales. À long terme, l'exposition à des fibres peut même être source de cancers au niveau du poumon et de la plèvre.
L'évaluation des risques pour chaque type de fibres est cependant difficile à effectuer en raison du peu de données toxicologiques et granulométriques disponibles.
On classe les fibres en deux grandes catégories : les fibres organiques et les fibres inorganiques. Dans les deux groupes, on trouve des fibres naturelles et des fibres synthétiques.
Au niveau des matériaux de construction et plus particulièrement des matériaux d'isolation, on trouve potentiellement des fibres dans chaque catégorie :

- fibres inorganiques naturelles : amiante[49] ;
- fibres inorganiques synthétiques : laine de verre, laine de roche, laine de laitier ;
- fibres organiques naturelles : cellulose, coton, lin, chanvre, laine ;
- fibres organiques synthétiques : polyester.

Les fibres inorganiques synthétiques sont conventionnellement classées entre les fibres siliceuses et non siliceuses. Parmi les fibres siliceuses, dont le principal constituant est la silice – SiO_2 –, on distingue les « fibres minérales artificielles » – FMA – dans lesquelles sont classées les laines minérales, les fibres céramiques réfractaires, les fibres à usage spécial et les filaments continus.

Le Tableau 3.1. de l'Annexe VI du Règlement CLP indique à ce jour des mentions de danger spécifiques pour trois familles de fibres :

- les laines minérales[50], à l'exception de celles spécifiées ailleurs dans cette Annexe, sont classées H351 Cancérogénicité, catégorie 2 : Susceptible de provoquer le cancer ;
- les fibres céramiques réfractaires et les fibres à usage spécial[51], à l'exception de celles spécifiées ailleurs dans cette Annexe, sont classées H350i Cancérogénicité, catégorie 1B « peut provoquer le cancer ».

Dans les deux cas, il y a exonération du classement si les fibres sont non biopersistantes.
Une étude[52] sur les FMA publiée en 2008 par l'Afsset dresse un état de la recherche en matière de santé concernant l'ensemble de ces fibres. Il en ressort que les données d'exposition sont incomplètes et ne permettent pas encore de tenir compte notamment de la phase de retrait où le danger est a priori plus grand. L'étude recommande un approfondissement des connaissances sur les FMA et des mesures de précaution pour limiter les risques d'exposition.
Les fibres organiques naturelles comme le coton, le lin, le chanvre et la laine de mouton ont en général des dimensions trop importantes pour être inhalées et ne présentent donc pas de danger pour les organes respiratoires. Elles peuvent cependant être irritantes par contact avec la peau.
On ne dispose cependant pas de données toxicologiques concernant l'exposition à ces fibres.

En ce qui concerne la cellulose[53], la situation est différente, car la dimension des fibres est beaucoup plus petite et pourrait donc présenter un danger. Peu d'études toxicologiques ont été réalisées à ce jour.
Réalisées principalement dans le secteur de la fabrication de papier, elles mettent en évidence des signes d'irritation du nez, de la gorge et des yeux, ainsi qu'une plus forte occurrence de toux, bronchite chronique et asthme.
Les fibres organiques synthétiques utilisées dans les matériaux isolants sont représentées principalement par le polyester, utilisé comme liant de plusieurs isolants à base de fibres organiques naturelles. Dans les matériaux à base de fibres textiles recyclées, il arrive de trouver également des fibres d'acrylique.
Les études consacrées aux impacts sur la santé des fibres organiques synthétiques ont surtout pointé du doigt les aramides, qui n'entrent pas dans la composition d'isolants.
Pour l'ensemble des fibres artificielles – minérales ou organiques – utilisées dans la construction, étant donné le peu d'informations disponibles quant à leur toxicité, l'INRS[54] recommande une grande vigilance et la mise en place de protections adaptées pour les travailleurs exposés.
Concernant les fibres de cellulose, il est essentiel de limiter au maximum la propagation dans l'air des fibres, en utilisant des techniques automatisées, en captant les poussières à la source, en utilisant des outils de découpe manuels, sinon en travaillant par voie humide, etc.
Lors de la vie en œuvre, aucune étude n'a montré le danger d'inhalation des fibres, quelles qu'elles soient. Celui-ci est concentré sur les phases de mise en œuvre et de démontage.

49 Amiante: son utilisation est interdite pour raison sanitaire, en Belgique et dans toute l'Union européenne, depuis le 1er janvier 2005; nous n'entrerons donc pas dans les détails

50 Fibres vitreuses (silicates) artificielles à orientation aléatoire avec un contenu en oxydes alcalins et oxydes alcalinoterreux (Na2O+K2O+CaO+MgO+BaO) supérieur à 18% du poids

51 fibres vitreuses (silicates) artificielles à orientation aléatoire avec un contenu en oxydes alcalins et oxydes alcalinoterreux (Na2O+K2O+CaO+MgO+BaO) inférieur ou égal à 18% du poids

52 Source: [AFSSET 2008]

53 Source: [INRS], fiche sur la cellulose

54 INRS: Institut National de Recherche et de Sécurité - www.inrs.fr

3. Vie en œuvre des matériaux et émissions dans l'air intérieur

Avec un décalage de plusieurs dizaines d'années par la rapport à la performance énergétique des bâtiments, la qualité de l'air intérieur devient aujourd'hui une préoccupation cruciale du secteur de la construction en termes de confort intérieur : le respect du bien-être et de la santé, avec la prise en compte des risques non seulement pour les occupants, mais également pour tous ceux qui prendront part au processus de construction.
Le respect des nouvelles normes de performance énergétique des bâtiments engendre parfois un phénomène de surisolation/étanchéité, accompagné d'une absence de ventilation efficace, phénomène propice au confinement et à la concentration de polluants, au développement de bactéries et de champignons responsables d'une mauvaise qualité de l'air.
Mais ce problème de manque de ventilation efficace n'est pas seul responsable de la mauvaise qualité de nos environnements intérieurs.
En effet, nous passons 85 % de notre temps dans des environnements « clos » dans lesquels nous sommes exposés à de multiples polluants, qu'ils soient chimiques ou physiques. Ces substances trouvent leur origine dans les matériaux qui composent le bâtiment et essentiellement les revêtements de sol, de mur et de plafond, mais également dans le mobilier, les équipements et les produits d'entretien et d'hygiène.
Les polluants émis par ces différentes sources peuvent dégrader la qualité de l'air intérieur que nous respirons et ainsi avoir des effets négatifs sur le bien-être (odeurs indésirables) et sur la santé (allergies, irritation des yeux et de la gorge, maux de tête, etc.).
En outre, ces émissions peuvent être amplifiées par une mise en œuvre de mauvaise qualité et par le type d'ambiance ou de climat auquel nous sommes confrontés : ensoleillement, température, humidité, etc.

Il est également important de souligner que la qualité de l'air intérieur dépend aussi en grande partie du comportement de l'occupant: mode de vie, présence d'animaux ou de plantes, présence de fumeurs... S'il est souhaitable que l'architecte par un choix adapté et responsable des matériaux de construction puisse améliorer la qualité de l'air, il n'est pas le seul acteur à pouvoir agir.

3.1. Cadre réglementaire

Europe

La réglementation européenne en matière de qualité de l'air s'est focalisée essentiellement sur l'air extérieur, en imposant des limites d'émissions de polluants à l'industrie, au trafic routier et aux installations de production d'énergie.
Depuis moins de 10 ans seulement, les réglementations européennes font référence à la qualité de l'air intérieur: c'est le cas de la directive REACH (2006/121/EC), la directive produits de consommation GPSD (2001/95/EC), la directive produits de construction CPD (89/106/EC) ou encore la directive performance énergétique des bâtiments EPBD (2002/91/EC).

Depuis 1987, la qualité de l'air intérieur en Europe a été largement étudiée par l'ECA (European Concerted Action) « Indoor air quality and its impact on man », renommée en 1999 « Indoor air, human exposure and urban environment ».
En 2002, la DG SANCO a financé le projet INDEX, coordonné par l'unité IHCP du centre commun de recherche européen (JRC), à travers lequel, pour la première fois en Europe, les scientifiques ont évalué les polluants chimiques de l'air intérieur pour lesquels des données toxicologiques d'exposition existaient.
Ce projet a proposé des recommandations en matière de réglementation sur une courte liste de composés d'intérêt : formaldéhyde, benzène, azote, monoxyde de carbone et naphtalène.

Fin 2010, l'Organisation mondiale de la santé a publié des valeurs guides pour la qualité de l'air intérieur (Indoor Air Quality Guidelines). Les polluants visés sont le benzène, le monoxyde de carbone, le formaldéhyde, le naphtalène, le dioxyde de soufre, les hydrocarbures polycycliques aromatiques, le radon, le trichloroéthylène et le tétrachloroéthylène.

La directive européenne « Produits de Construction »

À ce jour, les matériaux de construction sont évalués au niveau européen et belge pour leurs propriétés d'aptitude à l'usage dans le cadre de la Directive Produits de Construction 89/106/CEE3 modifiée.
Cela se traduit par le marquage CE réglementaire des produits. Ce marquage atteste que les produits satisfont aux dispositions de la réglementation européenne et qu'ils présentent des caractéristiques telles qu'ils permettent aux ouvrages, dans lesquels ils seront incorporés, de respecter six exigences essentielles :
- la résistance mécanique et la stabilité;
- la sécurité en cas d'incendie;
- l'hygiène, la santé et l'environnement;
- la sécurité d'utilisation;
- la protection contre le bruit;
- l'économie d'énergie et l'isolation thermique.

Les dispositions réglementaires du marquage CE relatives à l'exigence « hygiène, santé et environnement » sont actuellement très peu nombreuses.
On peut par exemple citer le phénomène de dégagement de formaldéhyde. Lorsque le produit contient du formaldéhyde, celui-ci doit être testé et classé selon deux classes d'émission de formaldéhyde, E1 ou E2. Cette exigence d'essai se retrouve ainsi dans la norme de mise en conformité au marquage CE de certaines familles de produits : panneaux à base de bois (EN 13 986), revêtements de sols résilients, textiles et stratifiés (EN 14 041), bois lamellé collé (EN 14 080), planchers et parquets en bois (EN 14 342), etc.

Des travaux de normalisation ont été lancés en 2005 au Comité européen de Normalisation (CEN). Ainsi, le comité technique TC351 (Produits de construction : évaluation du relargage de substances dangereuses) a été chargé de développer des normes d'essais horizontales concernant l'ensemble des produits de construction et permettant de caractériser le relargage de substances dangereuses par les produits de construction, d'une part dans l'air intérieur et d'autre part dans les eaux de surface et le sol. Ces travaux sont supposés aboutir en 2012 et se basent sur la série des normes ISO 16000 pour l'évaluation des émissions.

Labels

Par ailleurs, depuis les années 1990, des systèmes de labellisation pour les matériaux de construction, intégrant des exigences en termes de qualité de l'air intérieur, ont été développés dans certains pays européens:

- classification M1[55] (Finlande);
- Indoor Air Climate Label ICL[56] (Danemark);
- GUT[57]/EMICODE/Blauer Engel[58]/AgBB (Allemagne);
- protocole AFSSET (France).

Ces labels sont basés principalement sur des limites d'émissions en composés volatils.
La plupart de ces labels ont été initiés et mis en place par des fédérations professionnelles sur une démarche volontaire.
En Belgique, un plan d'action environnemental a vu le jour et est à l'origine du projet « HEMICPD » visant également à établir un système de labellisation national.

55 http://www.rakennustieto.fi/index/english/emissionclassificationofbuildingmaterials.html
56 http://www.teknologisk.dk/ydelser/253
57 http://www.gut-ev.org/fr
58 www.blauer-engel.de

En parallèle, pour les produits de décoration et de consommation, des labels écologiques, basés sur des exigences en matière de composition en composés organiques volatils (teneurs globales) sont proposés. Entre autres, nous pouvons citer l'écolabel européen, le label allemand Blauer Engel et le label scandinave Nordic Swann.

Face à cette prolifération de systèmes de labellisation, des travaux sur l'harmonisation européenne des protocoles de qualification des matériaux de construction ont été initiés fin 2008 et sont coordonnés par le Joint Research Centre (JRC - Ispra). Un processus de labellisation pourrait être mis en place sur la base de ce protocole harmonisé au niveau européen.

Les critères proposés par ces labels pour qualifier les émissions des matériaux de construction et de décoration sont les suivants :

- la concentration en composés organiques volatils totaux (COVT) qui constitue un premier niveau de caractérisation des émissions en COV d'un produit dans une approche globale. Néanmoins, il ne repose pas sur des considérations sanitaires ; il doit être accompagné d'une analyse plus fine des composés individuels;
- l'émission de substances préoccupantes pour l'homme, notamment pour celles classées cancérogènes et/ou mutagènes de catégorie 1 et 2 par l'Union européenne;
- les niveaux d'émission des composés individuels comparativement à une concentration de référence.

L'objectif de ces procédures de qualification des émissions des produits de construction et de décoration par comparaison à des concentrations limites est d'apporter des informations sur ces produits, en vue de promouvoir les produits considérés « faiblement émissifs ». Il s'agit bien de proposer une procédure de qualification des émissions des matériaux de construction et de décoration, et non de réaliser une évaluation des risques sanitaires liés à ces émissions.
En effet un protocole de qualification est un outil d'aide à la gestion qui se doit d'être facile à mettre en œuvre pour qu'il soit applicable. Il doit également tenir compte de l'ensemble des substances, considérées comme COV et comme composés carbonylés, même si pour certaines d'entre elles les informations toxicologiques sont limitées.
Il n'est en effet pas possible aujourd'hui, en l'état actuel des connaissances, de décrire précisément les effets sur la santé de tous les COV. Par ailleurs, si les effets de certains COV étudiés individuellement sont connus, leurs effets combinés dans le cas d'une exposition simultanée restent souvent méconnus.
Les principaux effets sur la santé humaine décrits pour ces substances peuvent aller des irritations de la peau (exemple du toluène), des muqueuses ou du tractus respiratoire, des nausées, des céphalées, jusqu'à des cancers (exemple du benzène).

Le label AgBB est le label le plus reconnu en Europe; il a servi de modèle pour l'établissement du protocole d'essai français et sert aujourd'hui de base aux travaux d'harmonisation qui se déroulent via le JRC au niveau européen.
Ce label, établi initialement pour évaluer les émissions des revêtements de sol PVC, vise à simuler des conditions normalisées d'utilisation d'un matériau donné.
Pour ce faire, ce schéma de labellisation s'appuie sur les normes ISO 16000 existantes. Une fois le matériau conditionné dans une chambre d'essai d'émission, des prélèvements de l'air intérieur de l'enceinte de test sont effectués à 3 et 28 jours après le début de l'essai. Les concentrations en composés émis sont déterminées et comparées à des valeurs limites propres au label (valeurs NIK). Plusieurs critères coexistent pour définir

la non-dangerosité d'un matériau, parmi lesquels la somme des ratios entre les concentrations des composés analysés et leur valeur limite respective.
Bien que le protocole d'essai français établi par l'AFSSET/ANSES respecte les mêmes temps d'échantillonnage, les valeurs limites à respecter varient fortement pour certains composés. C'est par exemple le cas du formaldéhyde pour lequel il n'existe pas encore de valeur guide en Allemagne et dont la valeur limite a été fixée à 10 $\mu g/m^3$ en France. Notons que le JRC a créé un groupe d'experts pour l'harmonisation des valeurs guides en Europe.

Étiquetage français « AFSSET » pour les produits de construction[59]

Depuis 2009, la France a mis en place un système d'étiquetage obligatoire pour les produits de construction et de décoration basé sur un protocole d'évaluation développé par l'Agence française de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail AFSSET/ANSES. Cet étiquetage propose une classification des produits en fonction de leur niveau d'émission et porte sur 11 composés chimiques:
- formaldéhyde – numéro CAS 50-00-0 ;
- acétaldéhyde – numéro CAS 75-07-0 ;
- toluène – numéro CAS 108-88-3 ;
- tétrachloroéthylène – numéro CAS 127-18-4 ;
- xylène – numéro CAS 1330-20-7 ;
- 1,2,4-triméthylbenzène – numéro CAS 95-63-6 ;
- 1,4-dichlorobenzène – numéro CAS 106-46-7 ;
- éthylbenzène – numéro CAS 100-41-4 ;
- 2-butoxyéthanol – numéro CAS 111-76-2 ;
- styrène – numéro CAS 100-42-5 ;
- les composés organiques volatils totaux[60] – COVT
- les particules
- le radon.

Cet étiquetage sera obligatoire dès janvier 2012 pour les matériaux de construction et de décoration.

3.2. Les polluants intérieurs et leur impact sur la santé

Nous présenterons ci-après quelques polluants intérieurs et leur influence sur la santé.
En termes de polluants, il faut faire la distinction entre les polluants chimiques tels que le monoxyde de carbone, le benzène, les COV, etc., et les polluants physiques comme les fibres, les poussières, l'humidité... ainsi que les biocontaminants tels que les moisissures, les acariens...

Monoxyde de carbone

Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz incolore, inodore et insipide. C'est un sous-produit de combustion incomplète des matières fossiles dans les systèmes de production de chaleur ou dans les moyens de transport, essentiellement par suite d'une insuffisance d'oxygène.
Respirer du monoxyde carbone peut avoir des conséquences importantes sur la santé. En effet, le CO a tendance à se fixer sur l'hémoglobine du sang, conduisant à un manque d'oxygénation du système nerveux, du cœur et des vaisseaux sanguins.
On distingue deux types d'intoxication au CO :
- intoxications aiguës : toute personne qui respire une grande quantité de CO peut, après quelques minutes: ressentir des maux de tête, avoir des vertiges, avoir des nausées, vomir, tomber dans le coma, mourir.
- intoxication chronique : un grand nombre de personnes respirent chaque jour de faibles quantités de CO. Ces doses respirées ne sont pas mortelles, mais peuvent être responsables de symptômes assez vagues tels que : maux de tête, faiblesse, difficultés de concentration, lourdeurs d'estomac, etc.

L'exposition à des niveaux élevés de monoxyde de carbone provoque souvent des accidents mortels. À des niveaux moins élevés, elle entraîne une réduction de la capacité d'exercice physique et un risque accru de cardiopathie ischémique.
Le monoxyde de carbone a également des effets sur l'environnement: il participe notamment à la formation de l'ozone troposphérique.
Dans l'atmosphère, il se transforme en dioxyde de carbone (CO2) , contribuant ainsi au phénomène d'effet de serre.

Dioxyde de soufre

Voir point 1.3 « Les polluants atmosphériques et leurs impacts sur la santé ».

Benzène (C_6H_6)

Le benzène est un composé appartenant à la famille des Hydrocarbures Aromatiques Monocycliques(HAP), regroupant également le Toluène, Éthyl benzène, ortho, méta et para-Xylènes (BTEX).
Le benzène est une substance émise naturellement dans l'atmosphère par les volcans et les feux de forêts. Il est également présent dans les mélanges élaborés dans les raffineries de pétrole. Le trafic routier est le principal responsable des émissions de benzène en milieu urbain. Le benzène est également utilisé comme solvant que l'on retrouve principalement dans les peintures, les vernis, les vitrifiants, les colles, les mastics, les traitements du bois...
Le benzène est connu pour ses effets mutagènes et cancérigènes
Toxicité aiguë[61]
L'ingestion du benzène peut provoquer des troubles digestifs, des troubles neurologiques et une pneumopathie d'inhalation.
En application cutanée, le benzène est irritant.

59 http://www.afsset.fr
60 COVT: Les composés organiques volatils totaux sont l'ensemble des composés organiques volatils émis par le matériau.
61 Source: [INRS], fiche toxicologique du benzène

Toxicité chronique
L'inhalation du benzène provoque des troubles neuropsychiques : irritabilité, diminution des capacités d'attention et de mémorisation, troubles du sommeil, dépression... Des troubles digestifs peuvent également être observés.
En outre, des études par voies orale et inhalatoire montrent que le benzène est cancérogène chez l'animal.

Formaldéhyde
Le formaldéhyde est un des principaux Aldéhydes mesurés dans l'air intérieur comme l'Acétaldéhyde, l'Acroléine, le Propanal, le Butanal, le Benzaldéhyde, l'Isopentanal, le Pentanal et l'Hexanal.
Les Aldéhydes peuvent provenir de sources différentes, essentiellement dans l'air intérieur : panneaux de particules, panneaux de fibres, panneaux de bois brut, livres et magazines neufs, fumée de tabac
Le formaldéhyde est un composé organique volatil largement utilisé en construction: colles, résines, mousses isolantes en polyuréthanes, etc. ansi que dans la fabrication de certains textiles et désinfectants. Certaines laines minérales utilisent cette substance comme liant pour les fibres. On le trouve également en grande quantité dans la fumée de cigarette.
Le formaldéhyde peut provoquer une irritation des yeux, des voies respiratoires, des maux de tête, des troubles de concentration, des troubles du sommeil, des allergies et est considéré, à certaines concentrations, comme une substance cancérigène[62].

Naphtalène ($C_{10}H_8$)
Le naphtalène est principalement utilisé comme intermédiaire dans la fabrication de nombreux composés organiques, notamment certains colorants, les plastifiants pour bétons, les dispersants dans les caoutchoucs, certains solvants et les insecticides.
Les principaux problèmes sanitaires liés à l'exposition au naphtalène sont les lésions du système respiratoire, notamment les tumeurs des voies respiratoires supérieures.

Dioxyde d'azote (NO_2)
Voir point 1.3 « Les polluants atmosphériques et leurs impacts sur la santé »

Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)
Voir point 1.3 « Les polluants atmosphériques et leurs impacts sur la santé » - polluants organiques persistants (POP)

Radon
Le radon est un gaz radioactif provenant de la désintégration du radium, lui-même sous-produit de la chaîne de désintégration de l'uranium. L'uranium et le radium sont des matières présentes en quantité très différente selon la région et le type de roche.
La plus grande partie du radon qui est inhalée est aussitôt rejetée.
Cependant le 218Po, un produit de filiation du radon, est lui très réactif. Par attraction électrostatique, il s'agglomère aux particules très fines présentes dans l'air ambiant et lorsque ces particules sont inhalées, il se dépose sur les poumons en se désintégrant et en émettant des particules alpha et bêta qui se révèlent nocives. En endommageant la structure interne des cellules, voire en modifiant l'ADN, les risques de dégénérescence et de cancer sont bien réels. D'après certaines études de l'OMS, 6 à 15 % des cancers du poumon seraient dus à la présence de radon au sein de l'habitat.

Trichloroéthylène
Le trichloroéthylène est une substance classée comme cancérogène probable (C2) au niveau européen. Elle peut provoquer aussi des effets neurologiques. Elle est principalement utilisée dans un cadre professionnel (dégraissage des métaux) et émise par certains matériaux de construction et produits domestiques. Il existe également des sources extérieures (sols ou eaux souterraines) résultant de pollutions passées[63].

3.3. Recommandations et valeurs guides OMS / Afsset
L'OMS a publié des valeurs guides en vue de protéger la santé publique contre plusieurs substances chimiques généralement présentes dans l'air intérieur. Les substances considérées, à savoir le benzène, le monoxyde de carbone, le formaldéhyde, le naphtalène, le dioxyde d'azote, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (notamment le benzopyrène), le radon, le trichloréthylène et le tétrachloréthylène, proviennent de sources intérieures, sont connues pour leurs risques sanitaires, et sont souvent présentes à l'intérieur des bâtiments et des locaux à des niveaux de concentration dommageables pour la santé.
L'Afsett / Anses[64] a publié en 2010 de nouvelles valeurs guides pour 4 polluants de l'air intérieur. Celles-ci sont également reprises ci-dessous.

Benzène (C_6H_6)
OMS:
Le benzène est un carcinogène génotoxique chez l'homme, et aucun niveau sûr d'exposition ne peut être recommandé. L'exposition permanente aux concentrations de benzène telles que communément observées à l'intérieur des habitations des villes européennes provoque jusqu'à 10 cas supplémentaires de leucémie pour 100 000 habitants.

Dioxyde d'azote (NO_2)
OMS:
Une valeur guide annuelle moyenne de 40 $\mu g/m^3$ est

62 Depuis 2004, le formaldéhyde a été reconnu comme cancérigène pour l'homme (groupe 1) par l'IARC

63 Source: www.afsset.fr

64 ANSES: Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail - www.afsett.fr

recommandée pour le dioxyde d'azote dans les espaces intérieurs. Elle vise à réduire le risque de tout un ensemble de symptômes respiratoires liés à cette exposition.

Formaldéhyde

OMS:

Une valeur guide de 0,1 mg/m³ sur une durée de 30 minutes est recommandée pour éviter une irritation sensorielle dans la population générale. Cette valeur guide s'applique à toute période de 30 minutes et prévient également les effets d'une exposition à long terme sur les fonctions pulmonaires ou les risques de cancer du nasopharynx et de leucémie myéloïde.

Seul le formaldéhyde fait l'objet d'une valeur guide auprès de l'OMS. Les autres aldéhydes ne font pas l'objet de valeurs guides.

Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

OMS:

Le cancer du poumon est le risque le plus grave lié à l'exposition à ces substances dans l'air intérieur. Le benzopyrène constitue l'un des carcinogènes les plus actifs parmi les hydrocarbures aromatiques polycycliques connus. Aucun niveau sûr d'exposition ne peut être recommandé. L'exposition permanente aux concentrations d'hydrocarbures aromatiques polycycliques telles que communément observées dans les villes européennes et nord-américaines provoque jusqu'à 50 cas supplémentaires de cancer du poumon pour un million d'habitants. On estime que la fumée du tabac ou les sources de combustion insuffisamment ventilées dans les habitations augmentent très nettement les risques.

Monoxyde de carbone

OMS:

Une nouvelle valeur guide de 7 mg/m³ est fixée pour une concentration moyenne de monoxyde de carbone d'une durée de 24 heures afin de prévenir les effets d'une exposition chronique.

Naphtalène

OMS:

Les principaux problèmes sanitaires liés à l'exposition au naphtalène sont les lésions du système respiratoire, notamment les tumeurs des voies respiratoires supérieures. Une valeur guide de 0,01 mg/m³ est fixée comme moyenne annuelle afin de prévenir ces risques.

AFSSET:

- pour les expositions de longue durée: 10 µg/m³

Particules fines

OMS / AFSSET:

Sur 24 heures :

- 25 µg.m/m³ pour les PM2,5
- 50 µg/m³ pour les PM10

Sur le long terme :

- 10 µg/m³ pour les PM2,5
- 20 µg/m³ pour les PM10

Radon

OMS:

Des études épidémiologiques résidentielles mettent en évidence les risques de cancer du poumon en présence de radon. Il n'existe aucun niveau sûr d'exposition. Les fumeurs chroniques courent 20 à 25 fois plus de risque de contracter un cancer du poumon qu'un non-fumeur à des concentrations moyennes de radon telles que communément observées dans les habitations de diverses régions du monde.

Trichloréthylène

OMS:

En raison du risque plausible de cancer (notamment cancer du foie, du rein et des testicules), aucun seuil ne peut être recommandé.

AFSSET:

20 µg/m³ pour les expositions de longue durée, ce qui correspond à un excès de risque de survenue d'1 cas de cancer pour 100.000 habitants par an.

L'Afsset propose de viser à terme une valeur guide de 2 µg/m³.

Tétrachloréthylène

OMS:

La valeur guide recommandée est de 0,25 mg/m³ pour une exposition d'un an. Au-delà, des effets peuvent apparaître au niveau du rein, indiquant une maladie rénale précoce et des troubles de la performance neurocomportementale.

AFSSET:

- pour les expositions de courte durée : 1380 µg/m³
- pour les expositions de longue durée: 250 µg/m³

3.4. Évaluation de la qualité de l'air intérieur

L'évaluation de la qualité de l'air intérieur se réalise dans la pratique sous deux formes différentes :

- in situ lorsque l'on réceptionne un chantier après travaux ou lorsqu'on est en présence de nuisances pour les occupants;
- en laboratoire lorsque l'on cherche à évaluer la contribution d'un matériau à la qualité de l'air globalement perçue.

Dans le premier cas, on mesure les concentrations en polluants dans l'air dans le bâtiment alors que dans le deuxième cas on replace le matériau dans ses conditions « normales » d'utilisation afin d'évaluer sa contribution à la qualité de l'air d'une pièce modèle, en termes de polluants organiques volatils.

Norme ISO 1600031 – Air intérieur

Les mesures d'émissions de polluants dans l'air intérieur doivent être effectuées selon la norme ISO 16000. Il s'agit d'une norme internationale qui définit des stratégies d'échantillonnage et différentes méthodes de dosage d'émissions, pour différents types de produits spécifiques. On y trouve notamment des méthodes

pour le dosage du formaldéhyde, des composés organiques volatils, des fibres d'amiante et de toute une série d'autres polluants de l'air intérieur.
Le principe des normes d'essai d'émission existantes consiste dans un premier temps à simuler les émissions d'un produit dans l'air intérieur, en utilisant une chambre ou une cellule d'essai d'émission, dans des conditions maîtrisées de température, d'humidité relative et de renouvellement d'air.
Dans un second temps, le prélèvement et l'analyse des composés émis sont réalisés selon les normes ISO 16000 partie 6.
Les normes EN ISO 16000-9 et 10 précisent que les émissions des produits de construction et de décoration doivent être caractérisées après 72 ± 2 heures (soit 3 jours) et 28 ± 2 jours de conditionnement en chambre (ou cellule) d'essai. Elles précisent aussi que, pour des besoins spécifiques, les émissions peuvent être également caractérisées après des temps plus courts (1 jour) ou plus longs (56 jours, 6 mois).
Actuellement, une durée de 28 jours est considérée comme un compromis acceptable pour la caractérisation du niveau d'émission d'un produit de construction, car jugé représentatif de sa vie en œuvre et donc d'un profil d'émission à long terme. Cette approche est conservatrice, les émissions en COV continuant généralement à décroître par la suite.
La mesure à 3 jours est considérée comme reflétant une exposition lors de la mise en œuvre du produit ou dans un délai court après son application.

En outre, dans ces normes d'essai, un scénario d'exposition simplifié est proposé pour estimer l'exposition associée aux émissions issues de ces matériaux. Les simplifications proposées sont :

- la prise en compte d'une seule source d'émission (le matériau testé dans la chambre d'essai d'émission) ;
- l'hypothèse d'une exposition continue 24h/24 et 7j/7, dans un seul microenvironnement clos ;
- l'absence de prise en compte de phénomènes d'absorption-désorption sur les différentes surfaces de la pièce (murs, ameublements, décoration…) et de réactions chimiques entre les composés dans l'air ;
- l'hypothèse d'une homogénéité du matériau, donc d'une émission identique en tout point de la surface émettrice.

En Belgique, ces tests d'émission ne sont pas obligatoires. Cependant, ces informations sont essentielles pour le confort respiratoire et la santé de l'occupant et de l'ouvrier du secteur de la construction.

4. Démolition / Rénovation et l'aspect santé

Les nuisances sanitaires encourues par les ouvriers lors de la manipulation des matériaux durant un chantier de démolition ou de rénovation avec des travaux de démolition peuvent également être considérables, et ce pour les raisons suivantes:

- d'une part, la faible connaissance des composants et des matériaux existants, dans le bâtiment à démolir ou à rénover, augmente le risque d'être en présence de matières ou substances toxiques. En outre, la présence d'humidité, de moisissures ou de champignons peut encore amplifier le risque encouru.
- d'autre part, les techniques actuelles de démolition engendrent des émissions importantes de poussières, de particules et de fibres qui peuvent être inhalées par les ouvriers présents sur le chantier.

L'aspect sanitaire lors d'un chantier de démolition ou de rénovation doit donc être considéré avec attention, en prenant toutes les précautions d'usage liées à ce type de travaux : masque, casque...

Dans le cas de chantier de rénovation avec des travaux de démolition, on peut lier différentes exigences notamment en ce qui concerne la déconstruction et l'aspect "santé":

- un repérage préalable est intéressant tant d'un point de vue "santé" pour identifier les matériaux ou composants "à risque" que d'un point de vue "déconstruction" afin de minimiser la production de déchets;
- un document récapitulatif des différents matériaux et composants - réellement mis en œuvre - devrait être remis en fin de chantier à l'administration de l'urbanisme afin de faciliter les futurs travaux de démolition ou de rénovation et de prévenir les risques éventuels encourus par les ouvriers et les différents acteurs présents sur le chantier.

Les matériaux en fin de vie et la production de déchets

Alors que la plupart d'entre nous s'accordent sur l'appauvrissement des ressources en matières premières, qu'elles soient énergétiques ou non énergétiques, le secteur de la construction reste en Europe, d'une part, un important consommateur de combustibles fossiles et de ressources naturelles (50 %[1]) et, d'autre part, un important producteur de déchets (40 %[2]).
En effet, les processus d'extraction, de fabrication, de mise en œuvre et surtout les travaux de rénovation et de démolition entraînent inévitablement une production de déchets, comme le présente la figure B6.02.

Selon une étude réalisée en 2006 par l'IBGE[3], le secteur de la construction et démolition représente plus d'un tiers des déchets non ménagers générés par la région bruxelloise, soit 36% ou près de 628.000t/an. Cette quantité se répartit comme suit:
- 45 % maçonnerie;
- 38 % béton;
- 10 % asphalte;
- 3 % céramique;
- 2 % bois;
- 2 % autres.

Du fait de la croissance de la population et surtout de la prépondérance croissante des chantiers de démolition et de rénovation dans la plupart des villes européennes, on s'attend à ce que ce tonnage augmente fortement dans les prochaines années.
Ces matériaux usagés sont considérés par notre société de consommation comme des rebuts. Ils sont seulement la rançon d'un cycle productif inachevé qui a seulement pris en compte la production de biens en oubliant les ressources matérielles et énergétiques potentielles contenues par ceux-ci.

1 Source: [LIEBARD 2005]
2 Source: [LIEBARD 2005]
3 IBGE - www.ibgebim.be

Si la plupart des déchets de construction ont actuellement la capacité intrinsèque d'être valorisés, la plupart d'entre eux, par manque d'information, de quantité de matières à traiter, de moyens techniques ou par la difficulté de désassemblage et de tri (lors de la démolition) sont encore traités de manière traditionnelle par incinération ou par mise en centre d'enfouissement technique (CET). Ces filières traditionnelles d'élimination des déchets présentent de nombreux désavantages:
- ces filières ont des impacts non négligeables sur l'environnement (pollution atmosphérique, risques de pollution du sol ou des ressources en eau...);
- ces filières sont à la fois coûteuses et leur exploitation nécessite de nombreux contrôles;
- l'implantation et l'exploitation de ces filières seront fortement limitées dans les prochaines années selon le souhait de l'Union européenne.

En outre, ces filières ne gèrent pas durablement les déchets puisqu'elles ne font que les dissimuler ou les réduire.
Les filières de valorisation, comme le recyclage et la récupération, ont par contre prouvé leurs avantages au plan environnemental et économique dans de nombreux secteurs comme la sidérurgie, la métallurgie et le secteur automobile notamment où 95 % de la production sont réinvestis dans le cycle de production.
Ces filières de valorisation ne sont encore trop peu développées dans le secteur de la construction en dépit du potentiel élevé de recyclabilité que présentent les matériaux de construction.
Si ce potentiel n'est pas exploité actuellement, il l'a pourtant été dans l'histoire de la construction: nos ancêtres réutilisaient bon nombre de matériaux pour construire ou reconstruire. C'est le cas des matériaux en terre crue, en terre cuite et en pierre. C'est également le cas des matériaux en bois et en métal (cuivre, bronze, acier...).

Certains fabricants ont néanmoins compris l'avantage

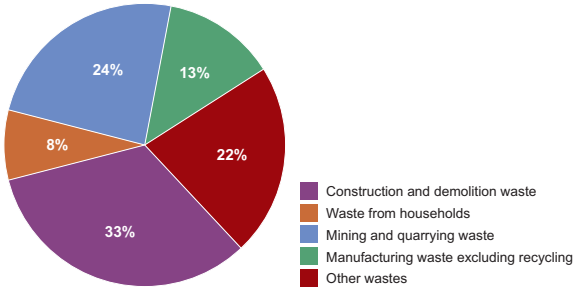


Illustration B6.01 : Répartition des déchets par secteur
Source: [EEA 2010]

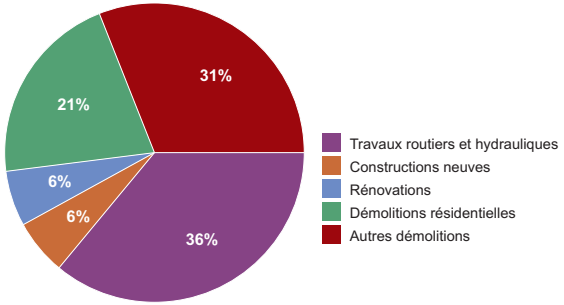


Illustration B6.02 : Répartition des déchets de construction
Source : CSTC

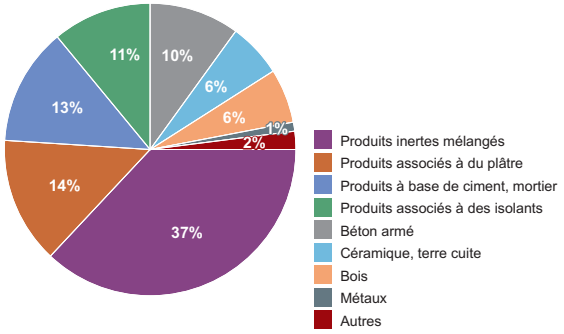


Illustration B6.03 : Répartition par fraction de déchets - source : CSTC

- principalement économique - des matières recyclées et utilisent abondamment celles-ci dans leur procédé de fabrication comme matières premières secondaires (verre recyclé pour la production de laine de verre et de verre cellulaire, déchets de scierie pour la production de produits dérivés du bois , isolants et panneaux à particules, déchets de papier d'imprimerie pour les isolants en cellulose, sulfogypse pour la production de produits en plâtre, déchets métalliques...) ou comme combustibles (pneus, huiles usagées).

Ces matières premières recyclées proviennent toutefois rarement de matériaux usagés.

D'autres fabricants vont plus loin et mettent en place des filières de valorisation à proximité des usines de production. C'est notamment le cas de la société Rockwool qui a développé depuis plusieurs années un système permettant de recycler la laine de roche sous forme de briquettes. Ces briquettes sont ensuite réintroduites dans les fours de production à la place de certaines matières premières.

Mais malgré les efforts et démarches fournis par ces fabricants, la plupart des matériaux de construction arrivés en fin de vie partent encore vers des centres d'enfouissement technique (CET) et/ou vers des centres d'incinération avec ou non valorisation énergétique.

Seules les filières de valorisation des déchets inertes (déchets de béton, de terre cuite, de céramique, etc.) et des déchets d'emballages sont relativement bien développées.

Ces filières de valorisation - alternatives au « gaspillage » effréné - sont des défis de taille vers un nouveau mode de production, qui, en plus du « nouveau », proposerait du « soutenable » en produisant des biens de consommation tout en conservant les ressources nécessaires à les produire et reproduire:

- en utilisant des matériaux "usagés" comme matières premières dans des processus de fabrication, elles permettent de réduire la pression exercée sur les ressources naturelles tant énergétiques que non énergétiques, mais également la pression exercée sur l'environnement en général;
- en valorisant les déchets de démolition ou de construction, les filières de valorisation permettent de réduire considérablement la quantité de déchets (et leurs impacts potentiels sur l'environnement), mais également les coûts de traitement des déchets dont la facture s'alourdit d'année en année.

Loin d'être exhaustif, ce chapitre a pour objectif de faire le point sur les déchets de construction et leur traitement, tant au niveau législatif (Europe et Belgique) qu'au niveau des filières de traitement et de valorisation. Ce chapitre mettra en évidence, d'une part, le potentiel de recyclabilité des matériaux de construction et, d'autre part, les implications de ce recyclage sur les phases de conception et de mise en œuvre ainsi que sur la gestion de chantier

1. Législation européenne en matière de déchets et en matière de déchets de construction[4]

1.1. En matière de déchets

Réduction, prévention, réemploi, recyclage

Selon la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets les États membres, afin de protéger au mieux l'environnement, doivent prendre des mesures pour le traitement de leurs déchets conformément à la hiérarchie suivante qui s'applique par ordre de priorité :

- prévention;
- préparation en vue du réemploi;
- recyclage;

4 Source: eur-lex.europa.eu/fr/index.htm

• autre valorisation, notamment énergétique;
• élimination.

Les États membres peuvent mettre en place des mesures législatives en vue de renforcer cette hiérarchie dans le traitement des déchets. Ils doivent cependant assurer que la gestion des déchets ne mette pas en danger la santé humaine et ne nuise pas à l'environnement

Cette directive abroge les directives 75/439/CEE, 91/689/CEE et 2006/12/CE et définit les termes suivants:

Déchet : toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire.

Gestion des déchets: la collecte, le transport, la valorisation et l'élimination des déchets, y compris la surveillance de ces opérations ainsi que la surveillance des sites de décharge après leur fermeture.

Prévention : les mesures prises avant qu'une substance, une matière ou un produit ne devienne un déchet.

Valorisation : toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles.

Recyclage : toute opération de valorisation par laquelle les déchets sont retraités en produits, matières ou substances aux fins de leur fonction finale ou à d'autres fins.

Principe du « pollueur – payeur »

Selon la directive du 15 juillet 1975 relative aux déchets, le coût de l'élimination des déchets doit être supporté par le détenteur de ceux-ci.

Le « Livre Blanc » sur la responsabilité environnementale stipule qu'une personne ayant occasionné des dommages à l'environnement doit verser une somme d'argent pour remédier aux dommages qu'elle a causés.

Contrôle de la mise en décharge

La directive 99/31/CE du 26 avril 1999, relative à la mise en décharge, a pour objectif de prévenir et de réduire autant que possible les effets négatifs sur l'environnement de la mise en décharge des déchets par l'introduction d'exigences techniques strictes pour les déchets et le type de décharge.

Cette directive a été modifiée par les règlements (CE) n° 1882/2003 et (CE) n° 1137/2008 , renforçant les critères d'autorisation d'implantation et de contrôle de la mise en décharge.

Contrôle de la mise en centre d'incinération

La directive 2000/76/CE du 4 décembre 2000, relative à l'incinération des déchets, a pour objectif de prévenir ou de réduire, dans la mesure du possible, la pollution de l'air, de l'eau et du sol résultant de l'incinération et de la coincinération des déchets ainsi que les risques pour la santé humaine qui en résultent.

Cette directive a été modifiée par le règlement (CE) n° 1137/2008 qui adapte et renforce la procédure de réglementation avec contrôle.

L'interdiction de mélanger les déchets dangereux avec d'autres déchets

Les directives 91/689/CEE et 94/31/CE, relatives aux déchets dangereux et à la gestion de ceux-ci, stipulent que le mélange des déchets dangereux avec d'autres déchets est interdit. Dans le cas où des déchets dangereux sont mélangés avec d'autres déchets, une opération de séparation doit avoir lieu.

La traçabilité des déchets dangereux

Les directives 91/689/CEE et 94/31/CE, relatives aux déchets dangereux et à la gestion de ceux-ci, stipulent que :

- lors de la collecte, du transport et du stockage, les déchets dangereux doivent être emballés et étiquetés conformément aux normes communautaires ;
- lorsqu'ils sont transférés, les déchets dangereux doivent être accompagnés d'un formulaire d'identification.

Le contrôle des exportations de déchets dangereux

La Convention de Bâle, entrée en vigueur le 7 février 1994, vise à réduire le volume des échanges de déchets dangereux en instaurant un système de contrôle des exportations et importations de ceux-ci ainsi que de leur élimination et cela afin de protéger la santé humaine et l'environnement.

Le transfert des déchets

Le règlement (CE) n° 1013/2006 du Parlement européen et du Conseil du 14 juin 2006 concernant les transferts de déchets a pour but de renforcer, simplifier et préciser les procédures de contrôle des transferts de déchets pour améliorer la protection de l'environnement. Il réduit ainsi le risque de transfert de déchets non contrôlés. Il vise également à intégrer dans la législation communautaire les dispositions de la convention de Bâle ainsi que la révision de la décision sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets destinés à des opérations de valorisation adoptée par l'OCDE en 2001.

Le règlement ramène les procédures de contrôle des transferts de trois à deux:

- la procédure dite de la « liste verte » s'applique aux déchets non dangereux destinés à être valorisés;
- la procédure de notification s'applique aux transferts de tous les déchets destinés à être éliminés et aux déchets dangereux destinés à être valorisés.

Ce règlement a été modifié par le règlement (CE) n° 219/2009 et la décision 2010/438/UE

1.2. En matière de déchets de chantier

Les principes sont les suivants :

Obligation de séparer les déchets des déchets dangereux

L'entrepreneur a l'obligation de séparer les déchets dangereux des autres déchets rencontrés sur chantier.

Obligation de trier les déchets

L'entrepreneur a l'obligation de trier les déchets de construction. Si les conditions d'exploitation ne le permettent pas, cette opération doit être effectuée, hors chantier, dans un centre de tri.

Obligation de trier et valoriser les déchets d'emballages

La directive 94/62/CE du 20 décembre 1994 du Parlement européen et du Conseil relative aux emballages et aux déchets d'emballages prévoit des mesures visant à limiter la production de déchets d'emballages et à promouvoir le recyclage, la réutilisation et d'autres formes de valorisation de ces déchets. Leur élimination finale doit être considérée comme la solution de dernier recours.
La directive 2005/20/CE accorde un délai supplémentaire aux 10 nouveaux États membres (République tchèque, Estonie, Chypre, Lettonie, Lituanie, Hongrie, Malte, Pologne, Slovénie, Slovaquie) pour atteindre les objectifs de la présente directive sur les emballages. Ces dérogations sont valables jusqu'en 2015.

Obligation de récolter séparément les piles et accumulateurs usagés contenant des produits toxiques

La directive 2006/66/CE du Parlement européen et du Conseil du 6 septembre 2006 relative aux piles et aux accumulateurs ainsi qu'aux déchets de piles et d'accumulateurs (abrogeant la directive 91/157/CEE) interdit la mise sur le marché de certaines piles et certains accumulateurs contenant du mercure ou du cadmium dans une proportion supérieure à un seuil déterminé. De plus, elle encourage un niveau élevé de collecte et de recyclage des déchets de piles et d'accumulateurs, ainsi qu'une amélioration de la performance environnementale de tous les acteurs du cycle de vie des piles et des accumulateurs, y compris au moment du recyclage et de l'élimination des déchets de piles et d'accumulateurs.
L'objectif est de réduire la quantité de substances dangereuses, notamment le mercure, le cadmium et le plomb, rejetée dans l'environnement, grâce à la réduction de la quantité de ces substances dans les piles et accumulateurs et grâce au traitement et à la réutilisation de ces substances. Tous les types de piles et d'accumulateurs sont couverts par la présente directive, à l'exception de celles utilisées dans les équipements destinés à la protection de la sûreté des États ou à des fins militaires, ainsi que dans les équipements destinés à être lancés dans l'espace.

2. Législation belge en matière de déchets

La législation relative à la gestion de l'environnement et des déchets notamment n'est pas une compétence fédérale en Belgique, mais régionale. Chaque Région est donc compétente pour légiférer en matière de déchets. Vu la complexité engendrée par trois législations régionales, nous nous contenterons d'énumérer les grandes lignes de la législation en vigueur en Région bruxelloise[5].

2.1. Législation bruxelloise

Réduction, prévention, réemploi, recyclage

La Région bruxelloise s'est fixé un objectif de recyclage des déchets de construction et de démolition (hors terres) de 75 % et des terres de 100 %.
Pour arriver à maintenir cet objectif, elle prône la prévention et la valorisation le plus en amont possible de la production des déchets.

L'ordonnance du 7 mars 1991 stipule, par ordre décroissant, la prévention des déchets à la source , le cas échéant, la réduction, voire l'élimination, de leur nocivité pour l'environnement, la valorisation des déchets et l'élimination des déchets sans danger pour l'homme et son environnement.
Cette ordonnance permet au Gouvernement bruxellois de prendre toutes les dispositions nécessaires pour promouvoir la prévention et la réduction des déchets.

Selon l'ordonnance du 7 mars 1991, le détenteur de déchets est tenu d'assurer leur élimination ainsi que les coûts engendrés par cette élimination.

Obligation de reprise des déchets pour certains producteurs

Selon l'ordonnance du 18 mai 2000, modifiant l'Ordonnance du 7 mars 1991 relative à la prévention et à la gestion des déchets, le Gouvernement bruxellois peut imposer aux personnes responsables du « déchet » par le fait de l'avoir mis sur le marché à titre professionnel, la reprise, la collecte, la valorisation ou l'élimination de celui-ci. Cette obligation concerne actuellement les producteurs d'emballages, de papiers et cartons, de véhicules, de pneus, et d'équipements électriques et électroniques.

Garantir une élimination sans danger pour l'homme et son environnement

L'ordonnance du 7 mars 1991 interdit d'abandonner un déchet dans un lieu public ou privé en dehors des emplacements autorisés et sans respecter les dispositions réglementaires.
De plus, elle oblige tout détenteur de déchets à les éliminer sans générer de nuisances pouvant porter atteinte à la santé humaine et à l'environnement.

Obligation de recycler la fraction pierreuse et sableuse des déchets de construction et de démolition

L'arrêté du 16 mars 1995 impose à toute entreprise de construction ou de démolition d'assurer le recyclage de la fraction pierreuse ou sableuse des déchets de construction.
Si l'entreprise ne recycle pas ces débris elle-même, elle

5 Source: [TRACHTE 2003] et [IBGE 2009]

a l'obligation de les remettre à une entreprise spécialisée.

Utilisation de débris dans les travaux routiers

La circulaire ministérielle du 9 mai 1995 relative à la réutilisation des débris dans les travaux routiers et d'infrastructure (M.B. 22.09.1995) autorise l'utilisation de matériaux recyclés pour différentes applications, moyennant respect de conditions techniques spécifiées dans la circulaire.

Obligation de remettre les déchets dangereux à un éliminateur agréé pour chaque type de déchets

Selon les arrêtés du 19 septembre 1991, tout détenteur de déchets dangereux a l'obligation de remettre ceux-ci à un éliminateur agréé par le Ministère de l'Environnement et cela pour chaque type de déchets.

Interdiction de mélanger des huiles usagées avec d'autres déchets, de les laisser s'écouler ou de les brûler

Les arrêtés du 19 septembre 1991 de l'Exécutif de la Région de Bruxelles–Capitale obligent les entrepreneurs à stocker les huiles usagées dans un réservoir placé en encuvement et à les remettre à un éliminateur agréé par le Ministre de l'Environnement.

Obligation de remettre les piles ou accumulateurs usagés à un collecteur agréé

L'arrêté du 17 juin 1993 de l'Exécutif de la Région de Bruxelles–Capitale oblige les entrepreneurs à remettre certaines piles, batteries ou accumulateurs usagés à un collecteur agréé pour la collecte des déchets dangereux.

Obligation de sous-traiter à une entreprise agréée les travaux d'élimination d'amiante

L'arrêté du 14 octobre 1993 du Gouvernement de la Région de Bruxelles–Capitale oblige les entrepreneurs à faire appel à une société agréée pour les travaux d'enlèvement et d'élimination d'amiante.

Conditions d'enlèvement et d'encapsulation de l'amiante

L'arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 10 avril 2008 (MB 18/06/2008) impose l'enlèvement de l'amiante contenu dans un immeuble avant sa démolition. Il prescrit certaines précautions pour la manutention, le dépôt, l'emballage et la gestion des déchets d'amiante, des informations à fournir aux autorités (IBGE et commune) avant et
pendant les travaux. Cet arrêté impose aussi que toute demande de permis d'environnement et de déclaration relative à un chantier de désamiantage soit accompagnée d'un inventaire amiante qui couvrira, au minimum, la ou les zones concernées par les travaux.

Quatrième Plan de Prévention et de Gestion des déchets (mars 2010)

Les objectifs de ce plan reposent sur une approche intégrée permettant de réduire considérablement les impacts de la construction sur l'environnement. Ce quatrième plan prévoit pour les déchets de construction et de démolition différentes mesures.
Celles-ci peuvent être synthétisées comme suit :

- obtenir un taux de recyclage de 90 % des déchets de construction et de démolition ;
- encourager ce recyclage via divers mécanismes liés à l'écoconstruction;
- soutenir la démolition sélective (par exemple via un « inventaire déchets » préalable à la démolition) et encourager la mise en place d'une filière « économie sociale » de démantèlement sélectif des bâtiments ;
- intensifier les contrôles sur le respect de l'obligation de recyclage en vigueur ;
- promouvoir le tri et le recyclage sur les petits chantiers, via des projets pilotes.

2.3. Constats

On constate qu'actuellement peu d'initiatives législatives sont prises en vue de favoriser la conception de projets incluant une réflexion sur les déchets produits lors de la phase de construction et au terme du cycle de vie, lors de la phase de rénovation ou de démolition.
Les législations bruxelloise et wallonne considèrent celui qui produit le déchet comme responsable de son élimination. Dans les faits, ce sont donc la plupart du temps les entreprises de construction qui en prennent la responsabilité.
Faute d'un cadre légal plus contraignant ou d'un cahier des charges spécifique, les entreprises ont pour seule imposition d'appliquer la règlementation en vigueur. La gestion intégrée des déchets ; le tri sélectif ; l'organisation et la coordination de chantier ainsi que l'identification des filières de recyclage ne fait pas encore partie d'une démarche systématique et optimisée au-delà des obligations légales.
Les initiatives " volontaires " proposées par les entreprises sont rares, voire inexistantes, elles ont souvent pour effet d'alourdir la charge de travail et la complexité de gestion de chantier et donc d'impacter les offres financières dans un secteur où la concurrence est rude et l'attribution des marchés régie par la loi du « moins disant » (système d'adjudication impliquant obligatoirement le choix du soumissionnaire régulier le plus bas).
Dans ce contexte, les entreprises ne sont pas incitées à développer des initiatives dans le sens de la gestion intégrée des déchets du secteur de la construction. Le principe de gestion reste basique et n'a pas pour effet de créer une dynamique dans le secteur du marché du recyclage et de la récupération dont la viabilité est dictée par la rentabilité économique.
Sans contraintes appliquées aux maîtres d'ouvrage, ces derniers ne sont pas incités à initier des restrictions de gestion des déchets dans le cahier des charges des entreprises, et quand bien même la volonté serait marquée, cette approche implique inévitablement un coût

complémentaire direct à assumer.
Un transfert de responsabilité des entreprises vers le maître d'ouvrage aurait pour effet d'inverser la tendance et de mettre au jour une nouvelle approche dans la prévention, la réduction et la gestion des déchets. Cette disposition existe déjà dans d'autres pays comme par exemple la Suisse, qui outre le transfert de responsabilité des déchets vers les maîtres d'ouvrage, a également intégré dans la législation l'obligation de tri de tous types de déchets et mis en place un prix de mise en décharge très élevé et dissuasif.

3. Les classes de déchets

Les déchets de construction sont répartis en trois classes de déchets:

• la classe 1: déchets industriels dangereux

Les déchets dangereux sont des déchets qui représentent un danger spécifique pour l'homme ou l'environnement. Ceux-ci sont identifiés et listés[6] et doivent être étiquetés. Ces déchets doivent être collectés par un collecteur agréé et transportés par un transporteur agréé. Ils sont traités en centre d'enfouissement technique (CET) pour les déchets dangereux. Ce type de CET est inexistant en région bruxelloise et région wallonne.

Exemple: amiante, asphalte (contenant du goudron), certains bois traités, certains vernis et peintures, mastic synthétique, tout produit contenant des matières dangereuses, etc.

Certains déchets dangereux spécifiques font l'objet d'une réglementation particulière. C'est le cas des PCB, des huiles usagées, de l'amiante, des piles et accumulateurs...

• la classe 2: déchets ménagers et assimilés et déchets industriels non dangereux

Ces déchets sont des déchets non inertes et non dangereux. Ils sont collectés par l'entrepreneur sur chantier puis transportés par un transporteur agréé ou par l'entrepreneur vers un CET pour les déchets non dangereux. Ce type de CET est présent sur l'ensemble du territoire belge sauf en région bruxelloise.
Ces déchets peuvent également partir vers des centres de recyclage.

Exemple: déchets de bois non traité, ardoises fibrociment, certaines colles végétales, déchets d'emballages, isolants synthétiques et à base de fibres végétales ou animales, métaux ferreux et non ferreux...

• la classe 3 : déchets inertes

La directive européenne 1999/31/CE du conseil du 26 avril 1999 définit *les déchets inertes comme des déchets qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante. Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique. Ils ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine.*
Ces déchets sont collectés sur chantier par l'entrepreneur et transportés par un transporteur agréé ou l'entrepreneur vers un CET pour déchets inertes ou vers des centres de concassage, ce qui est le cas pour une majorité des déchets inertes en Belgique.

4. Les filières d'élimination des déchets - description, incidences et coût

Remarque:
Le déchet idéal est celui qui n'existe pas. Une façon de valoriser les déchets de construction est de ne pas en produire ou du moins faire en sorte d'en produire un minimum.
Pour ce faire, le concepteur et l'architecte ont un rôle préventif à jouer lors de la conception du projet en respectant certaines lignes de conduite. Celles-ci seront décrites aux points 6.1 et 6.2.

4.1. Centre d'enfouissement technique (CET)

Un centre d'enfouissement ou centre d'enfouissement technique (CET) est une décharge conçue pour le stockage de déchets ultimes en minimisant les risques de pollution ou contamination de l'environnement.
Au sens de l'article 2, 18° du décret wallon du 27 juin 1996 relatif aux déchets, on définit les centres d'enfouissement technique comme « *un site d'élimination des déchets par dépôt des déchets sur ou dans la terre (c'est-à-dire en sous-sol), y compris :*

- *les décharges internes (les décharges où un producteur de déchets procède lui même à l'élimination des déchets sur le lieu de production) ;*
- *un site permanent (pour une durée supérieure à un an) utilisé pour stocker temporairement les déchets, à l'exclusion :*
  - *des installations où les déchets sont déchargés afin de permettre leur préparation à un transport ultérieur en vue d'une valorisation, d'un traitement ou d'une élimination en un endroit différent ;*
  - *du stockage des déchets avant valorisation ou traitement pour une durée inférieure à trois ans en règle générale ;*
  - *du stockage avant élimination pour une durée inférieure à un an* ».

Les déchets ultimes proviennent des centres de tri, de regroupement, de prétraitement et de traitement des déchets.

Le rôle des centres de tri et de regroupement

Le déchet est un produit " variable " tant au niveau de ses constituants que de la concentration de ces derniers ainsi qu'au niveau de son état physique (solide, liquide, mélange de phases).
Le déchet se présente également sous des condition-

6 Les déchets dangereux sont repris notamment dans le catalogue wallon des déchets dangereux (M.B. 30.07.1997 - err. 06.09.1997), et dans la liste de l'AGRBC du 25 avril 2002 établissant la liste de déchets et de déchets dangereux pour la région bruxelloise

Tableau B6.01 : Coûts des filières d'élimination (2000 et 2007) et de valorisation (2007) - source: [IBGE 2009]

Type de déchets	Elimination (2000) euros/tonne	Elimination (2007) euros/tonne	Valorisation (2007) euros/tonne
Béton (classe 3)	12 à 50	14 à 30	
non armé propre			0
non armé sale			2,5 à 7
armé propre petit calibre			1,24 à 10
armé fortement, gros calibre			11,20 à 17,40
Maçonnerie (classe 3)	12 à 50	14 à 30	
débris propres			5,50 à 20
débris avec d'autres déchets			9,20 à 20
Asphalte	12 à 124	130 à 170	de 2 à 15 suivant le calibre et si mélangé
Débris goudronneux	12 à 124	130 à 170	155 à 200
Béton cellulaire	12 à 124	130 à 170	65 à 180
Plaque de gypse	12 à 124	130 à 170	70 à 150
Bois	83 à 124		
classe A		14 à 30	0
classe B		130 à 170	13 à 30
Métaux (classe 2)			
fer	83 à 124	130 à 170	+120
aluminium	83 à 124	130 à 170	+1080
zinc	83 à 124	130 à 170	+1400
acier inox	83 à 124	130 à 170	+1600
Verre (classe 2 et 3)			
verre plat simple et propre	12 à 50	14 à 30	+15 à 45
verre mélangé (double vitrage...)	83 à 124	130 à 170	25 à 75
Plastiques (classe 2)			
PVC	83 à 124	130 à 170	0

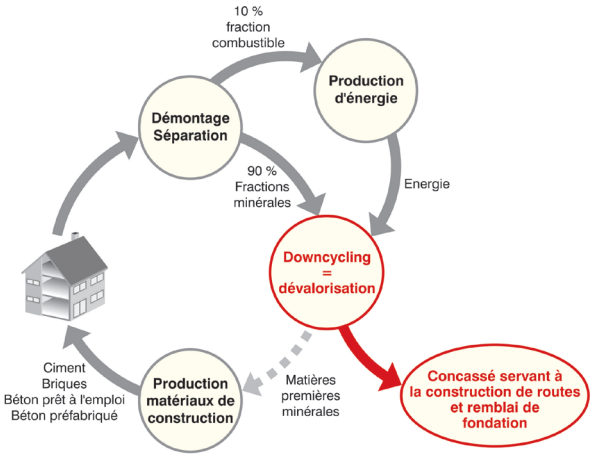


Illustration B6.04 : Gestion actuelle des déchets de bétons et autres inertes

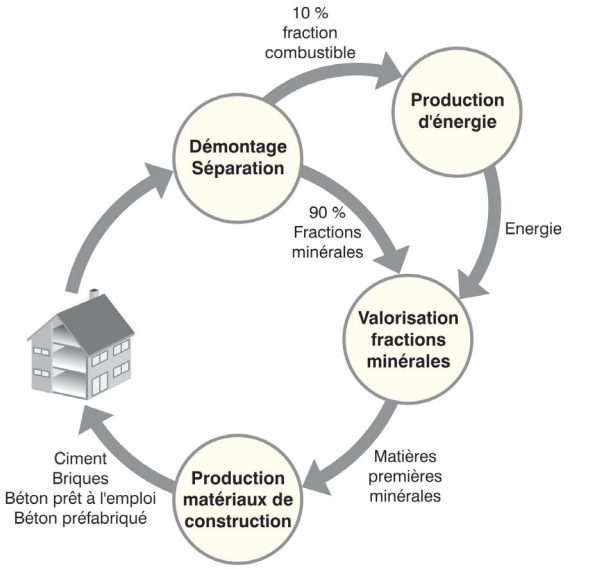


Illustration B6.05 : Valorisation avec un bouclage de cycle

nements divers : en vrac, dans des conteneurs fermés, en fûts, dans des citernes… Il dépend aussi de son lieu de production et n'obéit pas toujours à un rythme de production régulier.
Afin de tenir compte de ces spécificités, des centres de regroupement et de tri ont été créés avec l'objectif de fournir aux installations de traitement (CET ou centre d'incinération) des quantités constantes et suffisantes de déchets à traiter.
De même, le centre de tri assure une homogénéité des flux, également nécessaire aux procédés de traitement ultérieurs.
Les déchets provenant des centres de tri et de regroupement qui ne sont pas valorisables sont destinés à l'élimination.

Les incidences potentielles des CET

Les CET peuvent avoir des incidences sur l'environnement par la pollution éventuelle du sol, de l'air et de l'eau.
Selon le type de déchets, la mise en CET peut provoquer l'émission de poussières, de particules, de fibres, d'odeurs, mais également de particules en suspension dans l'eau et de lixiviats[7] dans le sol.
L'implantation des centres d'enfouissement peut occasionner des modifications du relief et du sol.
Ces modifications peuvent entraîner des incidences sur les eaux de surface et les eaux souterraines, sur la stabilité et l'érosion des sols, sur les écosystèmes et les biotopes existants ainsi que sur la qualité paysagère d'un site ou d'un espace.

Dans le cas des CET de classe 2, le stockage des déchets " dégradables " peut entraîner des tassements importants dus notamment au phénomène de lixiviation et à la compression des déchets sous l'effet de leur propre poids. Ce phénomène de tassement peut avoir des incidences sur les eaux de surfaces et les eaux souterraines et sur la stabilité des sols.
En plus du phénomène de tassement, des risques d'incendie, d'explosion ou de production de substances indésirables sont possibles. En effet, le contact entre les déchets de natures différentes peut provoquer différentes réactions chimiques.

4.2. Centre d'incinération

Une installation d'incinération est définie par la directive européenne 2000/76/CE comme étant *tout équipement ou unité technique fixe ou mobile destinée spécifiquement au traitement thermique de déchets, avec ou sans récupération de la chaleur produite par la combustion. Le traitement thermique comprend l'incinération par oxydation ou tout autre procédé de traitement thermique, tel que la pyrolyse, la gazéification ou le traitement plasmatique, dans la mesure où les substances qui en résultent sont ensuite incinérées.*
L'installation de coïncinération est définie par cette même directive comme étant une installation fixe ou mobile dont l'objectif essentiel est de produire de l'énergie ou des produits matériels et qui utilise des déchets comme combustible habituel ou d'appoint, ou dans laquelle les déchets sont soumis à un traitement thermique en vue de leur élimination.
De manière globale, quel que soit le type de déchets, l'incinération est un traitement thermique des déchets dans des fours. Différents procédés ont été mis au point pour réaliser la décomposition thermique des déchets.
Des distinctions entre les incinérateurs peuvent être faites en fonction du type de déchets, non pas sur le processus en tant que tel, mais sur les conditions de manutention, de stockage et d'enfournement, ainsi que les pouvoirs calorifiques de matière. On peut distinguer:
- les incinérateurs de déchets ménagers et assimilés;
- les incinérateurs de déchets dangereux (produits dangereux, boues de dragage et de curage);
- les incinérateurs de déchets hospitaliers ou d'animaux

Le procédé d'incinération comporte généralement les étapes suivantes : l'approvisionnement des déchets, le stockage intermédiaire des déchets et éventuellement un pré-traitement, l'enfournement, la combustion et la postcombustion, le traitement des fumées, la récupération énergétique et l'évacuation des résidus.

Traitement des gaz

Les gaz sortant du four contiennent généralement des poussières, des métaux, des gaz acidifiants, des hydrocarbures imbrûlés, des dioxines et des furannes. Il convient donc d'installer des systèmes d'abattement et/ou de traitement de ces gaz particulièrement efficaces.
Les types de traitement des gaz que l'on peut rencontrer sont:
- un dépoussiérage (filtre à manches, électro-filtre…) ;
- une neutralisation des gaz acides par absorption et neutralisation ;
- un traitement des NOX par filtre catalytique ;
- un dispositif de traitement des dioxines[8] et furannes[9]

7 lixiviat: lors de leur stockage et sous l'action conjuguée de l'eau de pluie et de la fermentation naturelle, les déchets produisent une fraction liquide appelée « lixiviats ». Riches en matière organique et en éléments traces, ces lixiviats risquent ainsi de provoquer la pollution du sol et par la suite des nappes phréatiques s'ils ne sont pas soigneusement collectés et traités.

8 dioxines: en chimie organique, les dioxines désignent des molécules hétérocyliques et aromatiques ayant deux atomes d'oxygène dans un cycle aromatique. Les dioxines sont principalement issues des processus industriels mais elles peuvent être produites lors de phénomènes naturels comme les éruptions volcaniques ou des incendies de forêts. L'émission de dioxines dans l'air est principalement due aux incinérateurs de déchets ménagers, en raison de combustion incomplète.

9 furannes: les furanes sont des composés chimiques de formule brute C4H4O. Ce sont des composés hétérocycliques constitués d'un cycle aromatique à cinq atomes, dont un atome d'oxygène. Ils se présentent sous la forme d'un liquide incolore très volatil

au charbon actif.

L'évacuation des résidus

L'incinération ne fait pas disparaître les déchets, c'est un procédé qui permet seulement d'en diminuer la quantité.
Les principaux résidus de l'incinération sont:

- les mâchefers qui représentent environ 30 % du poids des déchets. Bien que potentiellement source de pollution (par les métaux lourds notamment, mais parfois aussi par des dioxines ou furanes), ils sont souvent réutilisés par les travaux publics comme remblai de tranchée ou sous-couche de chaussée en substitution de matériaux plus nobles, tels que le sable;
- les cendres volantes qui représentent environ 3 % du poids des déchets. Leur toxicité dépend du traitement des fumées choisi. La mesure de cette toxicité détermine vers quelle classe de décharge sont dirigées les cendres;
- les résidus de traitement humide des gaz ou les fumées.

Les incidences environnementales des centres d'incinération

• consommation d'énergie importante

Les principaux besoins en énergie dans les installations d'incinération et de coincinération des déchets sont les suivants :

- l'énergie thermique nécessaire au préchauffage du four ;
- l'énergie mécanique nécessaire à l'évacuation des résidus ;
- l'énergie utilisée lors des prétraitements requis ;
- l'énergie électrique nécessaire à la circulation des gaz dans le système de traitement ;
- l'énergie électrique pour le fonctionnement des pompes.

Cette consommation d'énergie a des conséquences sur la qualité de l'air atmosphérique, sur la qualité des sols et sur la consommation des ressources.
C'est pourquoi il est aujourd'hui indispensable de récupérer l'énergie contenue dans les déchets.

• consommation et rejets d'eau

Les traitements de refroidissement et les traitements des gaz nécessitent une utilisation importante d'eau, mais provoquent également de nombreux rejets d'eau " souillée ". Ces rejets d'eaux usées peuvent avoir des incidences sur la qualité du sol et du sous-sol, sur la préservation des biotopes, sur la production de déchets, et sur la santé et la sécurité.

• production de déchets " problématiques "

Comme nous l'avons dit plus haut, l'incinération ne supprime pas totalement les déchets, elle n'en réduit que la quantité: sur 100 kilos de déchets incinérés, il reste environ 33 % de déchets à traiter. À cela, il faut encore rajouter les résidus laissés par les traitements des effluents gazeux (eaux neutralisées, souillées, filtre, boues, poussières, charbon actif…)
Les mâchefers et les cendres contiennent souvent des métaux, des dioxines, des furanes et d'autres polluants ou substances nocives pour les différents écosystèmes terrestres et aquatiques.
Ce procédé de gestion des déchets provoque en outre l'émission de nombreux gaz toxiques qu'il convient de contrôler et de traiter efficacement sous peine d'augmenter sensiblement la pollution atmosphérique.

4.3. Les coûts des filières d'élimination

Les filières d'élimination étant, d'une part, de plus en plus réglementés et contrôlés et, d'autre part, leur implantation étant de plus en plus limitée sur le territoire belge et européen, le coût de celles-ci augmente de manière constante (voir tableau B6.01).

5. Les filières de valorisation des déchets

La valorisation consiste à redonner une valeur marchande aux déchets: on considère les déchets comme une ressource à exploiter et non comme des rebuts dont il faut se débarrasser.
Les filières de valorisation des déchets de construction permettent de maintenir autant que possible la valeur ajoutée par l'homme à la matière et cela selon la gradation suivante :

La valorisation " matière "

- la conservation et le réemploi d'un élément, d'un produit ou d'un matériau de construction, celui-ci gardant sa fonction initiale ;
- la réutilisation d'un élément, d'un produit ou d'un matériau de construction pour une autre affection ou fonction que la fonction initiale ;
- le recyclage d'un élément, d'un produit ou d'un matériau de construction: l'élément, le produit ou le matériau est introduit dans le cycle de production dont il est lui-même issu, en remplacement d'une matière première " neuve " ;
- le décyclage d'un élément, d'un produit ou d'un matériau de construction : l'élément, le produit ou le matériau est introduit dans un cycle de production de produits de qualité, de valeur ou d'exigence technique moindre.

La valorisation " énergétique "

L'élément, le produit ou le matériau de construction est transformé en combustible: on utilise les calories contenues dans l'élément en le brûlant et en récupérant l'énergie.

La valorisation " organique "

L'élément, le produit ou le matériau de construction est composté ou biodégradé: la matière organique est transformée par un processus biologique naturel sous l'effet de l'oxygène. La matière ainsi transformée est rendue à la nature sous forme d'engrais ou de "nourriture".
Si les valorisations énergétique et organique permettent

de réduire sensiblement la quantité de déchets produits à traiter, elles ne permettent cependant pas de redonner une existence au matériau usagé. En d'autres termes, elles bouclent un cycle de vie sans laisser la possibilité d'entamer un nouveau cycle.
Les filières valorisant la matière s'inscrivent toutes dans une politique dite des " *trois R* ":
- *réduire les déchets de construction à la source;*
- *réutiliser les déchets de construction;*
- *recycler les déchets de construction.*

La prévention et/ou la réduction en est le tout premier principe. Ce principe de réduction et de prévention est également la base même de toute politique environnementale ou soutenable: limiter les nuisances, limiter les risques, réduire les impacts...
Exemple: en termes de politique énergétique, les principes à suivre sont : réduire les besoins par la mise en œuvre d'une enveloppe performante et de systèmes efficaces et ensuite utiliser une source renouvelable d'énergie (biomasse, solaire, géothermie...).

6. Décyclage et Recyclage, une nuance importante

En termes de valorisation " matière ", il est important de faire la différence entre le décyclage (" downcycling " en anglais) et le recyclage (" upcycling " en anglais), comme le présentent les figures B6.04 et B6.05 pour le cas des déchets inertes.
Ces deux processus de valorisation offrent trois avantages " écologiques " majeurs :
- la réduction du volume de déchets, et donc de la pollution potentielle que ceux-ci pourraient causer à l'environnement;
- la préservation des ressources naturelles, puisque la matière recyclée est utilisée à la place de la matière première qu'on aurait dû extraire ;
- la préservation des ressources énergétiques, puis que la grande majorité des cas, les processus de fabrication qui utilisent des matières recyclées ont un besoin énergétique moins important qu'un processus de fabrication utilisant des matières premières.

Le décyclage est un procédé par lequel on utilise un produit ou matériau de construction usagé en tant que matière secondaire pour la production d'un nouveau matériau ou produit de qualité, de valeur et/ou d'exigence technique moindre.
Exemple:
C'est le cas des concassés de bétons qui sont utilisés comme matériau de remblai ou de sous-fondation de route alors qu'ils pourraient, sous certaines conditions, être utilisés comme agrégats dans la production de nouveaux bétons.
C'est également le cas des éléments en bois non traités qui sont utilisés dans la fabrication de panneaux à particules (MDF, OSB...).

Cette filière de valorisation est fortement utilisée actuellement par de nombreux fabricants de matériaux de construction qui ont saisi l'avantage économique des matières premières secondaires recyclées:
- les fabricants de laine de verre utilisent de 30 à 80 % de verre recyclé dans leur processus de fabrication;
- les fabricants de verre cellulaire utilisent jusqu'à 60 % de verre recyclé dans leur processus de fabrication
- les fabricants de certains matériaux de drainage utilisent uniquement des déchets plastiques (polystyrène);
- les fabricants d'isolant en laine de bois utilisent en grande partie les déchets de scieries;
- les fabricants de produits à base de plâtre utilisent de plus en plus du sulfogypse ou phosphogypse issus de la précipitation du sulfate de calcium dans différents procédés industriels...

Cette filière de valorisation présente l'avantage de réduire sensiblement la quantité de déchets à gérer et de réduire ceux-ci dans différents procédés industriels en tant que matière première secondaire. Cependant, ce type de valorisation ne permet souvent que de boucler une seule fois le cycle de vie.
Le recyclage est un procédé de traitement par lequel un élément ou un matériau de construction est introduit dans le processus de fabrication dont lui-même est issu, en remplacement d'une matière première.
Le recyclage présente l'avantage de pouvoir boucler plusieurs fois la boucle du cycle de vie d'un matériau et de relancer le cycle suivant.
Le meilleur exemple est celui du recyclage des métaux.
Les métaux sont recyclés depuis l'Âge du Bronze où les ustensiles et outils en bronze étaient refondus pour produire d'autres objets.
Une tonne d'acier recyclé représente l'économie de:
- 1,92 tonne de minerai de fer;
- 0,63 tonne de coke;
- 11,57 m³ d'eau[10]

Une tonne d'aluminium recyclé représente l'économie de:
- 2,44 tonnes de bauxite;
- 1,07 m3 d'eau[11]

La production d'acier à partir de déchets recyclés permet également d'économiser de l'énergie: un kilo d'aluminium produit à partir de bauxite demande environ 116 MJ[12] alors qu'un kilo d'aluminium produit à partir de déchets d'aluminium demande environ19,5 MJ

Dans le cadre d'une politique soutenable de gestion des ressources, ces filières de valorisation doivent être encouragées. Ce faisant, ces filières impliquent un travail en amont, lors de la conception, de la mise en œuvre et de la démolition du projet d'architecture.

10 Source: http://www.futura-sciences.com/fr/doc/t/developpement-durable/d/recyclage-traitement-dechets_932/c3/221/p12/
11 Source: http://www.futura-sciences.com/fr/doc/t/developpement-durable/d/recyclage-traitement-dechets_932/c3/221/p12/
12 Source: base de données ECOSOFT

7. Les implications de la prévention et de la valorisation des déchets

Les différents acteurs du secteur de la construction se préoccupent très peu des aspects de la démolition, surtout en phase de conception, lorsqu'ils se lancent dans l'élaboration d'un nouveau projet, mais également lors de chantiers de rénovation ou de démolition où ils laissent l'entière responsabilité de cette gestion à l'entrepreneur.
Pourtant, le rôle de l'architecte et, dans une moindre mesure, celui du maître d'ouvrage sont cruciaux en ce qui concerne la prévention et la réduction de déchets.

7.1. Les implications sur le travail de l'architecte

L'architecte, par sa réflexion sur le choix des procédés constructifs et les matériaux composants son projet, peut réduire sensiblement la quantité de déchets, d'une part lors de la phase de construction et d'autre part lors de la phase de rénovation et/ou démolition.

Au niveau du choix des procédés constructifs et d'éléments, l'architecte veillera à:

- favoriser la préfabrication des éléments constructifs là où les avantages sont réels et exploitables (suivant la taille du projet, la localisation, la complexité de transport…);
- utiliser des éléments pré-montés de dimension standard en accord avec les dimensions structurelles des bâtiments pour éviter toute découpe sur site et donc la production de déchets;
- s'assurer de la réversibilité des fixations entre les différents composants de l'élément préfabriqué et entre l'élément préfabriqué et son support (structure du bâtiment) pour permettre la désolidarisation en vue du recyclage et pour ne pas altérer les parties de bâtiment éventuellement maintenues.

Au niveau du choix de matériaux, l'architecte veillera à:

- prendre connaissance du marché des déchets et du recyclage pour apprendre à connaître les matériaux recyclables ainsi que la manière de choisir et d'associer ces matériaux selon leur classe de recyclage;
- favoriser l'utilisation de matériaux recyclables et réellement recyclés sur notre marché (travail de préparation préalable) ;
- choisir les matériaux en tenant compte prioritairement des possibilités de réemploi direct, ou de réemplois après remise à neuf, ou encore de recyclage;
- vérifier la composition des matériaux, l'origine des matières premières et la conformité avec les écolabels;
- favoriser des techniques de fixation réversibles afin de désolidariser les matériaux et de permettre la récupération des matériaux pour un second usage.

En outre, lors des appels d'offres aux entreprises, l'architecte peut mettre en évidence dans son cahier des charges, les exigences de gestion de déchets. Il peut aussi dans son cahier des charges faire référence aux labels de qualité officiels pour le choix des matériaux ou des produits de construction.
S'il souhaite développer une gestion des déchets que ce soit sur chantier de construction, de rénovation ou de démolition, l'architecte ou toute autre " personne ressource " devra préalablement établir un plan de gestion des déchets.

Plan de gestion des déchets

Le plan de gestion des déchets de chantier sera élaboré en fonction des options de valorisation, d'élimination et des coûts.
Ce plan de gestion comprendra les données suivantes :
- l'espace nécessaire et l'espace réellement disponible;
- le phasage des phases de déconstruction;
- les modalités de stockage : conteneurs, big bags etc.;
- le type de déchet avec un détail par poste des déchets



Illustration B6.06 : Container pour matériaux inertes



Illustration B6.07 : Tri des fractions "bois" sur chantier - Source: ADEME



Illustration B6.08 : Tri sur chantier - chantier Nestlé à Vevey (Suisse)

Fractions	Q. Prévue	Container	Transport			Traitement		Total
	m³	20m³/pce	nb (tonne)	prix/t	total	prix/t	total	
Gros-oeuvre								
Inertes rec	8.849,0	443,0	12.157,0	105,0	1.276.485,0	9,0	109.413,0	**1.385.898,0**
Inertes non rec	80,2	4,0	192,9	105,0	20.254,5	50,0	9.645,0	**29.899,5**
Pierre blanche	192,0	10,0	461,0	0,0	0,0	-2.300,0	-1.060.300,0	**-1.060.300,0**
Pierre bleue	178,0	9,0	427,2	0,0	0,0	79,5	33.962,4	**33.962,4**
Finition ext.								
Cuivre	3,0	1,0	26,7	0,0	0,0	-1.300,0	-34.710,0	**-34.710,0**
Aluminium	0,7	1,0	1,8	0,0	0,0	-930,0	-1.627,5	**-1.627,5**
Vitrage	155,0	8,0	252,0	105,0	26.460,0	-17,0	-4.284,0	**22.176,0**
Finition int.								
Laine de roche	263,4	13,0	65,9	105,0	6.919,5	120,0	7.908,0	**14.827,5**
Plâtre cartonné	33,6	2,0	53,8	105,0	5.644,8	23,0	1.236,5	**6.881,3**
Marbre	25,9	2,0	70,0	0,0	0,0	-473,5	-33.145,0	**-33.145,0**
Linoléum	48,2	3,0	57,8	105,0	6.069,0	50,0	2.890,0	**8.959,0**
Tapis-plain	43,0	2,0	77,4	0,0	0,0	0,0	0,0	**0,0**
Lambris	73,9	4,0	37,0	105,0	3.885,0	10,0	370,0	**4.255,0**
Carrelage	11,0	1,0	18,7	105,0	1.963,5	9,0	168,3	**2.131,8**
	pce	20m³/pce	nb (tonne)	prix/t	total	prix/pce	total	
Divers								
Portes en bois	810,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-103,4	-83.754,0	**-83.754,0**
Equipemt sanit.	732,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-74,0	-54.168,0	**-54.168,0**
App. éclair.con	894,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-50,0	-44.700,0	**-44.700,0**
App. éclair.vente	4.535,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-19,0	-86.165,0	**-86.165,0**
Hydrant	54,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-524,0	-28.296,0	**-28.296,0**
Chaudière	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-1.850,0	-5.550,0	**-5.550,0**
Volets en bois	30,0	1,0	1,5	105,0	154,4	50,0	73,5	**227,9**

Illustration B6.09 : Exemple de plan de gestion - [TRACHTE 2003]

en nature et quantité;
- les fractions de déchets ou familles de déchets : bois traité, bois non traité...;
- les quantités : la quantité d'un type de déchet selon l'unité habituellement utilisée pour le type de matériaux mis en œuvre (mct, m², m³, pce);
- le type et le nombre de conteneurs nécessaires pour l'entreposage et l'évacuation des déchets par catégorie de déchet;
- la signalisation des matériaux entreposés par catégories ;
- le transport : le nombre de tonnes de déchets, prix à la tonne et prix total par type de déchet ;
- les filières de valorisation et d'élimination: le type de traitement, le prix à la tonne et le prix total par type de déchet;
- l'évacuation: le rythme d'évacuation et les moyens de transport
- la destination: dans un objectif de traçabilité, l'entrepreneur devra, à la demande de l'architecte, fournir la preuve de bonne livraison des déchets à l'organisme de recyclage, de valorisation ou de dépôt.

7.2. Les implications sur la mise en œuvre des matériaux

Les mises en œuvre permettant de prévenir la production de déchets, d'en réduire les quantités et d'en favoriser la réutilisation et le recyclage afin de réduire drastiquement la mise en décharge ou en centre d'incinération, sont basées sur le principe de réversibilité:

- utiliser des systèmes de fixation qui permettent le démontage et le remontage des éléments constitutifs afin de pouvoir récupérer les matériaux (réemploi / recyclage) et d'assurer un accès aisé pour l'entretien et la maintenance;
- éviter l'utilisation de matériaux composites ou de matériaux combinés non démontables ne permettant pas la désolidarisation des matériaux en vue de leur

recyclage;
- dans le cas d'une combinaison de matériaux, veiller à utiliser des matériaux recyclables faisant partie de la même classe de déchets
- veiller à l'accessibilité des systèmes de fixation pour permettre le démontage ultérieur

La qualité de la mise en œuvre influencera considérablement la durée des éléments et des matériaux de construction. Dans l'objectif d'optimiser celle-ci , l'architecte veillera à:
- protéger lors de la mise en œuvre les matériaux des dégradations extérieures (pluie et humidité) – pour les matériaux neufs et pour les matériaux de récupération;
- respecter les prescriptions de mise en œuvre recommandées par les fabricants ou énoncées dans les normes afin d'éviter les dégradations ultérieures;
- la bonne compréhension des informations transmises aux entrepreneurs et tout corps de métier sur les techniques de mise en œuvre et les objectifs de performance;
- la bonne organisation et coordination de chantier principalement pour les ouvrages qui nécessitent l'intervention de corps de métier successifs – afin d'éviter les mises en œuvre inadaptées ou les dégradations;
- sensibiliser les exécutants en informant sur les enjeux suivis par la méthode constructive proposée et fixer les exigences.

Régulièrement, lors du chantier, des modifications ont lieu tant au niveau du choix des matériaux que des assemblages. Ce faisant, il est important que ces modifications soient reprises avec précision dans les documents d'exécution.

7.3. Les implications sur le chantier de rénovation ou de démolition - la déconstruction

Les phases de rénovation et/ou de démolition engendrent généralement un flux important de déchets à gérer. Pour que ces déchets puissent être valorisés, ils doivent d'abord être triés - idéalement sur chantier.
Cette étape du tri doit être préparée et nécessite des études préalables décrites ci-dessous:

L'information / formation des entreprises

L'information des acteurs de terrain sur les objectifs de gestion et de recyclage des déchets est primordiale. Chaque entreprise, contractant direct, ou sous-traitant devra être informé des objectifs du projet et des principes techniques et organisationnels qui seront appliqués. Cette information peut se faire via une réunion préparatoire spécifique préalablement au chantier pour les responsables d'entreprise, et via une séance d'information sur chantier pour les ouvriers.
Les points à aborder sont les suivants: objectifs, principes appliqués, rôle et responsabilité, applications concrètes, principe de contrôle…

La planification et le repérage sur site

Suivant la typologie de projet, l'organisation du chantier pourra être variable, mais les principes de planification sont identiques et incluent :
- l'identification du potentiel d'implantation des containers: surface d'encombrement, possibilité de mise en œuvre sur site, typologie, taille et nombre de containers…;
- l'identification de la fréquence d'enlèvement suivant la quantité et le type des déchets…

Un plan d'installation précisera les aires de tri, de stockage, de circulation et de stationnement des véhicules, clôtures de chantier, signalétique…
Selon la quantité des déchets, leur typologie, l'accès au site et le potentiel d'implantation de containers, on optera pour un tri sélectif in situ ou pour un tri en centre de tri.
Plus le tri est proche de la source de production du déchet, plus il est de qualité. Un tri "in situ" sera plus efficace d'un point de vue économique et environnemental, car:
- il permet de limiter les transports entre le chantier et les centres de valorisation;
- il permet de limiter les coûts de traitement des déchets, les déchets mélangés étant plus chers que les déchets séparés;
- il permet de valoriser les filières locales de recyclage et de réemploi.

La désignation d'un responsable déchets

Le responsable déchets aura pour rôle d'organiser et de contrôler la bonne exécution de la gestion des déchets en vue de leur valorisation.
Le responsable déchets peut être une personne de l'entreprise de construction (si entreprise générale) ou une personne extérieure (architecte / bureau d'étude…).
Parmi les tâches qui incombent au responsable, nous relevons : le contrôle de la bonne exécution et de la qualité du tri selon les prescriptions, la surveillance du niveau de remplissage des bennes, le contrôle de la bonne évacuation et de la destination des déchets (via bons de dépôt en centre de tri ou de recyclage ou décharge/centre d'incinération…), la bonne application du plan de gestion des déchets…

Garantie et contrôle de la qualité des déchets pour recyclage

Le recyclage des déchets n'est efficace qu'à condition d'assurer un entreposage séparé et garantissant leur propreté et mise au sec.
L'encrassement des matériaux donne lieu à la formation de déchets de "mauvaise qualité" plus difficilement valorisables.

Le bâchage des déchets lors du stockage sur site et du transport est indispensable.
Le mélange de différents déchets de matériaux dans un même container peut impliquer le refus de reprise par le recycleur ou nécessiter un tri complémentaire avec implications budgétaires.
Le contrôle de la qualité de répartition des déchets selon les containers est primordial, il est à charge du responsable déchets sur site et implique la responsabilité des entreprises.
Pour éviter toute erreur involontaire, un affichage didactique à l'intention des entreprises devra être apposé sur chaque container, il reprendra : le type de déchets acceptés, les dispositions à prendre pour la protection des déchets, la destination du container...
S'ils sont isolés, certains déchets recyclables peuvent devenir non valorisables lorsqu'ils sont combinés à d'autres matériaux de classement différent et non séparables.
La désolidarisation des matériaux en fin de vie et la non-utilisation de matériaux composites prennent donc ici tout leur sens.

Conclusion
Critères de choix pour les matériaux de construction

Notre société industrielle doit son expansion à l'accessibilité soudaine et miraculeuse des trésors énergétiques que sont le charbon, le pétrole et le gaz naturel.
L'exploitation de ces ressources, sur lesquelles sont basées d'une part l'économie mondiale et d'autre part la puissance de certains Etats, et l'essor des "machines à feu" ont permis la transformation du monde et un développement industriel jamais égalé jusqu'ici. Le charbon puis le pétrole et le gaz naturel ont permis de décupler la rentabilité et l'efficicacité des procédés: l'énergie mécanique fournie par l'humain et l'animal a laissé la place à celle fournie par un moteur.

Deux siècles plus tard, l'utilisation forcenée de ces ressources énergiques – leur dégradation entropique accélérée – détruit peu à peu les conditions biogéochimiques qui ont permis à l'humanité de quitter le stade de la cueillette et de la chasse65 et d'évoluer vers un ensemble de phénomènes sociaux, religieux, intellectuels, artistiques, scientifiques et techniques menant à la civilisation que nous connaissons aujourd'hui.
Au cours de ces deux derniers siècles, les activités anthropiques, principalement l'industrie, le transport et la construction ont mis à mal l'écosystème terrestre en affectant considérablement les grands mécanismes de régulation de celui-ci. Ce faisant, l'être humain et sa machine industrielle se comportent de manière irresponsable, à l'image d'un chauffard roulant dans la nuit, tous feux éteints, sur une route étroite et sinueuse. Tous deux risquent de se précipiter contre les limites biologiques physiques et chimiques du système terrestre et d'ainsi provoquer des phénomènes climatiques ou autres qui pourraient mettre en péril ou complexifier nos conditions actuelles de "vie" sur Terre.

65 Source: Dossier « la liberté humaine s'arrête aux frontières de la planète », La Revue Durable – mars/avril 2011

Si l'étude des différents cycles biogéochimiques nous a permis de prendre conscience des liens de cause à effet qui existent entre nos rejets et les dérèglements climatiques, la modification voire la perte de certains écosystèmes terrestres et marins ainsi que les conséquences sur notre santé, elle a surtout mis en avant deux notions importantes:

• la notion de lien:

Dans le système terrestre, tout est lié par des échanges constants entre la biosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère.
Augmenter la charge de polluants dans l'atmosphère a des conséquences directes sur la biosphère (perte de biodiversité, appauvrissement des ressources, manque d'eau, acidification et appauvrissement des sols...), mais également sur l'hydrosphère (acidification des océans, eutrophisation des eaux de surface, fragilisation des écosystèmes aquatiques et marins...).
Chaque impact doit donc être pris en considération. Il ne s'agit plus de se concentrer sur l'économie des ressources énergétiques et sur la réduction des gaz à effet de serre. La politique d'un développement soutenable implique de prendre en considération cette notion de lien et d'englober l'ensemble des nuisances provoquées par l'être humain sur son environnement.

• la notion de cycle:

Dans le système terrestre, « rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ». Cette maxime attribuée à Lavoisier peut être formulée autrement: dans le système terrestre et ses quatre sphères, tout se recycle, tout ce qui est produit est utilisé, transformé et récupéré, rien n'est jeté. Le système terrestre régule naturellement ses propres rejets et en réduit ainsi l'impact nocif ou négatif. L'image du couple photosynthèse - respiration en est l'exemple le plus flagrant.
Pendant des milliers d'années, l'homme a considéré qu'il faisait partie d'un TOUT et a fonctionné en "symbiose" avec la nature environnante. Depuis deux siècles,

le développement industriel et technologique a modifié ce comportement en donnant à l'homme un sentiment de toute puissance : l'être humain se considère comme indépendant du système terrestre, il le "domine", il l'exploite...
Ce faisant, depuis deux siècles, l'être humain ne gère plus ni ne maîtrise ses déchets et ses rejets. Dans sa course effrénée vers une production industrielle, agricole et technologique de masse, l'homme a refusé de prendre en considération la valeur environnementale, sociale et économique de ses rebuts. Aujourd'hui, on achète, on utilise, on met en œuvre, on remplace, on démolit et on jette sans jamais prêter attention ni à la valeur intrinsèque et technologique de la matière ni à la valeur du travail humain qui est incluse dans le produit de consommation.
Si l'humanité, depuis la Révolution industrielle, a développé de nombreuses technologies et produits en tout genre, elle doit maintenant et pour la première fois de son histoire aussi faire face à ses déchets et les assumer. Ceux-ci ne doivent pas être vus en tant que tels, mais au contraire comme une chance, une opportunité de répondre à un besoin grandissant en matières premières.
C'est pourquoi, il est important que l'être humain qui a, tout au long de son histoire, observé et analysé les phénomènes naturels pour imaginer et développer de nouvelles technologies, calque son modèle industriel sur celui de la Nature: créer, utiliser, transformer en bouclant indéfiniment le cycle de la matière.
Suivant cet objectif, il est indispensable d'intégrer la fin de vie de tout produit, y compris les matériaux de construction dans tout processus de conception, qu'il soit architectural ou industriel.

Si l'homme et ses activités sont au centre des dérèglements du système terrestre car ils en sont les principaux auteurs, il est évident que l'homme et la machine technolique ont aujourd'hui la capacité intellectuelle et financière d'enrayer ceux-ci.
Il est à noter que les pays occidentaux portent la quasi totalité des responsabilité de ces dérèglements alors que les pays du sud ou en voie de développement, en subissent lourdement les conséquences.
En effet, au début du 19e siècle, lorsque la civilisation industrielle voit le jour, les connaissances scientifiques n'étaient pas suffisamment développées pour prévoir ou identifier les conséquences du développement industriel.
Ce n'est qu'à partir des années 50 que de plus en plus de scientifiques ont fait part de leurs préoccupations environnementales, mais il faudra attendre les chocs pétroliers et les catastrophes environnementales des années 80 et 90 pour que l'homme industriel prenne conscience des conséquences de ses actes.
Aujourd'hui encore, les preuves scientifiques ne parviennent pas à convaincre totalement les grands industriels, le G8, le G20 et l'ensemble des Etats à un changement radical de culture et de politique socio-économique.
Or il y a urgence à réagir vite, de façon conséquente et globale. Car les dérèglements des mécanismes de régulation et leurs conséquences se feront sentir environnementalement, socialement et économiquement à très long terme, notamment en ce qui concerne le réchauffement climatique, l'épuisement des ressources ou la biodiversité: les degrés accumulés le seront pour quelques centaines d'années, les ressources épuisées le seront pour des milliers d'années, les espèces et essences disparues le seront pour toujours...
Notre humanité, dont la survie dépend totalement de l'enveloppe protectrice de l'atmosphère et de ces mécanismes de régulation, se trouve au bord d'un "gouffre environnemental" qu'elle ne peut plus éviter ou renier.
Cependant, si la situation est délicate, voire périlleuse, nous avons la conviction que c'est lorsqu'elle est acculée, que l'humanité trouve en elle le courage d'affronter ses responsabilités, de relever le défi auquel elle fait face et d'ainsi évoluer.
L'homme doit évoluer dans son mode de pensée, de vie, de production et de consommation.
Il doit réorienter la machine industrielle et technologique en devenant le gardien de seuils ou de frontières à ne pas franchir en termes de changements climatiques, de perte de biodiversité, d'acidification des terres et des océans, d'eutrophisation des eaux de surfaces, de perte d'ozone stratosphérique, de consommation d'eau douce, de pollution chimique, de changement d'affectation des sols... Tous les scientifiques s'accordent unanimement sur l'urgence à clairement identifier les seuils du système terrestre, à analyser les risques et les incertitudes associés à chacun d'entre eux et à appliquer le principe de précaution.
Ce principe de précaution est d'ailleurs un des points centraux d'un développement soutenable. L'homme, s'il est au coeur des activités anthropiques et des dérèglements du système terrestre qui en découlent, en est également la première victime. L'essor de la chimie industrielle a permis à de nombreuses substances ou molécules de synthèse d'entrer dans la composition de biens de consommation et de produits de construction: additifs, plastifiants, colorants, pesticides, ignifuges...
Ces différentes substances "contaminent" nos lieux de travail et de vie en détériorant la qualité de l'air intérieur. Ceci avec comme conséquences majeures une augmentation importante d'allergies, d'affections respiratoires et de cancer qui devient la principale cause de décès dus aux conditions de travail en Europe66.
Certains secteurs industriels sont plus fortement touchés par cette problématique. C'est le cas du secteur du bâtiment où les ouvriers travaillant dans les procédés de fabrication ou mettant en œuvre les matériaux

66 Source: European Trade Union Institut, 2008

sont exposés aux substances chimiques et émissions toxiques de celles-ci.
Il n'est toutefois pas nécessaire de travailler dans un secteur exposé ou de vivre dans une région à risques pour être en contact avec ces polluants. L'augmentation de la pollution de l'air atmosphérique entraîne également et à grande échelle une augmentation des affections respiratoires, des maladies chroniques et des décès précoces.
Dans ce contexte d'urgence, l'homme doit repenser sa manière de concevoir et construire l'architecture. En effet, **si l'architecture est une des productions les plus manifestes d'une civilisation, notre société du 21e siècle se doit de produire une architecture soutenable qui engagera irréversiblement notre avenir vers de nouvelles opportunités constructives mais aussi sociales, économiques et environnementales**.
Si le secteur de la construction n'est pas le seul responsable de tous ces phénomènes de pollution et de rejets, il est un des secteurs industriels qui pourrait, à très court terme, réduire fortement d'une part sa consommation de ressources et d'autre part, ses rejets et ses émissions.
Pour se développer de façon soutenable, le secteur de la construction devra réaliser des efforts conséquents en termes de réduction de la consommation des ressources, énergétiques et non énergétiques, et en termes de réduction des rejets et des émissions tout en augmentant sensiblement le confort et le bien-être de l'occupant et en respectant la santé de tous les corps de métier qui œuvrent à l'édification de nos bâtiments.
Ces efforts doivent être fournis sur l'ensemble des phases du cycle de vie du bâtiment et passent par un choix adapté et responsable à la fois des matériaux de construction et des procédés constructifs utilisés.
Aujourd'hui, penser et développer un bâtiment en tenant compte de son cycle de vie, c'est mener une réflexion dès la phase de conception sur la programmation, la volumétrie, les principes constructifs et le choix des matériaux, de façon à privilégier le potentiel d'évolution et à faciliter les changements futurs tout en minimisant son impact environnemental et sanitaire.
L'objectif est d'offrir au bâtiment et à ses composants un prolongement de cycle d'utilisation. Il y a dans cette idée deux champs d'action complémentaires

- Au niveau du bâtiment : le concept d'évolutivité et de flexibilité, visant l'adaptabilité du bâtiment aux besoins changeants.
- Au niveau des matériaux : la valorisation du cycle de vie et le choix des matériaux, valorisant la capacité de désassemblage et de traitement ou de reconversion.

C'est pourquoi les conclusions que nous présentons ci-après peuvent se situer sur deux échelles distinctes: des critères de choix liés au cycle du bâtiment et des critères de choix liés au cycle du matériau proprement dit.

1. Choix des matériaux à l'échelle du bâtiment

Lorsqu'on se place à l'échelle du bâtiment et de son cycle de vie, les critères de choix repris ci-dessous doivent être pris en considération :

1.1. Rationaliser l'usage des matériaux de construction lors de la phase de conception.

Nous pourrions reprendre ici la maxime de Ludwig Mies van der Rohe « Less is more » pour clairement exprimer ce principe de rationalisation. Mies van der Rohe utilise cette expression pour exprimer son engouement et son attrait pour le minimalisme, langage architectural prônant l'utilisation de formes simples et épurées et de matériaux manufacturés, créant ainsi des espaces neutres et contemplatifs grâce à une architecture basée sur l'honnêteté des matériaux et l'intégrité structurale.
Nous utiliserons cette expression pour son sens premier, à savoir que le matériau qui n'aura pas d'impact sur l'environnement et la santé est celui qui ne sera pas mis en œuvre, qui ne sera pas utilisé, qui ne sera pas fabriqué… En termes de rationalisation de la matière, on peut souligner plusieurs principes qui guideront le processus de conception.

Principe 1

Le premier principe consiste à mettre en adéquation le système constructif choisi avec la durée de vie du bâtiment dans lequel le système s'inscrit. En effet, selon la destination du bâtiment, son implantation et l'évolution des besoins, la durée de vie d'un bâtiment peut varier. Les matériaux choisis doivent donc avoir une durée de vie adaptée à celle du bâtiment ou du moins qui s'en rapproche. Dans le cas d'un bâtiment de courte durée de vie (5 à 20 ans), le concepteur favorisera des techniques constructives démontables et des matériaux de construction facilement désolidarisables. Ces techniques permettent une déconstruction aisée et/ou une évolution du bâtiment en limitant l'impact environnemental.

Principe 2

Le second principe, complémentaire au premier, consiste à choisir un système constructif qui permette l'évolutivité, la flexibilité et/ou l'adaptabilité des constructions de manière à augmenter leur durée de vie. L'adaptabilité d'un bâtiment traduit sa capacité à subir, sans altérer son usage ni les services qu'il rend, des changements à moindre coût environnemental[67] (matières premières, énergie, déchets et rejets).

Principe 3

Le troisième principe consiste à encourager les techniques d'assemblage et de fixation mécaniques qui permettent la préfabrication ou le prémontage en usine. En effet, ces différentes techniques offrent les avantages suivants : rationalisation de la quantité de matériaux

67 Source: [ADEME, 2002]

mis en œuvre, réduction des transports vers le chantier de construction, réduction des déchets produits sur chantier, amélioration « potentielle » de la qualité et des performances des éléments préfabriqués, conditions de travail améliorées pour les ouvriers, optimisation et maîtrise des procédés de montage, rapidité d'exécution sur chantier – les interventions se limitant essentiellement à l'assemblage d'éléments importants – réduction des coûts grâce à la maîtrise accrue des procédés de fabrication et à la réduction de main-d'œuvre sur chantier...
La préfabrication aura aussi pour avantage de développer une « construction sèche » qui permet non seulement de s'affranchir des contraintes météorologiques, mais également de limiter la consommation d'eau sur le chantier.

Principe 4
Le quatrième principe consiste à optimiser le dimensionnement des éléments de construction en ayant recours à des dimensions commerciales et standardisées.

Principe 5
Le cinquième et dernier principe de rationalisation consiste à favoriser la mise en œuvre de matériaux « bruts de finition » en limitant l'utilisation de matériaux de parachèvement et de finition. En effet, les matériaux de parachèvement et de finition sont des matériaux de plus en plus complexes associant de nombreuses substances et additifs. Ils sont donc susceptibles d'émettre plus de polluants et d'avoir ainsi plus d'effets « négatifs » sur la qualité de l'air intérieur et sur la santé de l'être humain.
Laisser des matériaux « bruts de finition » signifie également maximiser leur potentiel de recyclabilité en évitant de les mélanger à d'autres matériaux.
Ce type de finition nécessite cependant une mise en œuvre sur chantier de très grande qualité puisqu'aucune couche supplémentaire ne viendra cacher les défauts éventuels.

1.2. Optimiser la maintenance et le maintien des performances pendant la durée de vie du bâtiment.

Une fois mis en œuvre, les matériaux ou éléments de construction doivent remplir leur fonction le plus longtemps possible sans perte de performance. Trois principes de choix liés à la maintenance et au maintien des performances peuvent être mis en exergue.

Principe 1
Le premier principe consiste à optimiser la compatibilité des matériaux et des systèmes constructifs avec l'usage ou la fonction auxquels ils doivent répondre. Le matériau de construction doit d'abord être choisi, selon ses performances, en fonction de l'usage et des exigences auxquels il doit répondre.
Le choix d'un revêtement de façade se fera par exemple en fonction de la résistance aux conditions climatiques extérieures. Les matériaux en contact avec l'ambiance intérieure seront sélectionnés en fonction de leur résistance aux chocs, à l'humidité ou encore de la présence de certains produits…

Principe 2
Le second principe consiste à choisir des matériaux ayant une durée de vie importante et ne nécessitant pas ou peu d'entretien.

Principe 3
Le troisième et dernier principe est complémentaire au deuxième et consiste à faciliter l'entretien, la réparation et/ou le remplacement des éléments de construction. L'ensemble des éléments de construction, essentiellement les éléments de façade (parement, protections solaires, garde-corps, seuils…) et les éléments en contact avec l'ambiance intérieure (revêtements de sol, plafonds et murs), doivent être facilement accessibles pour permettre leur entretien, maintenance ou réparation sans intervention lourde, sans gêne pour les occupants et sans altération des éléments auxiliaires. Il en est de même pour les installations techniques.

1.3. Optimiser la fin de vie : faciliter la déconstruction, favoriser le réemploi

La fin de vie des matériaux de construction est une phase importante du cycle de vie, surtout si les objectifs sont, d'une part, de réduire la consommation des ressources et, d'autre part, de minimiser la production de déchets à traiter.
La phase de fin de vie est constituée de deux étapes: la démolition (ou déconstruction) et le devenir des déchets. Déconstruire un bâtiment, c.-à-d. le démonter ou le désassembler, a l'avantage de faciliter le tri sur chantier et de permettre ainsi une meilleure valorisation des déchets.
Si les déchets sont triés correctement, ils pourront plus facilement être réemployés et/ou valorisés dans les filières de recyclage.
L'optimisation de la fin de vie d'un bâtiment peut se faire suivant deux principes.

Principe 1
Le premier principe consiste à faciliter la déconstruction ou le démontage des composants en prévoyant - lors de la conception et du dossier d'exécution - une démolition sélective du bâtiment : plans as-built, dossier d'intervention ultérieure, détails techniques tels que réalisés, inventaire et métré précis des matériaux mis en œuvre (déchets potentiels) ainsi que leurs fiches techniques.

Principe 2
Le second principe consiste à favoriser le réemploi de matériaux, plus particulièrement dans le cadre de projets de rénovation.
La question à poser chaque fois que l'on est face à un élément, produit ou matériau dont on voudrait se défaire, n'est plus « est-il encore à la mode, n'est-il pas périmé ? » mais « quelle est la dose de travail que l'on y a investie, quelle est la quantité de matière, d'énergie et

de travail que j'épargne, quelle est la quantité de rejets évités? ». Une fois la question posée, on se rend compte que, excepté le cas d'une forte obsolescence technique et mis à part les éléments de maçonnerie et de béton armé, tout élément de construction peut être réutilisé.

2. Choix des matériaux à l'échelle de l'élément de construction

On peut ensuite s'attarder plus spécifiquement sur le matériau de construction et son cycle de vie. Les critères environnementaux et sanitaires qui entrent en jeu sont décrits ci-dessous.

2.1. Limiter l'appauvrissement des ressources en développant 3 axes d'action : économie de matière, choix et origine de la matière et réutilisation de la matière.

Tout matériau ou produit de construction consomme des ressources énergétiques et non énergétiques tout au long de son cycle de vie.

Les ressources énergétiques – principalement des ressources fossiles – sont utilisées comme combustible pour l'extraction et le transport des matières premières, pour la fabrication et le transport des matériaux et produits de construction ainsi que pour le transport et le traitement en fin de vie.

Les ressources non énergétiques sont les matières premières utilisées pour la fabrication des matériaux et produits de construction.

Une démarche « soutenable » en termes de choix matériaux de construction implique nécessairement de limiter autant que possible l'exploitation des ressources naturelles. Cette démarche sous-entend de refermer le cycle de vie des matériaux, c.-à-d. de rendre les flux de matières cycliques en valorisant au maximum les déchets – produits pendant les différentes phases du cycle de vie du matériau – comme matières premières pour la fabrication de nouveaux matériaux et/ou la construction/rénovation de bâtiments.

Selon ce principe, les bâtiments doivent donc être considérés comme un stockage de matières premières et les filières traditionnelles de traitement de déchets, comme des gisements de matières « secondaires » potentiellement valorisables.

En termes de limitation des ressources, on peut mettre en avant plusieurs principes qui guideront le processus de conception:

Principe 1

Le premier principe consiste à choisir des matériaux issus des filières de réemploi et de recyclage en privilégiant la réutilisation ou le réemploi de matériaux provenant d'autres sites ou chantiers en déconstruction ou en rénovation ou en privilégiant l'utilisation de matériaux issus des filières de recyclage.

Si le concepteur opte pour la réutilisation ou le réemploi de matériaux, il devra en avertir rapidement ses conseillers techniques, car ce choix peut avoir des implications sur les performances atteintes par les éléments et le bâtiment dans son ensemble, ainsi que sur le dimensionnement des éléments techniques (luminaires, radiateurs…).

Favoriser les matériaux issus des filières de recyclage peut se faire soit en utilisant des matériaux dont le processus de fabrication utilise un pourcentage élevé de matières recyclées (flocons de cellulose, laine de verre, verre cellulaire… dans le cas d'un isolant), soit en utilisant des matériaux ayant un potentiel élevé de recyclabilité en fin de vie (acier, métaux, béton, briques… dans le cas de matériaux de gros œuvre).

Dans tous les cas, il est indispensable de connaître les filières effectives de recyclage : il ne sert à rien d'utiliser des matériaux à haut potentiel de recyclage si les filières n'existent pas ou sont fort éloignées (hors Europe proche).

De son côté, le concepteur, lorsqu'il sélectionne les matériaux de construction en vue de réaliser son projet d'architecture, peut également favoriser ou faciliter le recyclage des matériaux en :

- utilisant des matériaux « homogènes » c.-à-d. qui n'aient pas subi de transformation chimique;
- favorisant les matériaux non composites (plusieurs couches de différentes matières assemblées par collage);
- favorisant les matériaux facilement démontables.

Principe 2

Le second principe consiste à utiliser des matériaux issus de ressources renouvelables avec un taux de renouvellement élevé et/ou des matériaux issus de ressources non renouvelables, mais présentes en quantité élevée et disponibles sans intervention technique importante (extraction).

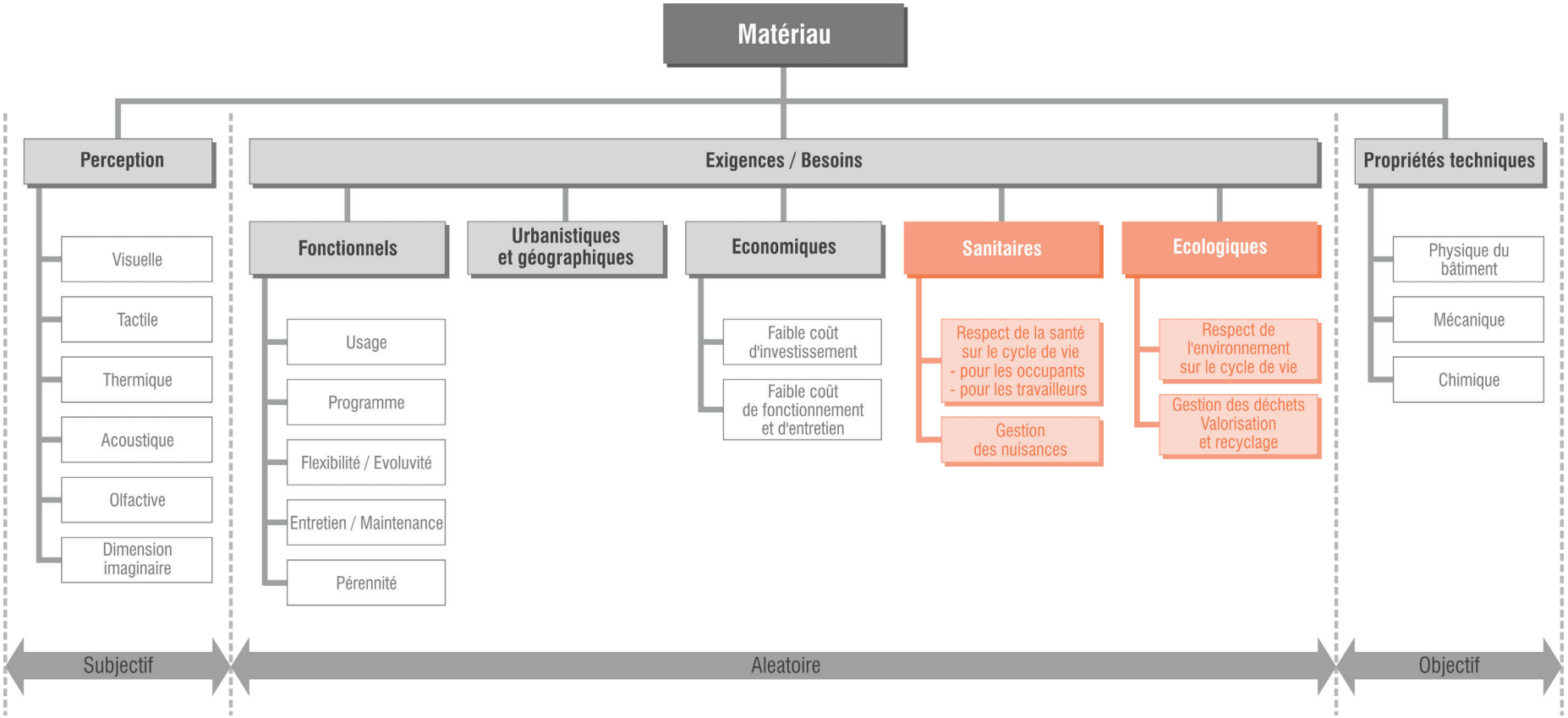
Ce principe vise à limiter autant que possible la surexploitation de certaines ressources et d'ainsi limiter les impacts sur l'environnement et la biodiversité.

Principe 3

Le troisième principe consiste à choisir des matériaux ayant subi peu ou pas de transformations lors de la phase de production. En effet, plus le procédé de fabrication est complexe, plus celui-ci nécessite de transformations, plus son impact environnemental en termes de consommation d'énergie et de pollution atmosphérique sera conséquent. Il convient donc de privilégier des produits « finis » dont la matière reste proche de la matière première d'origine. Ce principe facilite également la valorisation et le recyclage des matériaux en fin de vie.

Principe 4

Le quatrième principe consiste à choisir des matériaux de construction selon leur origine ou provenance géographique en tenant compte du mode de transport utilisé. En effet, nous avons pu démontrer au chapitre 4 que si la distance parcourue par un matériau de construc-


Matériau
Perception
Visuelle
Tactile
Thermique
Acoustique
Olfactive
Dimension imaginaire
Exigences / Besoins
Fonctionnels
Usage
Programme
Flexibilité / Evoluvité
Entretien / Maintenance
Pérennité
Urbanistiques et géographiques
Economiques
Faible coût d'investissement
Faible coût de fonctionnement et d'entretien
Sanitaires
Respect de la santé sur le cycle de vie - pour les occupants - pour les travailleurs
Gestion des nuisances
Ecologiques
Respect de l'environnement sur le cycle de vie
Gestion des déchets Valorisation et recyclage
Propriétés techniques
Physique du bâtiment
Mécanique
Chimique
Subjectif
Aleatoire
Objectif

tion influençait son bilan environnemental, le mode de transport utilisé pour parcourir cette distance a également un poids significatif dans le bilan environnemental.
Le concepteur veillera donc à choisir des matériaux locaux, régionaux ou provenant des pays proches, en limitant au maximum le transport par route.
Il privilégiera également les acheminements directs depuis l'usine de fabrication.
Le concepteur veillera également, en cas de rénovation ou de démolition, à identifier les filières de traitement et/ou de recyclage qui sont à proximité de son chantier.

Principe 5

Le cinquième et dernier principe sur l'économie des ressources consiste à privilégier les matériaux ayant un faible impact sur la consommation d'énergie grise, en choisissant, pour une même fonction et à performance équivalente, un matériau dont l'ensemble des phases du cycle de vie est économe en énergie grise totale à savoir énergie grise renouvelable et non renouvelable.
Lors de la comparaison de plusieurs produits de construction, remplissant de manière équivalente la même fonction, on prendra en compte les produits ou éléments qui maximisent le recours aux énergies renouvelables dans leur procédé de fabrication.

2.2. Choisir des matériaux de construction en fonction de leur impact sur l'environnement et sur la santé

Nous avons pu constater à travers ce chapitre que l'ensemble des processus de transformation des matériaux de construction émet des polluants qui sont à l'origine de modifications et de dommages importants tant sur l'environnement en général que sur notre patrimoine bâti et notre santé. Afin de minimiser ces effets néfastes, deux grands principes peuvent être appliqués en parallèle en tenant compte des performances des matériaux:

- Choisir les matériaux en fonction de leur impact sur l'environnement;
- Choisir les matériaux en fonction de leur impact sur la santé.

Choisir des matériaux de construction en fonction de leur impact sur l'environnement signifie que l'on va prendre en considération les procédés de transformation des matériaux sur l'ensemble du cycle de vie et leur consommation de ressources, énergétiques et non énergétiques, leur émission de polluants atmosphériques et l'impact de ceux-ci sur les grands mécanismes de régulation, leur consommation et/ou modification de paysages, leur production de déchets de construction et déchets problématiques…
Choisir des matériaux de construction en fonction de leurs effets sur la santé consiste à définir l'impact de ceux-ci sur le climat intérieur (hygrométrie) et la qualité de l'air (émissions de polluants chimiques ou physiques).

3. Développer une vision globale

Même si ce principe est présenté en fin de conclusion, il est la base même de tout principe industriel ou constructif soutenable.
En termes de bilan environnemental et sanitaire, vu les différentes problématiques parcourues dans cette partie de thèse, l'architecte ou tout autre concepteur ne peut plus aujourd'hui se limiter à intégrer quelques critères environnementaux à sa réflexion, il doit développer une vision environnementale globale et suivant deux échelles:

- l'échelle de temps: depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie du produit voire sa valorisation;
- l'échelle spatiale: depuis l'espace intérieur d'une pièce, jusqu'à l'échelle de la planète en passant par le bâtiment et la ville.

Il est évident que l'intégration de ces problématiques vient encore alourdir le travail de synthèse de l'architecte. En effet, la conception d'un projet ainsi que le choix des procédés et matériaux de construction découlent d'une multitude d'objectifs et/ou de contraintes – souvent contradictoires – qui répondent à des enjeux spécifiques.
Le choix des matériaux de construction est non seulement lié au langage architectural que le concepteur souhaite mettre en évidence et à l'expression qu'il souhaite donner à son bâtiment, mais également à des contraintes urbanistiques, économiques, fonctionnelles, constructives et techniques comme nous l'avons exprimé dans la première partie de cette thèse.
Depuis les années 90 et le rapport Brundtland, des contraintes environnementales et sanitaires sont venues s'ajouter à cette analyse multicritère déjà conséquente en introduisant la question suivante: comment minimiser l'impact environnemental d'un bâtiment lors de sa construction et de sa démolition, comment minimiser ou annuler l'impact d'un bâtiment et de ses éléments sur la santé ?
Or, en ce qui concerne ces impacts spécifiques, l'architecte, pour des raisons sur lesquelles nous ne nous attarderons pas ici, ne dispose pas toujours des connaissances ou des compétences suffisantes pour effectuer un choix adéquat ou responsable.
C'est pourquoi il est important aujourd'hui, en tant que concepteur, de se référer aux outils existants en la matière.
L'outil le plus accessible est l'écolabel ou l'écocertification qui doit toujours être mis en parallèle avec l'agrément technique (ATG, ATE,…) et les certifications de performances agréées (CSTC, CSTB, NF française, DIN allemande…).
D'autres outils, basés sur une analyse de cycle de vie, sont également à sa disposition : déclarations environnementales de produits, checklists, logiciels ACV...
L'ensemble de ces outils ainsi que la notion d'analyse de cycle de vie sont présentés dans la partie suivante de cette thèse.

Partie C

Analyse de cycle de vie et Outils existants

TABLE DES MATIERES

Chapitre 1 - Analyse de cycle de vie **198**

Historique, de l'écobilan à l'analyse de cycle de vie 198

Analyse de cycle de vie et normes en vigueur 199

Qu'est-ce qu'une analyse de cycle de vie 200

Harmonisation européenne de l'évaluation environnementale 204

Analyse de cycle de vie dans le secteur de la construction 206

Chapitre 2 - Labels environnementaux et déclarations environnementales de produit **208**

Labels dits «environnementaux» ou «écologiques» 208

Déclarations Environnementale de Produit (DEP) 211

Chapitre 3 - Outils d'aide pour l'évaluation environnementale **216**

Outils de type «Checklist» 216

Logiciels d'évaluation environnementale 216

Autres outils d'évaluation environnementale 219

Outils d'aide et méthodes d'évaluation environnementale de bâtiments 220

Conclusion de la Partie C **221**

Analyse de cycle de vie, identification, quantification et évaluation normalisée des impacts environnementaux

L'analyse de cycle de vie (ACV) est une étude complexe dont l'objectif est d'identifier, de quantifier et d'évaluer les impacts environnementaux d'un bien matériel, d'un procédé ou d'un service.
Ce type d'analyse est issu du principe même du développement durable puisque la définition présentée dans le rapport Brundtland implique la mise en œuvre de politiques économiques, sociales et environnementales qui, coordonnées et intégrées, visent à satisfaire les besoins des populations d'aujourd'hui sans compromettre ceux des populations futures.
Cette définition, basée sur une notion de « besoin » et de « limite » implique donc une connaissance approfondie des réserves terrestres (et leur temps de renouvellement), mais également une connaissance détaillée des impacts liés à l'utilisation de ces réserves.

L'ACV fournit une méthode qui permet de quantifier les impacts sur l'environnement d'un produit depuis l'extraction des matières premières qui le composent, jusqu'à son élimination en fin de vie, en passant par les phases de distribution et d'utilisation.
L'ensemble de ces étapes successives sont définies par un «cycle» c.-à-d.comme un enchaînement de transformations subies par la/les matière(s) ou le matériau tout au long de la durée de vie de celui-ci.
Cette notion de cycle est variable et dépend du nombre et du type de phases considérées:

- cycle « du berceau à la porte » (« cradle to gate » en anglais): comprend les phases d'extraction, de transport et de fabrication ou production. Le cycle s'arrête au produit « fini » qui sort d'usine;
- cycle du « berceau à la tombe » (« cradle to grave » en anglais): comprend l'ensemble des phases depuis l'extraction jusqu'à la fin de vie en tenant compte des différentes phases de transport;
- cycle du « berceau au berceau » (« cradle to cradle » en anglais): comprend l'ensemble des phases depuis l'extraction jusqu'à la fin de vie, y compris les phases de transport et la phase de recyclage où le matériau»déchet» est considéré comme une matière première pour un autre cycle de production.

L'ACV ne s'attache pas qu'au produit. Elle étudie également la fonction du produit et permet donc la comparaison des produits entre eux pour une fonction donnée.
Elle s'inscrit dans l'optique de réduire la pression d'un produit sur l'environnement tout au long de son cycle de vie. L'information globale qu'elle fournit est un outil d'aide à la décision en matière de choix industriels (conception, amélioration…) et de politiques publiques.

1. Historique : de l'écobilan à l'ACV

L'apparition de l'analyse du cycle de vie et son développement coïncide avec la prise de conscience collective de l'épuisement des ressources naturelles et de l'augmentation de la pollution engendrée par les activités

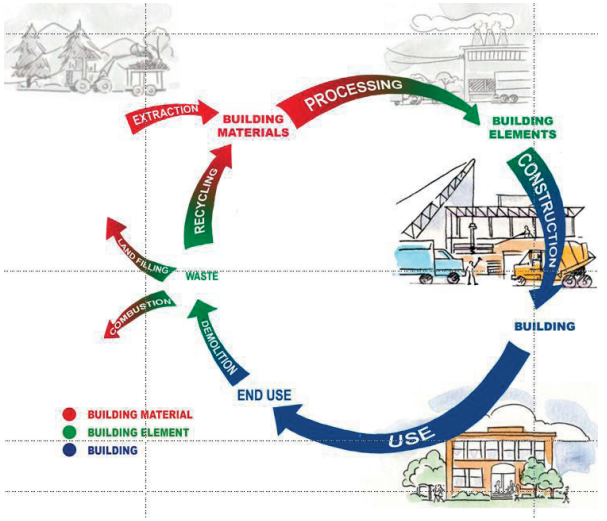


Illustration C1.01 : Cycle de vie d'un matériau, d'un élément de construction et d'un bâtiment - Source: [DEBACKER 2008]

humaines.
Les chocs pétroliers de 1973 et 1979 ont amené les pays occidentaux à prendre conscience du caractère « épuisable » de certaines ressources naturelles comme les combustibles fossiles et de la nécessité d'une gestion rationnelle et prévoyante de celles-ci.
Les grandes catastrophes des années 80 – les famines et épidémies en Afrique, les fuites de pesticides de l'usine de Bhopal en Inde (1984), la découverte de la destruction de la couche d'ozone stratosphérique par certains gaz (1985) ou encore l'accident nucléaire de Tchernobyl (1986) – ont conscientisé l'opinion publique et politique à la pollution et aux risques sanitaires engendrés par les activités humaines , ainsi qu'à la nécessité de modifier nos rapports à l'environnement suivant les principes de précaution, d'équité et de responsabilité commune repris dans la déclaration de Rio (1992).
La première ébauche d'ACV est réalisée en 1969 par l'industriel Coca-Cola Company dont l'objectif est de déterminer de manière précise, par une étude multicritères, le meilleur choix entre un emballage en verre et un emballage en plastique, entre une production en interne ou en externe de l'emballage ainsi que le meilleur choix de fin de vie (recyclage ou non) pour le type d'emballage retenu. Cette étude a tenu compte de l'ensemble des impacts environnementaux sur un cycle de vie « du berceau à la tombe ». Contre toute attente, ce fut la bouteille plastique[1] qui apparut comme étant la meilleure alternative.
Dans les années 70, après les deux grands chocs pétroliers de 1973 et 1979, dans un contexte énergétique peu favorable, apparaît la nécessité pour les industriels d'optimiser leurs consommations d'énergie. Ces premières études sont essentiellement basées sur la consommation des ressources énergétiques ; sans tenir compte des conséquences de l'utilisation de celles-ci sur l'environnement.
C'est seulement à partir des années 90 que se met en place une approche multicritères, appelée « écobilan » , qui prend en compte l'ensemble du cycle de vie d'un produit et qui inventorie à chaque étape son bilan environnemental.
Cette période voit l'apparition progressive des outils normatifs avec :

- en 1992, la présentation d'un premier schéma européen sur les écolabels ;
- en 1995 – 1996, la réalisation d'un standard d'échange de données environnementales (SPOLD) ;
- en 1997, la parution des normes européennes ISO 14040, 41, 42, 43 (Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadres)
- en 1999, la parution des normes européennes ISO 14020, 25, 48, 49 (Marquages et déclarations environnementaux - Déclarations environnementales de type III - Principes et modes opératoires)

Depuis 2006, la norme 14040 a été révisée et les normes 14041, 42, 43 remplacées par la norme 14044 « Management environnemental – Analyse de cycle de vie – Exigences et lignes directrices »

2. Analyse du cycle de vie et normes en vigueur

Remarque préalable:
Nous passerons en revue l'ensemble des normes qui régissent la réalisation d'analyse du cycle et les certifications (labels, déclaration environnementale…).
Il est en effet impératif pour l'organisme qui réalise une analyse de cycle de vie de s'y référer afin que le travail effectué soit reconnu, crédible et reproductible.
L'ensemble des informations reprises ci-dessous provient de l'Organisation internationale de normalisation (ISO)[2]

2.1. La norme ISO 14040 (2006) «Management environnemental - Analyse de cycle de vie -- Principes et cadre»

L'ISO 14040 spécifie les principes et le cadre applicables à la réalisation d'analyses du cycle de vie (ACV) comprenant: la définition des objectifs et du domaine d'application de l'ACV, la phase d'inventaire du cycle de vie, la phase d'évaluation de l'impact du cycle de vie, la phase d'interprétation du cycle de vie, la communication et la revue critique de l'ACV, les limitations de celle-ci, la relation entre les phases de l'ACV et les conditions d'utilisation des choix de valeurs et des éléments facultatifs.
Elle traite des études d'analyse de cycle de vie et des études d'inventaire du cycle de vie (ICV). Elle ne décrit pas en détail la technique de l'analyse de cycle de vie, ni les méthodologies spécifiques de chacune de ses phases.
L'application envisagée pour les résultats de l'ACV ou de l'ICV soit prise en considération lors de la définition des objectifs et du domaine d'application. En revanche, l'application en tant que telle se situe en dehors du domaine d'application de cette norme.

2.2. La norme ISO 14044 (2006) «Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Exigences et lignes directrices »

Cette norme spécifie les exigences et fournit les lignes directrices pour la réalisation d'analyses de cycle de vie (ACV) comprenant: la définition des objectifs et du champ de l'étude, la phase d'inventaire du cycle de vie, la phase d'évaluation de l'impact du cycle de vie, la phase d'interprétation du cycle de vie, la communication et la revue critique de l'ACV, les limitations de celle-ci, la relation entre les phases de l'analyse du cycle de vie et les conditions d'utilisation des choix de valeur et des éléments facultatifs.
Elle traite des études d'analyse du cycle de vie et des

1 Cette étude ne fut jamais publiée dans son intégralité, seul un résumé de l'étude fut publié en avril 1976 dans « Sciences Magazine »

2 ISO : http://www.iso.org/iso/fr/iso_catalogue

études d'inventaire du cycle de vie.
Elle révise les précédentes normes ISO 14040, 41, 42 et 43.

2.3. La norme ISO 14020 (2000) « Étiquettes et déclarations environnementales -- Principes généraux »

Cette norme établit les principes directeurs pour le développement et l'utilisation des étiquettes et déclarations environnementales.
Il est prévu qu'elle soit utilisée conjointement avec d'autres normes applicables de la série ISO 14020.
Cette norme n'est pas destinée à être utilisée à des fins de certification ou d'enregistrement.
Il est prévu que les autres normes internationales de la même série soient compatibles avec les principes établis dans la présente norme. Il s'agit des normes ISO 14021, ISO 14024 et ISO/TR 14025.

2.4. La norme ISO 14024 (1999) «Marquage et déclarations environnementaux -- Étiquetage environnemental de type I -- Principes et méthodes »

Cette norme établit les principes et les méthodes pour la mise au point de programmes d'étiquetage environnemental de type 1, comprenant le choix de catégories de produits, de critères environnementaux et des caractéristiques fonctionnelles du produit, et pour l'évaluation et la preuve de conformité.
Elle établit également les méthodes de certification pour l'attribution du label.

2.5. La norme ISO 14021 (1999) «Marquage et déclarations environnementaux -- Autodéclarations environnementales (Étiquetage de type II) »

Cette norme spécifie les exigences relatives aux autodéclarations environnementales, y compris les affirmations, symboles et graphiques qui concernent les produits. Elle décrit en outre les termes choisis, couramment utilisés dans les déclarations environnementales et donne des conditions à leur utilisation.
Elle décrit également une méthodologie générale d'évaluation et de vérification pour les autodéclarations environnementales ainsi que des méthodes spécifiques d'évaluation et de vérification des déclarations sélectionnées.
Cette norme n'empêche, n'annule ni ne modifie en aucune façon les informations, les déclarations ou l'étiquetage relatifs à l'environnement ou toutes autres exigences réglementaires.

2.6. La norme ISO 14025 (2006) «Marquages et déclarations environnementaux -- Déclarations environnementales de Type III -- Principes et modes opératoires »

Cette norme établit les principes et les procédures de développement de déclarations environnementales de Type III et des programmes correspondants. Elle établit spécifiquement l'utilisation de la série de normes ISO 14040 pour le développement de déclarations environnementales de Type III et des programmes correspondants.
La norme ISO 14025 établit également les principes relatifs à l'utilisation d'informations environnementales additionnelles.
Les déclarations environnementales de Type III décrites par la norme ISO 14025 sont principalement destinées à une communication interentreprises, mais leur utilisation pour la communication entre une entreprise et des particuliers dans certaines conditions n'est pas exclue.

2.7. La norme ISO 14048 (2002)

Cette norme fournit des exigences et une structure pour un format de documentation de données à utiliser en vue d'une documentation transparente et claire, afin de faciliter l'échange de données d'analyse de cycle de vie et d'analyse d'inventaire de cycle de vie.
La spécification et la structuration de l'information pertinente permettent ainsi d'avoir une documentation des données cohérente, un rapport sur la collecte, le calcul et la qualité des données.

2.8. La norme ISO 14049 (2000) « Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Exemples d'application de l'ISO 14041 traitant de la définition de l'objectif et du champ d'étude et analyse de l'inventaire »

L'objectif de ce document est de fournir des exemples sur les méthodes de réalisation d'un inventaire du cycle de vie comme moyen de satisfaire certaines dispositions de l'ISO 14041.
Ces exemples ne représentent qu'un échantillon des exemples susceptibles de répondre aux dispositions de la norme. Il convient de les considérer comme un « moyen » ou « des moyens » représentatifs plutôt que comme « la seule façon » de mettre en pratique la norme.
A ce titre, ils ne correspondent qu'à certaines parties d'une étude de l'inventaire du cycle de vie.

3. Qu'est-ce qu'une ACV ?

L'analyse du cycle de vie est une étude multicritères permettant d'identifier, de quantifier et d'évaluer les impacts environnementaux d'un « produit » sur tout son cycle de vie.
Elle peut être considérée comme un modèle de transformations mathématiques permettant de transformer des flux de matières et d'énergie en impacts environnementaux potentiels.
Dans un premier temps, l'analyse du cycle de vie inventorie les flux de matières et d'énergie entrants et sortants à chaque étape du cycle de vie. C'est ce qu'on appelle l'inventaire du cycle de vie ou ICV (« LCI » en anglais).
Une fois l'ensemble des flux inventoriés, l'analyse du cycle de vie identifie et évalue ensuite les impacts environnementaux liés à ces flux grâce à des coefficients

préétablis permettant de calculer la contribution de chaque flux aux divers impacts environnementaux.
Selon la norme ISO 14044, les impacts environnementaux devant être obligatoirement traités sont les suivants : l'épuisement des ressources naturelles, l'effet de serre, l'acidification, l'eutrophisation, la diminution de la couche d'ozone stratosphérique et la formation d'ozone photochimique.
D'autres impacts (non obligatoire cependant) peuvent être pris en compte comme l'écotoxicité ou la toxicité pour l'être humain.
Lorsqu'on analyse les impacts environnementaux, les phénomènes en jeu et leurs interactions sont complexes et peuvent être source d'incertitude quant à la valeur ou ampleur réelle de l'impact sur l'environnement.
En effet, les conséquences réelles des rejets (flux sortants) dépendent de différents facteurs dont notamment les caractéristiques du milieu récepteur, de l'effet de synergie ou d'antagonisme avec d'autres rejets,etc.
C'est pourquoi une ACV ne définit pas des « impacts » mais des « impacts potentiels »

A titre d'exemple, nous présentons ici l'impact potentiel «Consommations des ressources naturelles énergétiques »
Les ressources dont on tient compte sont toutes les ressources qui servent de sources d'énergie dans le cycle de vie du produit analysé (pétrole, gaz naturel, uranium, bois, charbon). Ces consommations sont exprimées sous forme de flux de matière (en kg) et sous forme de flux énergétique (en MJ).
En termes de flux énergétiques, l'analyse fait la différence entre la part d'énergie renouvelable (issues de ressources non épuisables) et la part d'énergie non renouvelable. Elle donne également des informations quant à la part d'énergie stockée par le produit (énergie matière - cas du bois notamment) par rapport à l'énergie consommée.

Les résultats d'une analyse du cycle de vie sont donc exprimés sous forme d'une série de résultats présentant à la fois:

- des flux physiques (xxMJ d'énergie non renouvelable, yy MJ d'énergie renouvelable, zz kg de matières premières…);
- des impacts potentiels (xx kgCO_2 équivalents, yy kg SO_2 équivalents,…).

Pour exprimer ces résultats, on définit au préalable l'unité fonctionnelle, élément de mesure qui permet de quantifier la fonction remplie par le produit étudié.
Cette unité fonctionnelle permet de clairement comparer deux produits ayant la même fonction.
L'analyse du cycle de vie ne vise pas à couvrir l'ensemble de la problématique environnementale : seul ce qui est quantitatif (mesurable) et extensif (sommable) est pris en compte. On peut donc parler plutôt de comptabilité environnementale.
Ainsi les critères ou impacts potentiels ne sont pas obligatoirement pris en compte dans les ACV :

- L'impact des activités sur les paysages (« land use » en anglais);
- L'impact des nuisances engendrées par les activités: bruit, odeurs;
- L'impact de la toxicité potentielle des produits émis, que ce soit sur l'environnement (« ecotoxicity » en anglais) ou sur l'être humain (« human toxicity » en anglais);

3.1. A quoi sert une analyse de cycle de vie?

L'objectif de l'analyse de cycle de vie est de présenter une vision globale des impacts générés par des produits même s'il subsiste encore aujourd'hui entre scientifiques des incertitudes quant à l'évaluation de certains impacts comme notamment l'évaluation de l'utilisation de territoire ou la toxicité du produit sur l'être humain.
L'enjeu majeur dans l'utilisation d'une ACV est d'identifier les principales sources d'impacts environnementaux et d'arbitrer les augmentations ou diminutions de « pollutions » liées aux différentes alternatives envisagées.
L'illustration C1.02 ci-dessous présente de manière schématique ces transferts de pollutions entre deux alternatives ayant la même fonction :

- l'analyse du produit (1) montre que l'impact environnemental majeur est généré par l'utilisation des ressources naturelles;
- l'alternative, le produit (2) réduit cet impact, mais engendre une augmentation de celui à d'autres étapes.

Les transferts de pollution peuvent concerner des impacts différents : le choix d'un produit permet de diminuer l'utilisation des ressources naturelles lors de la production, mais engendre une augmentation de l'acidification de l'atmosphère lors de la production et de l'élimination.

3.2. Les étapes d'une ACV

L'analyse de cycle de vie est articulée en quatre grandes étapes, comme le présente l'illustration C1.03.
Le processus de l'analyse est itératif, car chaque étape peut amener à revoir les précédentes; ainsi des difficultés dans l'obtention de données pour l'inventaire peuvent amener à revoir les objectifs et le champ d'étude. L'ensemble de ces quatre étapes est décrit et régi par la norme ISO 14044[3].

Objectifs et champs d'étude

La première étape est la définition des objectifs et du champ d'étude. Cette étape est primordiale dans la compréhension et le développement de l'analyse. Elle se décompose également en plusieurs parties :

- La définition de l'objectif de l'étude

Ce premier pas de l'étude vise à définir pour qui et pour quoi l'étude est réalisée. L'objectif doit refléter la raison qui pousse à cette analyse, par exemple,l'identification

3 La norme ISO 14044 : Gestion environnementale - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices. Cette nouvelle norme, avec la version de 2006 de ISO 14040, annule et remplace ISO 14041:1999, ISO 14042:2000 et ISO 14043:2000

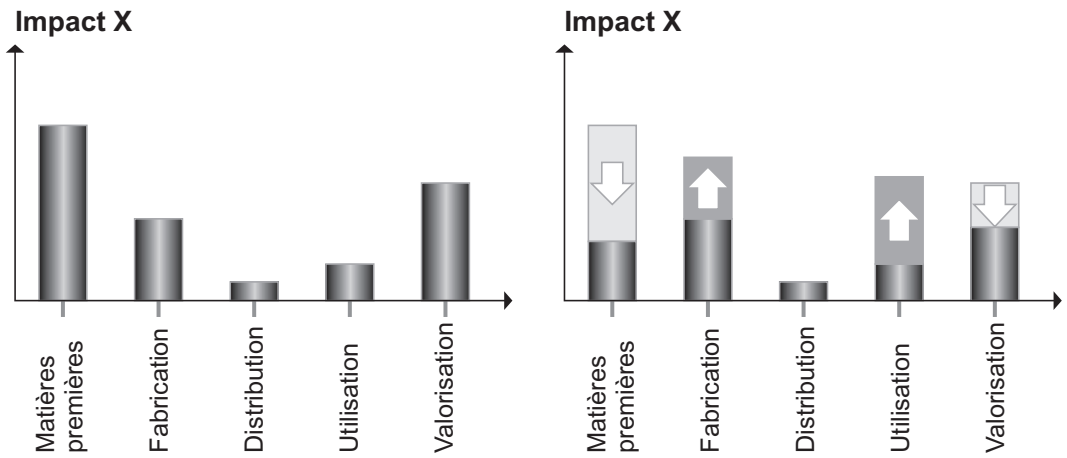


Illustration C1.02 : Comparaison entre un produit X et sn alternative Y

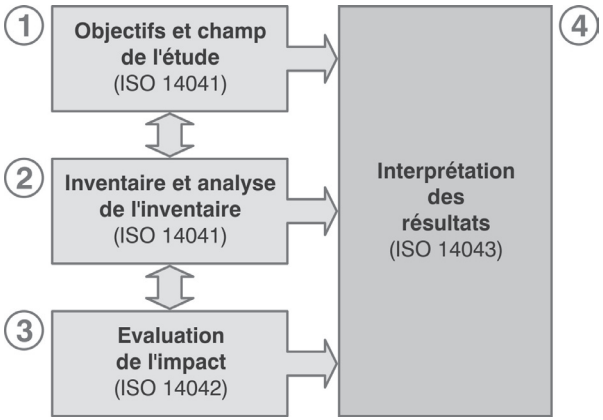


Illustration C1.03 : Les quatres étapes de l'analyse de cycle de vie

des principaux impacts d'un produit ou le choix d'un produit par rapport à un autre ayant la même fonction.

- La fonction

La fonction joue un rôle central, car c'est en définissant correctement la fonction qu'il sera possible de comparer des produits, mais également de définir correctement les frontières du système à l'étude.

Exemple de fonction pour une peinture: protéger et colorer un mur.

- l'unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle représente une quantification de la fonction. C'est à partir de cette unité qu'il sera possible de comparer des scénarios a priori différents. Comme toute unité, elle se doit d'être précise, mesurable et additive.

Dans le cas de la fonction «protéger et colorer un mur », l'unité fonctionnelle pourrait être de couvrir 1 m² de mur pendant 10 ans.

La fonction et l'unité fonctionnelle ainsi définies sont suffisamment ouvertes pour comparer des peintures entre elles, mais aussi du papier mural qui possède la même fonction.

- les paramètres clés

Les paramètres environnementaux clés sont des paramètres qui, pour un produit donné, vont influencer la capacité à rencontrer l'unité fonctionnelle définie. Typiquement entrent en jeu des questions de durée de vie, de nombre d'utilisations possibles, d'efficacité, etc.

Pour une peinture, les paramètres clés peuvent être la durée de vie d'une couche de peinture et la quantité de peinture nécessaire pour couvrir adéquatement une surface.

- le flux de référence

Le flux de référence désigne la quantité du produit analysé et de consommables utilisés par ce produit nécessaire pour rencontrer les besoins de l'unité fonctionnelle.

Dans le cas de la protection d'un mur, le flux de référence pourrait être 5 kg pour une peinture de bonne qualité nécessitant seulement 2 couches en 10 ans et 8 kg pour une peinture de moins bonne qualité nécessitant 3 couches en 10 ans.

- les frontières du système ou de l'analyse

Une fois la fonction et ses attributs clairement définis, il convient de définir les limites du système qui sera étudié et qui permettra de rencontrer les besoins de la fonction.

Comme expliqué plus haut, le système de l'étude est généralement décomposé en processus élémentaires (extraction des matières premières, transport, 1re transformation ....).

Selon la théorie, chaque processus élémentaire fournissant un intrant pour le produit final doit être pris en compte. Cependant, un processus élémentaire dont les données préliminaires montrent que la contribution est infime peut être retiré selon des critères d'exclusion à définir.

Les étapes suivantes généralement considérées sont les suivantes:
- l'acquisition des matières premières et les sources d'énergie;
- le transport et la distribution;
- les étapes de production;
- l'utilisation du produit;
- la gestion de la fin de vie (recyclage, destruction, entreposage, revalorisation, etc.);
- la production/vie/fin de vie des infrastructures nécessaires à toutes ces étapes.

Dans la plupart des cas, l'analyse de cycle de vie consiste en une analyse dite « cradle to gate » c.-à-d. qui prend en compte les différentes phases du cycle depuis l'extraction des matières premières jusqu'au produit fini qui sort d'usine.

Inventaire et analyse de l'inventaire

La seconde étape de l'analyse du cycle de vie est l'inventaire et l'analyse de l'inventaire. L'étape d'inventaire d'analyse du cycle de vie (ICV) consiste à inventorier tous les flux entrants/sortants pour chaque processus du cycle de vie.

Deux types de flux sont identifiés :
- les flux économiques qui sont les flux de matière, d'énergie, de services, etc. échangés entre les processus élémentaires et les systèmes extérieurs ;
- les flux élémentaires qui sont des flux échangés avec l'écosphère (matières premières, déchets, émissions…)

L'inventaire et son analyse se font en 4 étapes:

- Quantification de tous les flux économiques et élémentaires

A chaque étape du système (processus élémentaire), on va quantifier tous les flux entrants et tous les flux sortants.

- Mise à l'échelle des flux économiques et élémentaires

Tous les flux économiques et élémentaires sont mis à l'échelle en fonction du flux de référence. Cette opération consiste à prendre en considération la « quantité du produit final » étudiée.

Exemple:
- 5 kg de peinture pour une peinture performante
- 8 kg de peinture pour une peinture moins performante

- Quantification des émissions et extractions pour chaque processus élémentaire

L'objectif est de quantifier, à chaque étape du cycle de vie, tous les éléments qui ont un impact environnemental.

- Agrégation des flux élémentaires

Toutes les données récoltées pour une même source d'impact sont agrégées.

Par exemple, les émissions de tous les gaz à effet de serre, pour toutes les étapes du cycle de vie, sont additionnées en une seule valeur.

Évaluation des impacts

La troisième étape consiste en l'évaluation des impacts du cycle de vie.

Cette étape importante de l'analyse du cycle de vie vise à transformer l'inventaire des flux en une série d'impacts clairement identifiables. Elle prend comme données d'entrée l'analyse de l'inventaire du cycle de vie, c'est-à-dire une liste de flux entrants (matières premières, matières transformées, énergies) et sortants (rejets, déchets, émissions, etc.) agrégés sur l'ensemble du système de produit, à toutes ses étapes de vie.

Ces flux vont être agrégés dans des catégories d'impact pour ensuite donner des indicateurs de catégorie.

Il existe plusieurs méthodes pour réaliser une telle évaluation. Ces méthodes se distinguent en deux catégories en fonction de leur positionnement sur le continuum de la chaîne de cause à effet.

La chaîne de cause à effet pour les problématiques environnementales est assez complexe.

On peut généralement distinguer à la fois:
- des « effets primaires », découlant directement des activités étudiées, comme l'émission de gaz CFC;
- des « effets secondaires », qui sont en fait les conséquences comme, par exemple, la destruction de la couche d'ozone stratosphérique, résultant en une augmentation des rayons UV touchant le sol, ce qui cause des problèmes de cataracte et de cancer.

Les méthodes utilisées pour l'évaluation des impacts sont les suivantes:
- Les méthodes orientées « problème » (mid-point en anglais) qui vont catégoriser les effets primaires.
  Exemple : EDIP (Danemark), IMPACT 2002+ (Suisse) ou TRACI (États-Unis)
- Les méthodes orientées « dommages » (end-point en anglais) vont s'attacher à regrouper les impacts en fonction des effets secondaires, aussi loin que possible dans la chaîne de « cause à effet ». Ces méthodes présentent l'avantage de montrer plus clairement l'impact ainsi que les dommages induits sur la santé ou l'environnement. C'est pourquoi ces méthodes sont souvent préférées aux premières.
  Exemple : Eco-Indicator 99 (Pays-Bas)

L'évaluation des impacts du cycle de vie se fait également en plusieurs étapes :

- Choix des catégories d'impacts

De manière générale, on choisira des catégories « problèmes » ou des catégories « dommages ».

- Classification

Cette étape vise à classer chaque élément de l'inventaire du cycle de vie dans les catégories d'impact choisies.

Cette classification n'est pas toujours facile à établir.

En effet certaines substances peuvent avoir des impacts multiples selon deux modes :
- en parallèle : une substance a deux impacts simultanés;

  Exemple : le dioxyde de soufre (SO_2) est en même temps une

cause d'acidification de l'environnement et provoque chez l'être humain des problèmes respiratoires notamment.

- en série : une substance a un impact avec une conséquence nocive (environnement ou santé) qui elle-même devient la cause d'un autre impact

  Exemple : le dioxyde de soufre (SO_2) provoque une acidification de l'environnement, ce qui provoque la mobilisation de certains métaux avec des effets écotoxiques et toxiques.

Il faut donc s'assurer qu'il n'y ait pas de redondance des sources ou des impacts.

• Caractérisation

L'objectif est de caractériser les entrants et les sortants en fonction du degré de contribution à un impact. Ceci amène à convertir tous les éléments participants à un impact en une mesure commune permettant de faire ressortir un indicateur.

Exemple : en termes de réchauffement climatique et émissions de gaz à effet de serre, le CO_2 est présenté comme la substance de référence ; l'ensemble des gaz participant à cet impact sont convertis en équivalent CO_2.

• Agrégation des flux élémentaires

Toutes les données récoltées pour une même source d'impact sont agrégées.

Exemple : toutes les émissions de gaz à effet de serre, pour toutes les étapes du cycle de vie, sont additionnées en une seule valeur.

Interprétation des résultats

La dernière étape est l'interprétation des résultats. Cette étape vise à analyser les résultats ; à établir des conclusions et à expliquer les limites de l'analyse réalisée. Deux points doivent être soulignés :

• La transparence des résultats

Les résultats fournis doivent être transparents, conformes à la définition du champ de l'étude, complets et facilement compréhensibles.

• Les limites de l'analyse

Dans le cadre d'une analyse du cycle de vie, le processus utilisé est aussi important que les résultats obtenus. Il y a donc lieu de laisser le processus d'analyse ouvert et compréhensible de manière à ce que le lecteur puisse lui-même juger ou critiquer l'analyse réalisée.
L'interprétation doit également mettre en avant les méthodes employées pour la vérification des résultats

L'importance de la définition de l'objectif et du champ de l'étude

Dès le début de l'étude, les objectifs et les utilisations des résultats de l'analyse du cycle de vie doivent être clairement énoncés. En effet, le principe fondamental de l'analyse du cycle de vie est que le résultat dépend de l'objectif fixé.
C'est pourquoi l'analyse de cycle de vie d'un matériau de construction X produit par un fabricant particulier connaissant avec précision les distances de transport, la composition, les modes d'énergie utilisés et le processus de fabrication ne donnera pas le même résultat qu'une analyse de cycle de vie d'un matériau européen réalisée sur base de moyennes représentatives de la production européenne.
Ainsi, afin d'éviter toute mauvaise interprétation ou généralisation abusive des résultats, l'objectif et le champ d'étude doivent clairement présenter la problématique étudiée. Par ailleurs, la sélection des données nécessaires à l'étude se fera en rapport à l'objectif.

3.3 Où trouve-t-on les données d'inventaire pour la réalisation d'une analyse du cycle de vie?

Les données d'inventaire reprennent les flux de matières (ressources végétales, ressources minérales, eau, …) et d'énergie qui rentrent dans le système étudié et les flux sortants correspondant (déchets, émissions…).
Il existe aujourd'hui des bases de données d'inventaire disponibles en ce qui concerne les matières premières courantes, l'énergie, les transports, les émissions… La base de référence actuelle est la base de données ECOINVENT[4] qui regroupe les principales données publiées au niveau européen.
De plus en plus de fabricants, de groupement ou fédérations professionnelles rassemblent également et de manière volontaire des données sur la consommation des ressources naturelles utilisées et les impacts environnementaux de leur matériau, le plus fréquemment sur les premières phases du cycle de vie à savoir depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la sortie d'usine, selon une approche « cradle to gate ».
La collecte de ces données est aussi et de plus en plus réalisée au travers de recherches et de publication scientifiques. On peut notamment citer le travail effectué par le BRE[5] (Buildings Research Establishment) et par la plate-forme suisse ECO-BAU[6] (plate-forme commune des offices et services de construction suisse) ou l'institut autrichien d'IBO[7] (Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie , Ökologisch Bauen and Gesund Wohnen).

4. Harmonisation européenne des analyses de cycle de vie et de l'évaluation environnementale

Dans la mesure où il existe plusieurs types d'analyse (cradle to gate et cradle to grave), plusieurs méthodes d'évaluation des impacts et plusieurs catégories d'impact, le cadre actuellement défini par la norme ISO 14040 n'est pas suffisant pour permettre une comparaison aisée entre plusieurs analyses de cycle de vie de produit de construction.
C'est pourquoi une harmonisation européenne est né-

4 la base de données d'inventaire ECOINVENT est née de l'initiative du Centre Ecoinvent - Swiss Centre for Life Cycle Inventories: http://www.ecoinvent.org
5 BRE: http://www.bre.co.uk
6 ECOBAU : http://www.eco-bau.ch
7 IBO : http://www.ibo.at

cessaire, notamment au niveau des méthodes utilisées. Cette harmonisation fait partie des missions du CEN/TC350 qui est le comité technique du CEN (Comité européen de Normalisation) chargé d'élaborer des normes relatives à la «durabilité des ouvrages de construction». Ces normes sont organisées en trois domaines (social, économique et environnemental) et réparties selon trois niveaux : le système, le bâtiment et le matériau.

Les normes qui nous intéressent dans le cadre de cette thèse sont celles qui concernent le bâtiment et les matériaux.

Actuellement, un travail est en cours sur l'harmonisation des Déclarations Environnementales de Produits[8], tant au niveau de leur contenu que de leur format de communication. La norme, dont le processus d'approbation est en cours, résultant de ce travail est la suivante :

prEN 15804 – Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products

Étant donné qu'une déclaration environnementale de produit est généralement basée sur une ACV, cette norme devrait contenir des indications sur la méthode à utiliser pour effectuer une analyse de cycle de vie. On s'attend ainsi à une définition précise des différents types d'analyse – « cradle to gate » ou « cradle to grave » – à la définition, pour chacune d'entre elles, de toutes les phases de la vie d'un matériau à y inclure (frontières du système), de la manière de prendre en compte les différents entrants et sortants, des unités fonctionnelles à utiliser, des procédures de calcul, etc.

Sans rendre l'ACV obligatoire, le développement de cette méthodologie permettra de définir un cadre commun et européen pour la réalisation d'ACV et d'ainsi pouvoir facilement comparer différents produits entre eux, sans que le lieu de réalisation de l'analyse influence le résultat.

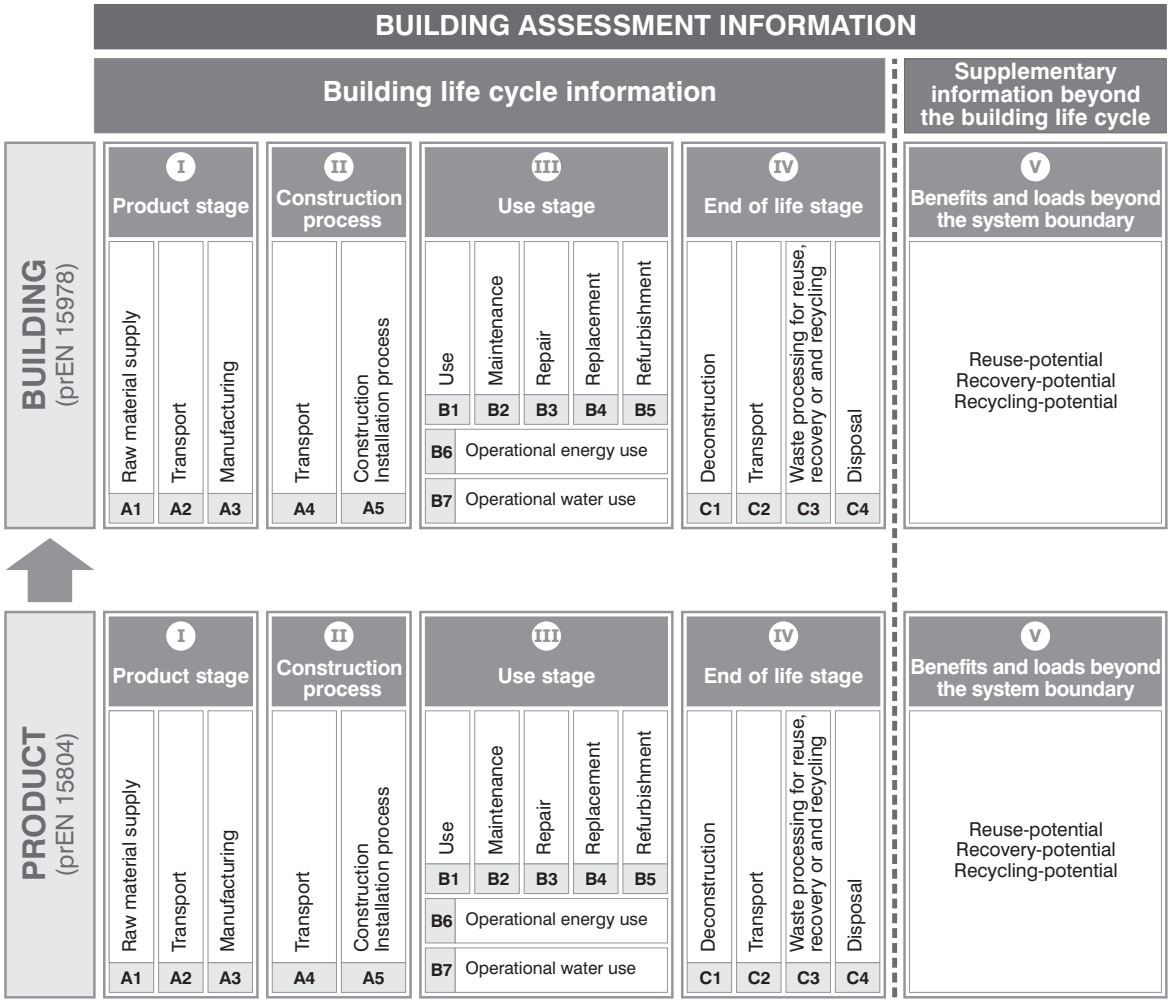


Illustration C1.04 : ACV d'un bâtiment et ACV d'un produit selon les projets de norme prEN15978 et prEN15804

8 Déclarations environnementales de Produit: voir chapitre 2

La mise en place d'un cadre normatif et législatif qui généraliserait l'usage de l'analyse de cycle de vie à tous les produits de construction mis sur le marché, même si celle-ci est effectuée de manière générique sur un produit ou un groupe de produits, rendrait la situation beaucoup plus transparente et les données beaucoup plus accessibles et fiables que ce n'est le cas aujourd'hui.

5. L'analyse du cycle de vie et le secteur de la construction

5.1. L'analyse de cycle de vie et le producteur belge de matériaux de construction

Bien que les producteurs belges de matériaux de construction aient pris conscience de l'importance de communiquer l'impact environnemental de leurs produits aux maîtres d'ouvrages, aux concepteurs et aux entrepreneurs peu d'entre eux ont, à ce jour, élaboré des ACV de leurs produits et cela pour diverses raisons:

- l'élaboration d'ACV engendre des coûts considérables que les petites entreprises ont du mal à supporter;
- le marché belge est nettement moins grand que le marché britannique ou français, par exemple, ce qui fait que les investissements réalisés pour une ACV pour un produit belge sont beaucoup plus lourds à supporter;
- les résultats de l'ACV ne sont généralement utilisés que pour l'optimisation interne du produit et du processus de production, de sorte qu'ils n'arrivent que rarement aux oreilles du grand public;
- la collecte de toutes les informations nécessaires pour une ACV n'est pas évidente, notamment parce que les bases de données environnementales existantes contenant des données ICV sont encore insuffisantes.

Cependant, les mentalités évoluent. En 2008, seule la société «Carrières de Pierre Bleue Belge» avait élaboré et rendu publique une ACV pour deux de leurs produits. Aujourd'hui, les cimentiers, les bétonniers et les briquetiers ont également réalisé des ACV pour plusieurs de leurs produits sans pour autant les rendre publiques.
D'autres fabricants, présents sur le marché international, ont déjà réalisé des ACV en France, en Suisse ou encore en Angleterre et sont en attente d'un cadre réglementaire en Belgique (voir point 2.5).

5.2. L'analyse de cycle de vie et la conception d'un projet d'architecture

L'ACV d'un produit ou d'un matériau de construction, en tant que telle, ne peut être considérée comme un outil adéquat pour le concepteur ou l'architecte et ce pour plusieurs raisons.
L'ACV est une étude visant à identifier, quantifier et évaluer les impacts environnementaux d'un produit spécifique suivant une unité fonctionnelle et un flux de matières de références.
Or le travail de l'architecte consiste à imaginer, concevoir et construire des bâtiments ou des espaces construits. Ce faisant, il assemble des matériaux pour composer des parois. Ces parois, elles –même assemblées forme un espace construit ou un bâtiment en répondant non seulement à des exigences de performances, des exigences techniques, mais également des exigences esthétiques.
Dans le travail de l'architecte, le bâtiment, les éléments et les matériaux qui le composent sont considérés comme un tout indissociable.
Le travail à fournir par l'architecte pour rassembler l'ensemble des données ACV relatives à son bâtiment est trop important et nécessite un temps considérable.
En outre, lorsque l'architecte recherche une information sur un produit de construction, celle-ci doit être rapidement disponible et accessible, vu le peu de temps qu'il a à consacrer à ce type de recherche.
Or, l'ACV est une étude complexe dont les résultats sont présentés dans un rapport de plusieurs dizaines de pages.L'ACV reste de plus, une énumération de chiffres difficile à interpréter sans de bonnes connaissances techniques.

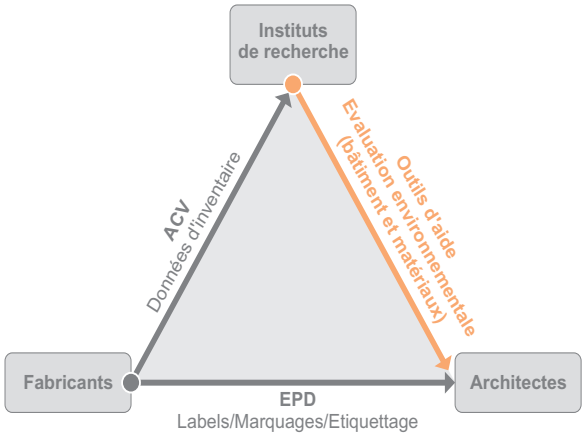


Illustration C1.05 : Triangle de communication entre fabricant, architecte et institut de recherche

Cependant, il est clair que l'analyse de cycle de vie est un outil important en terme de communication. Sur base de la figure C1.05 présentée ci-dessus, l'analyse du cycle de vie permet une grande diversité d'applications et de modes de communication.
On peut notamment citer les trois types de marquage et certification européens (I, II, III) régis par les normes ISO 14021, 24 et 25, dont les Ecolabels et les Déclarations Environnementales de Produit (DEP).
Si les labels «environnementaux» et les DEP sont des outils de communication directe entre le fabricant et l'architecte, voire l'utilisateur, l'ACV est un moyen de communication entre le secteur industriel et le secteur de la recherche: nombreux sont les instituts de recherches belges qui souhaiteraient travailler main dans la main

avec les producteurs de matériaux en vue d'élaborer une base de données ICV qui serait également la base d'un outil d'évaluation environnementale à l'usage des concepteurs.

Les labels environnementaux et déclarations environnementales de produit

1. Les labels environnementaux ou « écologiques »

Les labels environnementaux sont considérés comme un « marquage » régi par la norme ISO 14024.
Le label peut être considéré comme un outil de communication envers les architectes, concepteurs ou maîtres d'ouvrage. Le fabricant met en évidence certaines qualités environnementales ou sanitaires de son/ses produit(s).
Un label peut être considéré comme fiable sous les conditions suivantes :

- les critères d'évaluation doivent être repris dans la norme et vérifiables;
- la méthodologie utilisée pour l'évaluation doit être transparente. Toutes les informations, entre autres sur les critères et les cahiers des charges, doivent être accessibles sur simple demande;
- l'ensemble de la procédure (critères et méthodologie) doit être contrôlé par un organisme de contrôle indépendant et agréé.
- l'étiquetage doit être obligatoire

Il existe différents types de labels

- Les labels officiels qui sont gérés par une administration. Les contrôles sont effectués par des organisations externes, indépendantes et le plus souvent accréditées. Cette accréditation garantit la fiabilité et la qualité du contrôle. Il s'agit de systèmes volontaires: seuls les producteurs qui le désirent apposent ce label sur leurs produits.
- Les labels privés collectifs qui sont gérés par un secteur industriel, une association professionnelle ou une association qui est considérée comme indépendante du fabricant ou du secteur. Les contrôles sont exécutés par des organisations externes, indépendantes et le plus souvent accréditées. Ce sont également des systèmes volontaires.
- Les labels privés, individuels et contrôlés qui sont créés par un fabricant ou un distributeur, mais sont contrôlés par une organisation externe et indépendante qui, en général, est accréditée.

De nombreux labels environnementaux ou écocertifications permettent aujourd'hui à tout concepteur de choisir des matériaux plus respectueux de l'environnement et de la santé. Cependant ces labels ne garantissent pas l'innocuité totale d'un produit, ils identifient plutôt les produits les moins nocifs pour l'environnement et/ou la santé. Ils doivent donc être considérés comme des « indicateurs ».
Nous présenterons ci-dessous plusieurs labels « écologiques». Ceux-ci sont tous des labels de qualité et contrôlés par des organismes de certification agréés.

1.1. L'Écolabel européen

L'Écolabel européen est un label officiel et contrôlé.
Le système d'attribution du label écologique européen a établi un ensemble de critères environnementaux et de performance pour juger les produits. Un produit doit impérativement remplir tous les critères pour pouvoir obtenir le label écologique de l'UE.
Les critères d'obtention de ce label, remis à jour tous les 4 ans, visent en particulier à promouvoir une utilisation efficace du produit et à limiter la quantité de déchets, à réduire les risques pour l'environnement en réduisant les émissions de solvants ainsi qu'à limiter les rejets de substances toxiques ou polluantes dans les eaux.
Les critères écologiques pour chaque catégorie de produits sont définis selon une approche globale (analyse du cycle de vie – approche dite « du berceau à la tombe ») qui permet de déterminer l'impact du produit à chaque étape de son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières à sa mise en décharge finale, en passant par sa fabrication, sa distribution (y compris son conditionnement) et son utilisation.
Sur la base des résultats de ces analyses, les critères



Illustration C2.01 : Écolabel européen, label Natureplus, label Blauer Engel, label Nordic Swan, label NF Environnement, label Milieukeur



Illustration C2.02 : Etiquette OKO-TEST et étiquette RESSOURCEN

sont définis de façon à éviter les effets majeurs du produit sur l'environnement. Ils comportent en outre un critère de performance.
Les critères d'évaluation sont les suivants:
- la qualité de l'air et la qualité de l'eau;
- la protection des sols;
- la limitation des déchets;
- les économies d'énergie;
- la gestion des ressources naturelles;
- la prévention du réchauffement planétaire;
- la protection de la couche d'ozone stratosphérique
- la sécurité environnementale;
- la limitation des nuisances sonores;
- la préservation de la biodiversité.

Trois catégories de produits de construction sont, à l'heure actuelle, certifiées : les peintures et vernis, les revêtements de sols durs et les ampoules électriques.
Les différents produits ayant obtenu la certification sont repris sur le « catalogue internet des produits » (http://www.eco-label.com) édité par la Commission européenne. Celui-ci offre un aperçu très complet des produits et services écolabellisés disponibles dans chaque pays européen et notamment en Belgique.
On retrouve également tous les produits labellisés sur le marché belge sur le site http://www.ecolabel.be/fr/produits/index.html

1.2. Le label « Natureplus »

Le label «Natureplus» est un label privé, collectif et contrôlé.
Créé en Europe germanophone, ce label fut lancé à la demande principalement de commerçants allemands de produits pour le secteur de la construction. A cet effet, les critères de quelques labels les plus stricts et les mieux contrôlés (Eco Umweltinstitut[9], TÜV-Süddeutchland[10], IBO-Östenreichisches Institut für Baubiologie und ökologie) ont été groupés et approfondis. Sous la coupole de la BDB[11] (Bundesverband Deutscher Baustoff-Fachhandel), les commerçants ont demandé à quelques instituts de test d'introduire un label unique qui rende tous les autres superflus.
La gamme de produits certifiés est relativement étendue et l'ensemble des produits est repris sur le site www.natureplus.org/produkte
Des instituts de contrôle agréés sur le plan international vérifient régulièrement la conformité aux critères les plus stricts.
Le label de Natureplus est attribué à des matériaux de construction qui répondent à trois critères essentiels: adéquation avec l'utilisation, sécurité pour la santé humaine et sécurité pour l'environnement.
Les produits certifiés doivent répondre aux normes européennes en matière d'utilisation et de fonctionnalité (agrément technique européen, conformité aux normes EN, DIN, ÖNORM).
L'évaluation des produits de construction se fait à partir d'une analyse du cycle de vie complète, soit du berceau à la tombe (« cradle to grave » en anglais) et selon trois types de critères :
- critères de base: critères valables pour tous les produits
- critères généraux: critères valables par groupe de produits
- critères spécifiques: pour un type de produits spécifiques

Les critères de base sont les suivants:
- la part de matières premières renouvelables et/ou minérales doit représenter au moins 85 % du contenu de matériau;
- les matières premières utilisées doivent être dispo-

9 Eco Umweltinsitutit : http://www.eco-institut.de

10 TÜV-Süddeutchland : http:// www.tuev-sued.de

11 BDB : http:// www.bdb-bfh.de

nibles sur Terre en quantités suffisantes;
- l'interdiction d'utiliser des matières nocives pour l'environnement et/ou la santé (tant pour les matières de base que pour les matières supplémentaires ou auxiliaires);
- les émissions lors de la production et de l'utilisation doivent rester limitées;
- lors de la production du matériel, la consommation d'énergie doit rester limitée;
- l'emballage doit avoir des caractéristiques écologiques optimales (papier ou carton recyclés, bois FSC, sans halogènes et plastifiants) ;
- des obligations qui sont déjà fixées légalement dans différents pays sont explicitement reprises dans les critères de base;
- les fournisseurs de produits certifiés doivent, lors de la production, distribution et application de ceux-ci, répondre aux conditions légales qui existent dans le pays concerné

De plus, les fabricants doivent répondre aux obligations suivantes : le respect des valeurs limites d'émission les plus strictes ; la déclaration de tous les composants ; la preuve d'une fonctionnalité élevée.
Le label garantit pour chaque produit spécifique des performances en ce qui concerne l'aptitude fonctionnelle, la composition, la fabrication des produits, l'utilisation, le traitement en fin de vie et les émissions.
Les critères généraux et spécifiques sont accessibles - en allemand, en anglais et/ou en français - sur le site http://www.natureplus.org/fr/natureplus/directives-dattribution

1.3. Le label Blauer Engel (Ange bleu)

Le label « Blauer Engel » est un label officiel et contrôlé. Il est géré par le Ministère fédéral allemand de l'Environnement, de la Protection de l'Environnement et de la Sécurité nucléaire.
Ce label allemand indique que le produit est moins nocif pour l'environnement que les produits similaires pour ce qui est des principaux aspects environnementaux.
Le symbole même cite la raison pour laquelle le produit est moins nocif («Umweltzeichen weil...»).
L'attribution se fait par un organisme de certification allemand indépendant.
Les critères les plus importants pour l'attribution du label sont l'absence de substances cancérigènes, nocives pour l'environnement ou toxiques.
Chaque catégorie de produit doit répondre à une série de critères spécifiques.
L'ensemble des catégories de produits et les critères de certification sont accessibles sur le site http://www.blauer-engel.de/en/products_brands/survey_basic_award_criteria.php

Un grand nombre de catégories de produits de construction sont certifiés dont notamment les revêtements de sols (durs, bois, textiles), les peintures, vernis et colles, les produits issus du recyclage (recyclage du verre, du papier, du bois), les panneaux à particules, les revêtements bitumineux ainsi que des équipements spécifiques liés à la construction comme les chaudières (mazout, gaz, pellets), panneaux solaires,…
L'ensemble des produits ayant obtenu la certification est accessible sur le site http://www.blauer-engel.de/en/index

1.4. Autres labels environnementaux

D'autres labels environnementaux sont « comparables » aux trois labels présentés. On peut notamment citer le label « NF environnement[12]», régulièrement présent sur des produits commercialisés en Belgique, l'écolabel scandinave « Nordic Swan[13]» ou le label hollandais « Milieukeur[14]».
Il faut également mettre en évidence des labels spécifiquement élaborés pour certains types de matériaux. C'est le cas notamment des labels « FSC[15]» (Forest Stewardship Council) ou « PEFC[16]» (Programme for the Endorsement of Forest Certification) qui certifient la gestion durable de la ressource « bois » pour les produits en bois massif et les produits dérivés du bois.
C'est également le cas du label « GUT[17]» qui certifie le respect de l'environnement et de la santé tout au long du cycle de vie pour les revêtements de sol textiles.
Deux initiatives doivent encore être soulignées même si on ne peut pas réellement les présenter comme des labels.
La première est la vignette « ÖKO-TEST[18]». ÖKOTEST n'est ni un label ni un organisme certificateur, mais une revue allemande de consommateurs qui teste les produits de consommation courante. Le magazine ÖKOTEST est connu outre-Rhin pour son sérieux et ses exigences sanitaires et environnementales de ses évaluations.
Chaque mois des produits sont analysés par des laboratoires indépendants, leurs résultats étudiés par un comité scientifique et enfin publiés.
La vignette ÖKOTEST, sans être un label, peut donc être considérée comme un gage de qualité.
La seconde initiative est la vignette « Ressourcen R » qui présente de manière graphique, l'origine et le pourcentage des matières premières nécessaires à la fabrication d'un produit. Le logo « R » se colore en vert pour la part des ressources renouvelables, en jaune pour la part des ressources minérales et en rouge pour la part des res-

12 label NF environnement : http://www.marque-nf.com
13 label Nordic Swan: http://www.svanen.nu/eng
14 label Milieukeur: http://www.milieukeur.nl
15 label «FSC» : http://www.fsc.org
16 label «PEFC» : http://www.pefc.org
17 label «GUT»: http://www.gut-ev.de
18 vignette OKO-TEST : http://www.oekoplus.de

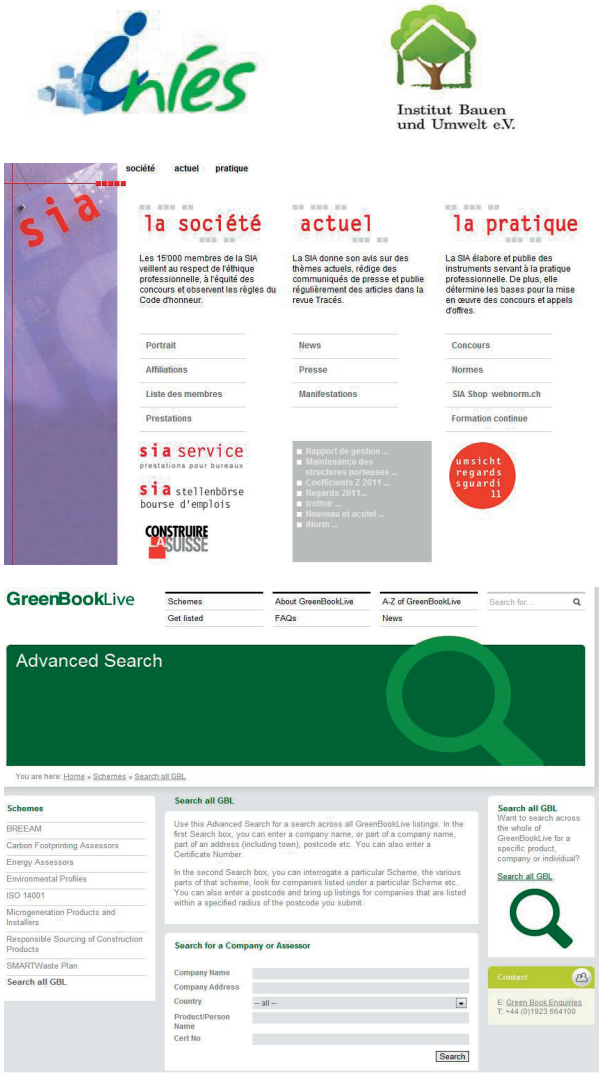


Illustration C2.03 : Bases nationales de DEP

sources fossiles.
Il peut donc aider à se rendre compte du pourcentage de matières renouvelables présentes dans un produit de construction. Sous le terme « renouvelable » sont englobées à la fois les matières végétales et minérales.

2. Les Déclarations Environnementales de Produit (DEP)

Les déclarations environnementales de produit sont des déclarations établies sous la responsabilité des fabricants de produits de construction, suivant la norme ISO 14025.
Ces déclarations sont des fiches d'informations - vérifiées par un tiers indépendant - dans lesquelles le fabricant fournit, sur base d'une analyse de cycle de vie, des données quantitatives relatives à l'impact de son produit sur l'environnement durant tout son cycle de vie (cradle to grave) ou sur les premières étapes du cycle de vie (cradle to gate).
Les fiches d'informations peuvent également comporter d'autres aspects comme une mise en garde contre certaines substances toxiques ou dangereuses ou des renseignements sur certains composants.
Plusieurs pays européens ont légiféré en la matière suivant la norme ISO 14025. C'est notamment le cas de la France sur lequel nous nous pencherons, mais également de l'Allemagne, de la Suisse, de l'Angleterre, des Pays-Bas…
Ces différents pays ont rassemblé l'ensemble des DEP sur des portails informatiques accessibles au grand public:

- Base INIES pour la France : http://www.inies.fr
- Base IBU (Institut Bauen und Umwelt) pour l'Allemagne: http://www.bau-umwelt.de
- Base SIA (Société suisse des Ingénieurs et Architectes) pour la Suisse : http://www.sia.ch
- Base BRE (Building Research Establishment) pour l'Angleterre : http://www.bre.co.uk
- Base MRPI (Milieu Relevant Product Informatie) pour les Pays-Bas : http://www.mrpi.nl

Il va de soi qu'il existe un certain nombre de différences entre ces bases DEP, notamment au niveau :

- des frontières du système
- des hypothèses de l'ACV (distances de transport, p. ex.)
- des catégories d'impact environnemental
- de la présentation des résultats…

Ces différences rendent impossible toute comparaison entre DEP issues de différentes bases, de sorte qu'une DEP n'est bien souvent acceptée et utilisée que dans le pays où elle a été élaborée.
De ce fait, les producteurs exportant vers plusieurs pays n'ont pas d'autre option que de faire élaborer une nouvelle déclaration dans chacun des pays importateurs, ce qui entraîne des coûts supplémentaires et constitue un obstacle à la diffusion et à l'application des DEP.

2.1. Unité fonctionnelle et unité déclarée

L'unité fonctionnelle d'un produit de construction peut être définie comme la description chiffrée de la performance ou de la fonction du produit à évaluer au cours de son cycle de vie.
L'unité fonctionnelle est utilisée comme unité de référence pour une DEP basée sur l'ACV du système. Cette référence est nécessaire afin de pouvoir comparer les données ACV et permet en outre d'additionner les flux de matériaux et d'énergie et l'impact environnemental correspondant pour chaque phase du cycle de vie.
L'unité fonctionnelle d'un produit de construction est généralement aussi associée à une durée de vie de référence qui correspond à la durée de vie standard d'un produit.
L'unité déclarée d'un produit est utilisée dans une DEP lorsque celle-ci ne tient pas compte de la mise en oeuvre du produit dans le bâtiment.
Elle constitue donc une unité de référence permettant

d'exprimer les flux d'énergie et de matériaux d'un produit de construction issu d'un module d'information individuel.
Un module d'information contient, en d'autres termes, les données concernant les flux d'énergie et de matériaux (et donc l'impact environnemental) d'une phase spécifique du cycle de vie d'un produit.
Lors de l'élaboration d'une DEP, il est dès lors possible de combiner différents modules d'information afin d'évaluer les flux d'énergie et de matériaux totaux et l'impact environnemental correspondant, exprimé par unité de production.

2.2. Contenu d'une déclaration environnementale de produit

Le contenu d'une DEP peut être subdivisé en trois parties:

- des informations générales
- des informations relatives à l'ACV, à l'ICV et aux modules d'information
- des données environnementales complémentaires.

Une DEP se différencie d'une ACV par le fait que des informations environnementales complémentaires et pertinentes peuvent être contenues dans une DEP, ce qui n'est pas le cas de l'ACV (mesures préventives par rapport aux composants dangereux, informations sur les composants du produit ou la mise en oeuvre d'un système de gestion de l'environnement au sein de l'entreprise, p. ex.). Les «Aspects sanitaires» contenus dans chaque DEP de la base INIES en constituent un exemple pratique.

Les informations générales doivent toujours contenir les éléments suivants : identification et description du producteur; description et identification du produit, nom du programme DEP (nom et adresse du gestionnaire de programme et éventuellement le logo et le site Internet),

1	Consommation de ressources énergétiques			
	Energie primaire totale	(MJ)	1,200E+000	1,200E+002
	Energie renouvelable	(MJ)	2,000E-001	2,000E+001
	Energie non renouvelable	(MJ)	1,000E+000	1,000E+002
	Energie primaire procédé	(MJ)	Non renseignée	Non renseignée
2	Epuisement de ressources (ADP)	(kg eq. Antimoine)	3,700E-004	3,700E-002
3	Consommation d'eau totale	(L)	3,230E-001	3,230E+001
4	Déchets solides			
	Déchets valorisés (total)	(kg)	2,710E-002	2,710E+000
	Déchets éliminés			
	Déchets dangereux	(kg)	4,360E-005	4,360E-003
	Déchets non dangereux	(kg)	7,160E-003	7,160E-001
	Déchets inertes	(kg)	4,190E-001	4,190E+001
	Déchets radioactifs	(kg)	5,730E-006	5,730E-004
5	Changement climatique	(kg eq. CO2)	1,050E-001	1,050E+001
6	Acidification atmosphérique	(kg eq. SO2)	3,450E-004	3,450E-002
7	Pollution de l'air	(m^3 d'air)	9,190E+000	9,190E+002
8	Pollution de l'eau	(m^3 d'eau)	5,960E-002	5,960E+000
9	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	(kg eq. CFC)	0,000E+000	0,000E+000
10	Formation d'ozone photochimique	(kg eq. éthylène)	3,130E-005	3,130E-003

Illustration C2.04 : Résumé d'un EPD, base de données INIES - www.inies.fr

identification des PCR[19], date de publication et durée de validité, description du contenu du produit (matériaux et substances à signaler, matériaux et substances nuisibles pour la santé ou l'environnement à une phase quelconque du cycle de vie), informations concernant les phases du cycle de vie n'ayant pas été prises en considération,etc.
Une DEP contient toutes les informations pertinentes provenant des études ACV, ICV et/ou des modules d'information.
Ces informations peuvent être divisées en trois catégories et comprennent entre autres les données suivantes:

- les données issues de l'analyse ICV : utilisation des matières premières, émissions dans l'air, l'eau et le sol;
- les résultats de l'analyse de l'impact du cycle de vie (AICV) au moyen d'indicateurs : changements climatiques (GWP), disparition de la couche d'ozone stratosphérique, acidification du sol et des sources d'eau (AP, EP), formation d'oxydants photochimiques (POCP), épuisement des sources d'énergie fossiles, épuisement des matières premières minérales, etc.

Si nécessaire, une DEP peut contenir des informations complémentaires sur les aspects environnementaux ne provenant pas d'une ACV, d'une ICV ou de modules d'information. Ces renseignements doivent facilement pouvoir être distingués des informations dont il a été question ci-dessus.

19 Les règles propres aux catégories de produits (PCR) définissent les exigences et les directives spécifiques en vue d'élaborer une déclaration environnementale pour une ou plusieurs catégories de produits. Les PCR fournissent une définition et une description du groupe de produits auquel elles se rapportent (description de la fonction, des performances techniques ou des applications, par exemple). Elles comportent également des règles en vue de l'élaboration de scénarios pour déterminer l'impact environnemental des produits tout au long de leur cycle de vie. Source: CSTC

2.3. Présentation des Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) – Base INIES – France

La fiche de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) est une déclaration établie sous la responsabilité des fabricants du produit, suivant la norme NF P P01-010.
L'ensemble de ces déclarations est accessible et téléchargeable sur le site http://www.inies.fr
La déclaration environnementale française considère deux types d'informations :

- les données d'inventaire du cycle de vie (ICV) ;
- les valeurs des indicateurs d'impacts du cycle de vie

La déclaration environnementale divise le cycle de vie d'un produit de construction, selon la norme NF P P01-010, en 5 étapes :

- la phase de production qui comprend l'extraction, la préparation et le transport des matières premières ainsi que la phase de fabrication. Cette étape s'arrête à la sortie d'usine (cradle to gate).
- la phase de transport qui comprend le transport du produit entre l'usine de production et le chantier où le produit est mis en œuvre
- la phase de mise en œuvre qui comprend la mise en œuvre proprement dite du produit, mais également, le cas échéant, le transport des déchets produits (chutes de découpe, consommables…
- la phase de la vie en œuvre pendant laquelle le produit assure sa fonction dans le bâtiment. Durant cette phase, le produit peut faire l'objet d'un entretien, d'une maintenance ou d'un remplacement qui sont également pris en compte dans le bilan environnemental. Cette phase couvre toute la durée de vie typique du produit.
- la phase de fin de vie qui consiste en la dépose du produit lors d'une opération de rénovation, d'entretien ou de démolition et le transport des déchets jusqu'au site de valorisation ou de traitement.

La déclaration environnementale se fait également sur base d'une unité fonctionnelle et d'un inventaire de cycle de vie. L'unité fonctionnelle va englober l'ensemble des constituants du produit, y compris les emballages et les produits complémentaires nécessaires à la mise en œuvre du produit.

Exemple : Tuile de terre cuite
Unité fonctionnelle :
- Assurer la couverture de 1 m² de toiture pendant un an
Flux de référence :
- Tuile de terre cuite
- Emballage comprenant : palette en bois, lattis en bois, feuillard PP et housse en PE
Durée de vie typique (DVT) : 100 ans

Les entrants considérés dans la déclaration environnementale française sont les suivants :

- Consommation de ressources naturelles énergétiques Toutes les ressources qui servent de sources énergétiques dans le cycle de vie du produit sont recensées en distinguant ressources renouvelables et non renouvelables.
- Consommation de ressources naturelles non énergétiques

On recense ici l'ensemble des quantités de matières premières (hors énergie) utilisées sur tout le cycle de vie du produit : matières végétales ou animales, minerais métalliques, autres ressources minérales, ressources issues de la pétrochimie…

- Consommation d'eau

On recense ici les consommations d'eau selon leur provenance : rivière, mer, lac, réseau d'eau potable…

- Consommation d'énergie et matière récupérées

On mentionne ici toutes les quantités de matières et d'énergie issues d'autres cycles de vie. Ce sont princi-

palement les matières issues du recyclage et les énergies issues de combustibles secondaires comme les huiles usagées, sciures, déchets ménagers,…
Les sortants considérés dans la déclaration environnementale française sont les suivants :

• Émissions dans l'air

Toutes les émissions dans l'air, directement ou indirectement liées au produit analysé sont répertoriées. Ces émissions sont généralement générées par le transport, les procédés de fabrication et les activités minières.

• Émissions dans l'eau

Toutes les émissions dans l'eau, directement ou indirectement liées au produit analysé sont répertoriées. On y retrouve des polluants divers comme les hydrocarbures ou les métaux lourds ainsi que des indicateurs de la pollution de l'eau comme la DCO[20] , la DBO5[21] et les matières en suspension.

• Émissions dans le sol

Toutes les émissions dans le sol, directement ou indirectement liées au produit analysé sont répertoriées. On retrouve divers polluants, dont les hydrocarbures et les métaux lourds. Dans la plupart des cas, on considère que les émissions dans le sol contribuent à la pollution de l'eau par transfert du sol vers l'eau.

20 DCO: La demande chimique en oxygène (DCO) est la consommation en dioxygène par les oxydants chimiques forts pour oxyder les substances organiques et minérales de l'eau. Elle permet d'évaluer la charge polluante des eaux usées. La DCO est une des mesures principales des effluents pour les normes de rejet. Elle est beaucoup utilisée en France.

21 DBO5: La demande biochimique en oxygène (DBO) est la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder les matières organiques (biodégradables) par voie biologique (oxydation des matières organiques biodégradables par des bactéries). Elle permet d'évaluer la fraction biodégradable de la charge polluante carbonée des eaux usées. Elle est en général calculée au bout de 5 jours à 20 °C et dans le noir. On parle alors de DBO5

Elles sont donc pour l'essentiel comptabilisées dans les émissions dans l'eau.

• Déchets valorisés

On recense ici tous les déchets (matières et énergie) qui sont générés par le cycle de vie du produit, mais qui sont récupérés, recyclés ou valorisés par d'autres cycles de vie.
Les déchets valorisés en interne ne sont pas pris en compte (chute ou déchets de fabrication remis dans le cycle de production).

• Déchets éliminés

On comptabilise ici tous les déchets, par catégories réglementaires , qui sont éliminés.

Les indicateurs d'impact du cycle de vie d'un produit permettent d'évaluer la contribution environnementale du produit considéré en regroupant certains flux.
Les indicateurs retenus par la norme NF P01-010 sont les suivants :

• la consommation des ressources énergétiques;
• l'épuisement des ressources;
• la consommation d'eau;
• les déchets solides;
• les changements climatiques;
• l'acidification atmosphérique;
• la pollution de l'eau;
• la destruction de la couche d'ozone stratosphérique;
• la formation d'ozone photochimique.

L'intérêt de la fiche de déclaration environnementale française est qu'elle prend également en compte les aspects sanitaires, notamment la contribution à la qualité des espaces intérieurs (émission de COV et/ou de formaldéhyde et émissions radioactives) et la contribution à la qualité de l'eau.

2.5. Les déclarations environnementales de produit en Belgique

Ces dernières années, les producteurs de matériaux de construction se sont rendus de plus en plus compte que les professionnels tels que les entrepreneurs et les architectes accordaient de l'importance au respect de l'environnement à travers le choix des matériaux et des produits de construction.
La multiplication des labels et des produits labellisés «écologiques» en constitue d'ailleurs le meilleur exemple.
Dans ce contexte, l'élaboration de DEP objectives, élaborées de la même manière pour chaque produit pourrait apporter à l'ensemble des acteurs belges de la construction des informations claires et précises sur l'impact environnemental des produits de construction.
Pour ce faire, un long chemin devra toutefois encore être parcouru en Belgique. Malgré certaines initiatives menées à la fois par certaines fédérations, par des instituts de recherche et par les pouvoirs publics démontrent l'intérêt de ces développements, notre pays montre un certain retard par rapport à ses voisins.
En Belgique, la politique en matière de produits relève encore toujours des compétences fédérales. En «affaires courantes» depuis plus d'un an, le gouvernement fédéral n'a toujours pas mis à l'agenda l'application des directives européennes en matière d'élaboration de déclarations environnementales de produit et d'analyse de cycle de vie. Il n'existe donc toujours pas de cadre législatif en Belgique pour les ACV et les EPD. Ce cadre législatif, une fois mis à l'ordre du jour du gouvernement devra tenir compte des limites du marché belge et suivre les derniers développements européens et les adapter au contexte belge.

Du côté des producteurs belges de matériaux de construction, on peut citer l'initiative de la fédération PMC (Producteurs Belges de Matériaux de Construction) qui suivant les derniers développements du travail du CEN TC 350 sur l'harmonisation des Déclarations Environnementales de Produits, tant au niveau de leur

contenu que de leur format de communication (*prEN 15804 – Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products*) a mis au point un format de DEP raccourci de deux pages reprenant un minimum de données environnementales. L'objectif de la PMC est de pouvoir communiquer avec les autres acteurs industriels essentiellement et de pouvoir ainsi se positionner face à la demande.

Si cette initiative est loin d'être satisfaisante d'un point de vue scientifique, elle met aujourd'hui l'accent sur la nécessité et l'urgence, tant pour le secteur industriel de la construction que pour les concepteurs, les maîtres d'ouvrages et les chercheurs, d'obtenir du gouvernement fédéral une base solide pour l'élaboration des EPD et des ACV.

Les outils d'aide

Les différents types d'outils d'évaluation environnementale d'un composant ou d'un bâtiment peuvent être définis en deux grandes catégories :

- Les outils du type checklist qui s'appliqueront plus spécifiquement à un matériau ou à une composition de plusieurs matériaux ;
- Les outils du type logiciel ou softwares ACV qui permettent l'évaluation environnementale d'une paroi ou d'un bâtiment complet.

Ces deux types d'outil se basent essentiellement sur des analyses de cycle de vie réalisées soit par les producteurs de matériaux soit par des instituts de recherche spécialisés, soit par les deux.

1. Les outils «Checklist»

Les méthodes d'évaluation de type checklist sont les outils d'évaluation les plus répandus et se révèlent relativement simples à utiliser. Elles sont conçues pour être utilisées par les maîtres d'ouvrage, les promoteurs, les architectes et certains services techniques du bâtiment. Elles se présentent sous forme de listes de critères (avec des cases à cocher). Chaque critère a un système de cotation gradué associé à un facteur de pondération; le résultat final est calculé en additionnant les cotations pondérées de chaque critère.
La checklist implique donc que l'utilisateur ait une connaissance approfondie du bâtiment et de ses composants.
La checklist ne donne pas de résultat chiffré, mais une appréciation sous forme de pourcentage, lettrage (A, B, C, D) ou chiffre (1,2,3,4,…)
Les checklists qui ont été analysées sont les suivantes :

- Green Guide to Housing Specification (publication du BRE éditée en 2000 et réimprimée en 2007)
- La norme NIBE (publication en 3 volumes « NIBE'S Basiswerk - Milieuclassificaties Bouwproducten » publiée par Nederlands Insituut voor Bouwbiologie en Ecologie – www.nibe.org)

2. Les logiciels d'évaluation environnementale

Les logiciels d'évaluation environnementale basés sur une analyse de cycle de vie sont généralement plus complexes au niveau de leurs méthodes de calcul que les checklists.
Ces méthodes visent à fournir une évaluation globale des impacts environnementaux et sanitaires au travers de critères tels que le réchauffement climatique, l'épuisement des ressources... Cette évaluation se fait généralement sur un cycle de vie complet – cradle to grave.
Ces outils informatiques (logiciels) nécessitent une base de données complète sur les matériaux, sur les modes de fabrication et sur les ressources nécessaires, et cela tant au niveau de la mise en œuvre (construction du bâtiment) qu'au niveau de son utilisation (gestion, entretien, maintenance).
Ces méthodes commencent à être fortement utilisées dans le secteur du bâtiment.
Les logiciels ACV qui ont été analysés sont les suivants :

- le logiciel anglais ENVEST2 mis au point par le BRE - www.envest2.bre.co.uk;
- le Catalogue des éléments de construction, outil d'évaluation en ligne sur le site www.bauteilkatalog.ch et dont une partie est accessible gratuitement;
- le logiciel suisse ECO-BAT – www.ecobat.ch
- l'outil autrichien ECOSOFT – www.ibo.at
- l'outil français COCON – www.eosphere.fr/COCON-comparaison-solutions-constructives-confort.html

D'autres logiciels d'analyse de cycle de vie d'un bâtiment existent, dont notamment le logiciel EQUER (France), le logiciel EcoQuantum (Pays-Bas) ou le logiciel LEGEP (Allemagne). Ceux-ci n'ont pas fait l'objet de notre analyse.
Les résultats de l'analyse des outils existants ont été compilés dans deux tableaux présentés sur la page pré-

CHECKLISTS	GREEN GUIDE	NIBE
données générales		
pays	Angleterre	Pays-Bas
analyse de matériau	(x)	x
analyse de parois	x	(x)
durée d'évaluation	60 ans	75 ANS
données d'inventaire	IVAM, ECOINVENT,	IVAM, ECOINVENT et LCA producteurs
impacts analysés		
exploitation des ressources naturelles	x	x
changement climatique	x	x
acidification	x	(x)
ozone troposphérique	x	(x)
ozone stratosphérique	x	(x)
toxicité sur l'être humain	x	x
toxicité sur l'environnement	x	x
eutrophisation	x	x
réduction de la biodiversité	no	x
déchets	x	no
utilisation de territoire (land use)	no	x
nuisances	no	no

Illustration C3.01 : Comparaison des outils «checklist» - partie 1

LOGICIELS LCA	ENVEST 2	Bauteilkatalog	ECO-BAT	ECOSOFT
données générales				
pays	Angleterre	Suisse	Suisse	Autriche
analyse construction existante	x	x	x	x
analyse nouvelle construction	x	x	x	x
analyse immeuble de logement/maison	/	x	x	x
durée d'évaluation	60 ans	60 ans	60 ans	libre choix
données d'inventaire	IVAM, ECOINVENT,	Ecobilans KBOB, ECOINVENT	Ecobilans KBOB, ECOINVENT	ECOINVENT (CML2) + littérature scientifique
impacts analysés				
exploitation des ressources naturelles	x	(x)	(x)	(x)
changement climatique	x	x	x	x
acidification	x	x	x	x
ozone troposphérique	x	x	x	x
ozone stratosphérique	x	no	no	no
toxicité sur l'être humain	x	no	no	no
toxicité sur l'environnement	x	(x)	(x)	no
eutrophisation	x	(x)	(x)	x
réduction de la biodiversité	no	no	no	no
déchets	x	(x)	(x)	no
utilisation de territoire (land use)	no	(x)	(x)	no
nuisances	no	no	no	no

Illustration C3.02 : Comparaison des softwares « LCA »- partie 1

CHECKLISTS	GREEN GUIDE	NIBE
pondération des résultats	x	x
agrégation des résultats	sous forme de lettre : A à D	sous forme de chiffre : de 1 à 5
phases analysées		
extraction des ressources	x	x
fabrication - cradle to gate	x	x
mise en œuvre	?	no
vie en œuvre	x	no
entretien/maintenance	x	x
démolition	x	no
phases de transport	?	no
autres aspects		
coût financier	LCC	no
confort hygrothermique	no	no
systèmes hvac	x	no
types de ressources utilisées	no	x
consommation d'eau	(x)	x
traitement des déchets	no	no
recyclabilité	no	x
transparence du système de pondération	no	yes
accessibilité de la base de données	no	no

Illustration C3.03 : Comparaison des outils « checklist » - partie 2

LOGICIELS LCA	ENVEST 2	Bauteilkatalog	ECO-BAT	ECOSOFT
agrégation des résultats	ecopoint	UPB*	UPB	no
phases analysées				
extraction des ressources	x	x	x	x
fabrication - cradle to gate	x	x	x	x
mise en œuvre	?	no	no	no
vie en œuvre	x	no	no	no
entretien/maintenance	x	x	x	x
démolition	x	x	x	no
phases de transport	?	(x)	(x)	no
autres aspects				
coût financier	LCC	no	no	no
confort hygrothermique	no	x	x	no
systèmes hvac	x	no	x	no
types de ressources utilisées	no	no	no	no
consommation d'eau	(x)	(x)	(x)	no
traitement des déchets	no	no	no	no
recyclabilité	no	no	no	no
transparence du système de pondération	no	yes	yes	yes
accessibilité de la base de données	no	yes	yes	yes

Illustration C3.04 : Comparaison des softwares «LCA» - partie 2

cédente. Ceux-ci reprennent les critères d'évaluation, la durée d'évaluation, la source des données d'inventaire…

3. Autres outils d'évaluation environnementale

D'autres outils, ne pouvant être classés dans les deux catégories présentées ci-dessus, ont également été analysés et utilisés. Il s'agit de:

- La publication « Passivhaus Bauteilkatalog » (publication de l'Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie publiée par les éditions Springler-Verlag en 2008)
- la publication luxembourgeoise « Guide de la construction et de la rénovation durable » éditée en 2008 par le Centre de Ressources des Technologies pour l'Environnement (CRTE – www.tudor.lu)
- les différents outils développés par le centre ECO-BAU, plate-forme commune des offices et services de la construction de la Confédération Suisse, des cantons et des villes (www.ecobau.ch) : les fiches CFC, les éco-devis et les éco-bilans KBOB (http://www.bbl.admin.ch/kbob/00493/00495).

3.1. La publication autrichienne « Passivhaus Bauteilkatalog »

Cet outil est issu de l'association de 2 outils développés et géré respectivement par Energieinstitut Vorarlberg (Institut de l'énergie du Vorarlberg – Autriche) & IBO Gmbh + bauXund Forschung und Beratung Gmbh (Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie – Institut autrichien pour la biologie et l'écologie de la construction + bauXund société de recherche & consultance) :

- ÖBOX : Plate-forme d'information sur les produits de la construction – informations techniques et écologiques
- IXBAU : Base de données en ligne sur les 'produits de la construction' et la 'chimie de la construction' (identification des composants chimiques des produits de la construction)
- ÖBOX + IXBAU = BAUBOOK rechner für bauteil (programme pour éléments de la construction)

L'intérêt de cet outil réside essentiellement dans la présentation de trois types de données qui en font un outil très complet pour un concepteur:

- des données techniques :

Ces données techniques sont principalement transmises par les fabricants ou représentants au travers d'une fiche de déclaration. L'ensemble de ces données est contrôlé par l'institut IBO avant diffusion.

- des données physiques :

Ces données physiques sont principalement transmises par les fabricants ou représentants au travers d'une fiche de déclaration. L'ensemble de ces données est contrôlé par l'institut IBO avant diffusion.

- des données environnementales

Les données environnementales proviennent de plusieurs sources :

- données environnementales issues de la littérature scientifique spécialisée ;
- données environnementales issues du programme SIMAPRO utilisant la base de données ECOINVENT
- données environnementales transmises par les fabricants ou représentants au travers d'une fiche de déclaration. L'ensemble de ces données est contrôlé par l'institut IBO avant diffusion ;

La base de données finale ainsi constituée est utilisée pour le BAUTEILKATALOG ainsi que pour le programme ECOSOFT

L'outil sous forme de «baubook», tout en s'axant sur la construction de bâtiments passifs, propose pour différentes typologies de parois (murs extérieurs, toitures, dalles de sol...) deux compositions différentes répondant aux mêmes performances «techniques» (isolation, inertie, acoustique) qu'il compare ensuite selon les indicateurs suivants:

- Non renewable energy
- Global Warming Potential
- Acidification Potential
- Waste: quantité de déchets produits par la paroi, fractions de déchets incluses dans la paroi et index d'élimination.

L'outil est également accessible en ligne où il offre à l'utilisateur d'une part la possibilité de composer ses propres parois et d'autre part tout type d'information sur les matériaux proposés (ATG, fiches techniques, revendeurs...)

3.2. La publication luxembourgeoise « Guide de la construction et de la rénovation durable »

La publication luxembourgeoise analyse une centaine de matériaux de construction (structure, gros-œuvre, second-œuvre et finition) en termes d'impact environnemental sur les phases de production, de mise en œuvre, d'utilisation et de fin de vie (valorisation).

Elle donne également des informations sur la production ou la fabrication de ces matériaux, les ressources utilisées et conseille le lecteur sur un choix de mise en œuvre et sur le choix des additifs.

Les données chiffrées proviennent de la base de données ECOINVENT (v1.3, 2006).

3.3. Les outils ECOBAU

Le centre ECOBAU a développé trois outils complémentaires et en parfaite adéquation avec le processus de conception d'un projet d'architecture ou de construction.

Les fiches ECO-CFC

Les fiches ECO-CFC « construction écologique » sont un recueil de 36 feuilles, numérotées selon les numéros de CFC avec plus d'informations sur la construction

écologique. Les fiches contiennent des principes et des recommandations pour les matériaux afin de retenir le meilleur choix lors de l'étude des détails et de l'établissement des appels d'offres. Elles contiennent aussi des indications spécifiques pour la valorisation et l'élimination des déchets de chantier.

Les éco-devis

Les éco-devis sont des fiches qui permettent aux concepteurs, lors de la mise en soumission, de connaître et de tenir compte des matériaux et procédés de construction les plus favorables à l'environnement.
Les éco-devis sont surtout utiles au stade de la soumission, lorsque le concepteur dispose encore d'une certaine marge de décision entre différentes variantes.
Le but des éco-devis est de mettre en évidence, au sein d'une même unité fonctionnelle, les matériaux ou les parties d'ouvrage qui se démarquent des autres variantes par un faible impact sur l'environnement.

Les éco-bilans KBOB

Les écobilans KBOB se fondent sur la base de données ECOINVENT en ce qui concerne les flux de matières et d'énergie.
Ces écobilans proposent des résultats chiffrés pour environ 130 matériaux de construction répertoriés par catégorie.
Les écobilans proposent deux types d'évaluation :

- une évaluation partielle qui tient compte de l'énergie grise (MJ-Eq) et de l'effet de serre ($kgCO^2$ - Eq). L'unité de référence est le kg de matière produite;
- une évaluation plus globale qui tient compte de l'utilisation des ressources énergétiques, de la terre, de l'eau douce, des émissions (air, eau et sol) et de l'élimination des déchets. Cette évaluation est convertie en éco-points (UBP) : plus les éco-points sont nombreux, plus la charge environnementale est importante.

Bien que la seconde évaluation soit intéressante parce que plus globale, aucune information n'est donnée sur la/les source(s) des données, sur la méthodologie utilisée et sur les résultats obtenus. Nous n'avons donc pas considéré cette évaluation.
Les évaluations tiennent compte des phases suivantes:

- les phases d'extraction, de transport et de production jusqu'au produit fini;
- la phase d'élimination en fin de vie en considérant une part de recyclage à peu près équivalente à celle qui s'applique aux produits actuels.

Le transport à partir de l'usine, le traitement sur chantier (mise en œuvre) et l'entretien éventuel pendant l'utilisation ne sont pas repris dans ces évaluations.

Ces trois outils, bien qu'offrant chacun une évaluation environnementale partielle, nous ont permis de prendre conscience de l'importance d'évaluer les matériaux de construction selon une démarche holistique en intégrant des critères plus « qualitatifs » dont notamment la gestion des ressources, la gestion des déchets, l'impact sur la santé...

4. Outils d'aide et méthodes d'évaluation environnementale de bâtiment

En 1990, en Angleterre, le Building Research Establishment lance BREEAM, la première méthode d'évaluation environnementale d'un bâtiment basée sur l'analyse de cycle de vie de ses composants, de ses éléments, des systèmes intégrés. Actuellement, cette méthode d'évaluation est la plus répandue dans le monde.
Depuis, d'autres pays ont élaboré leur propre méthode d'évaluation. On peut notamment citer:

- la méthode LEED, créée aux États-Unis en 1998 et gérée par l'US Green Building Council
- la méthode HQE, créée en France en 2005 suivant la démarche développée par l'association HQE en 1996
- la méthode TQ (total Quality) développée en Autriche en 2002 par la société ÖGUT
- la méthode Minergie-ECO, développée en Suisse en 2006 après le label énergétique «Minergie» (1998)
- la méthode VALIDEO, développée en Belgique en 2008 par le bureau SECO et le CSTC

Ces différentes méthodes évaluent l'impact environnemental et sanitaire des bâtiments (logements, bureaux, administratifs, etc.) suivant différentes thématiques, dont celle du choix des matériaux.
L'utilisation des différents outils d'aide présentés aux points 2 et 3 permet de répondre à la problématique du choix des matériaux et d'ainsi obtenir un certain nombre de points.
C'est le cas de la méthode BREEAM qui encourage tout concepteur a utiliser le Green Guide, le logiciel ENVEST ou la base DEP.
C'est également le cas de la méthode Minergie-ECO avec les outils ECO-BAU, le logiciel ECO-BAT.
Par contre, la méthode VALIDEO ne possède pas d'outil pour répondre à la problématique «impact environnemental des matériaux». Actuellement, la méthode belge base son évaluation sur la labellisation des matériaux (Ecolabel, Blauer Engel, Nordic Swan...)

Conclusions

L'analyse de cycle de vie est un instrument essentiel au développement et au maintien d'une politique d'utilisation rationnelle et soutenable des ressources (énergétiques ou non) ainsi que d'une politique respectueuse de l'environnement et de la santé.
L'ACV est aujourd'hui notre seul moyen de quantifier et d'évaluer l'impact environnemental et sanitaire de tout produit que nous fabriquons, que nous achetons, que nous mettons en oeuvre... C'est en fait le seul moyen de quantifier et d'évaluer l'impact de notre société de consommation.
Malgré tout le potentiel d'amélioration environnementale contenu dans ce type d'analyse, il subsiste aujourd'hui de nombreux freins à sa diffusion, dont notamment

- la complexité de l'étude

L'ACV est une étude complexe dont les résultats sont présentés sous forme d'une énumération de chiffres difficile à interpréter sans de bonnes connaissances techniques.
Seuls des spécialistes peuvent les élaborer, mais également les interpréter; ce qui n'est pas le cas des architectes, des concepteurs et des maîtres d'ouvrages.

- le caractère non obligatoire de l'ACV et de la publication des résultats

L'ACV n'est pas une obligation pour le fabricant de matériaux de construction (comme le marquage CE), elle se fait uniquement sur base volontaire.
Lorsqu'un fabricant décide de faire réaliser une ACV d'un de ses produits, c'est avec l'objectif d'optimiser son produit et le processus de fabrication de celui-ci. Il ne diffusera donc pas automatiquement les résultats de l'étude, surtout si ceux-ci sont défavorables à son image de marque. Le but premier de l'ACV - limiter les impacts environnementaux d'un produit - n'est donc pas atteint;

- le manque d'harmonisation européenne

Le cadre législatif donné par la Directive Européenne ne permet pas une élaboration harmonisée entre les différents pays adhérents, tant au niveau des limites de l'ACV, que des méthodes d'évaluation des impacts et que l'interprétation des résultats. Ce manque d'harmonisation oblige l'ensemble des fabricants présents sur le marché européen à fournir plusieurs ACV - selon le pays de diffusion - et implique des surcoûts important surtout pour les petites entreprises.

Malgré les obstacles cités ci-dessus, l'ACV est une étape indispensable dans l'élaboration d'outils de communication, comme les labels «écologiques» ou les déclarations environnementales de produit.
En effet, depuis une quinzaine d'années, des fabricants ou des regroupements de producteurs ainsi que des administrations officielles ont répondu à la demande grandissante des maîtres d'ouvrages et des concepteurs souhaitant obtenir des informations environnementales sur les produits utilisés en développant de nombreux labels «environnementaux» ou «écologiques»
Le label «écologique» est devenu un moyen privilégié de communication entre le producteur et le consommateur. C'est non seulement vrai dans le secteur de la construction, mais ce l'est aussi dans le secteur de l'alimentation, de l'habillement et de l'hygiène; ce qui nous fait revenir à la notion de «peau». Les grandes catastrophes environnementales et sociales ont fait prendre conscience à l'homme qu'il devait ménager son environnement et repenser sa manière d'habiter, de s'habiller et de manger, c.-à-d. reconsidérer la fonction protectrice de ses différentes «peaux» plutôt en qualité qu'en quantité.
Le label «écologique» est un marquage régi et cadré par une directive européenne tout comme la déclaration environnementale de produit.
Si le label «écologique» doit être considéré comme un indicateur dans la mesure où il n'embrasse que certaines problématiques (ressources, santé, etc.), la déclaration environnementale de produit est le résultat d'une analyse de cycle de vie portant soit sur le cycle complet soit

sur les premières phases du cycle de vie. Elle reprend en outre des informations complémentaires, souvent relatives à la santé (acoustiques, émissions toxiques...). A cet égard, elle est également un outil de communication privilégié entre consommateur «averti» et producteur mais elle devient également un outil de travail pour le chercheur qui souhaite développer des outils d'évaluation avec l'objectif d'aider l'architecte dans sa pratique quotidienne.
Ainsi l'ACV et la DEP sont des étapes nécessaires dans l'élaboration d'outils d'évaluation et d'aide à la décision.

Au vu de l'analyse d'outils existants que nous avons réalisée, plusieurs conclusions peuvent être tirées.
La première concerne la prédominance de la base de données ECOINVENT dans le secteur des analyses de cycle de vie. En effet, suite aux différentes recherches effectuées, il est apparu que la base de données ECOINVENT était mondialement reconnue comme la référence en matière d'analyse de cycle de vie.
Cette base de données a été élaborée par le ECOINVENT Center (1997) qui regroupe le Swiss Federal Institute of Technology Zürich, le Paul Scherrer Institute, le Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, et le Swiss Federal Research Station Agroscope Reckenholz-Tänikon.
Elle contient plus de 4000 données d'inventaire de cycle de vie industriel sur l'approvisionnement en énergie, d'extraction de ressources, approvisionnement en matériaux, produits chimiques, métaux, agriculture, services de gestion des déchets et services de transport.
Cette base de données intégrée au logiciel SIMAPRO permet de réaliser une analyse de cycle de vie de n'importe quel produit ou service.
Les différents outils analysés ont tous utilisé la base ECOINVENT (totalement ou partiellement) tout en y apportant des compléments d'information, notamment par l'utilisation des DEP de fabricants ou de littératures scientifiques.
Si la plupart des outils permettent l'accès aux bases de données, ce n'est pas le cas des outils anglais qui fonctionnent avec une «boîte noire».

La deuxième conclusion concerne les critères d'évaluation définis par les différents outils d'évaluation environnementale. On peut distinguer deux types de critères. Les critères quantitatifs (chiffrables) liés à la consommation d'énergie grise et aux émissions de polluants liés à cette consommation d'énergie. Ces critères sont facilement quantifiables par analyse de cycle de vie et reconnus universellement comme étant une réponse claire aux impacts environnementaux. Ils sont utilisés par la plupart des outils analysés.
Cependant, certains outils du type checklist proposent également des critères « qualitatifs » (non chiffrables) comme notamment :

- des critères liés au traitement des déchets et au recyclage ;
- des critères liés à la modification voir la destruction des paysages ;
- des critères liés à la consommation en eau ;
- des critères liés à la santé ;

Ces derniers critères sont plus difficilement voir impossibles à quantifier et donc à évaluer. C'est la raison pour laquelle ces critères ne sont pas ou plus intégrés dans les différents logiciels « ACV ».
Cependant, malgré ce désavantage, ces critères ont toute leur importance dans l'évaluation environnementale d'un bâtiment ou d'un composant.
En effet, aujourd'hui, dans un secteur responsable à la fois de l'exploitation des ressources à raison de 50 % et de la production de déchets à raison de 40 % , il est impensable, dans un but d'économiser des matières premières, de ne pas tenir compte du type de ressources utilisées, du contenu recyclé de certains matériaux, de l'indice de rareté ou du temps de renouvellement de ces ressources, du potentiel de recyclage ou de valorisation des matériaux mis en œuvre ainsi que de l'existence des filières de recyclage.
On ne peut également plus faire l'impasse sur le critère « santé », sachant que la population européenne passe aujourd'hui plus de 80 % de son temps de vie dans des milieux intérieurs avec des concentrations élevées en polluants provenant de l'extérieur, mais également de polluants provenant de sources spécifiques à l'environnement intérieur (mobilier, matériaux de construction et de décoration, activités humaines, détergents et cosmétiques…).
Une qualité de l'air intérieur médiocre a ainsi des conséquences sur la santé et est considérée comme un facteur aggravant de certaines maladies telles que : allergies, asthme, cancer des poumons, maladies pulmonaires chroniques, infections respiratoires, troubles cardiovasculaires sévères, irritation des voies respiratoires (syndrome du bâtiment malsain : SBS).
Les critères qualitatifs (ressources, recyclage, santé) même s'ils ne donnent aujourd'hui qu'une information partielle et non chiffrable, sont donc des critères essentiels tant pour l'analyse environnementale de composants ou de bâtiments que pour les politiques sociales et économiques à suivre par de nombreux pays dans les prochaines années.
A cet égard, ils doivent être pris en compte au même titre que les critères quantitatifs.

Une troisième conclusion concerne l'évaluation.
De nombreuses similitudes peuvent être dégagées dans les méthodes d'évaluation utilisées par les outils analysés.
La plupart des outils permettent l'évaluation de matériaux «composant » et/ou de parois « composées ». Ceci présente l'avantage de pouvoir également tenir compte des performances techniques (isolation thermique, performances acoustiques, inertie…). Il est en effet inutile

d'utiliser un matériau de construction qui n'exerce pas d'influence nocive sur l'environnement si sa durabilité ne peut être garantie ou s'il présente des performances techniques insuffisantes.
Les outils analysés permettent d'évaluer différentes phases du cycle de vie, mais rarement un cycle complet.
Dans la plupart des cas, l'évaluation se fait du berceau à la porte (cradle to gate). Les outils suisses et anglais tiennent également compte de la phase de renouvellement (dans le cas de durée de vie inférieure à la durée d'évaluation) et de la phase d'élimination (transport compris).
La phase de mise en œuvre ou de construction n'est jamais prise en compte. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'il existe une multitude de mises en œuvre différentes, tant au niveau de l'assemblage que des produits de fixation. La mise en œuvre va également dépendre des traditions constructives locales, de la situation et du type de chantier, de la typologie du bâtiment, mais également de l'entreprise de construction et de ses habitudes professionnelles.
En outre, de nombreuses inconnues subsistent encore aujourd'hui par rapport à la phase de construction proprement dite, notamment la provenance exacte de certains matériaux, les engins et outils utilisés...
La phase de fin de vie est également peu mesurée ou évaluée. En effet, il est étonnant de constater que:
- peu de fabricants ou de producteurs connaissent le traitement subi par leur matériau en fin de vie ainsi que la situation des filières;
- peu de concepteurs s'intéressent aux matériaux de récupération ou aux matériaux ayant déjà vécu; peu de concepteurs établissent un choix de matériaux selon le «futur à long terme» de ceux-ci
- peu de maîtres d'ouvrages ont conscience du potentiel «matière première» et de la valeur économique des matériaux composant leur bâtiment.

Ce phénomène est sans doute lié au fait qu'en Belgique et dans la plupart des pays européens, les déchets de chantier sont considérés comme étant la propriété de l'entrepreneur[22] c.-à-d. celui qui les produit sur chantier. Il revient donc à l'entrepreneur de les gérer et de se préoccuper de leur «devenir» tandis que les autres acteurs se préoccupent uniquement du «devenir» des nouveaux matériaux.

La plupart des outils « checklist » et certains logiciels ACV ont mis en place une hiérarchie entre critères et pondèrent ainsi les résultats obtenus.
C'est le cas notamment du Green Guide avec un facteur de pondération de 36% pour les émissions de gaz à effet de serre (GWP) et de la norme NIBE qui pondère par un facteur 8 les critères liés à la santé et aux émissions de gaz et de polluants.
Cette pondération différenciée des critères ou indicateurs peut donner lieu à des résultats relativement différents selon l'outil utilisé et de ce fait, d'une part, faire obstacle à une certaine homogénéité de résultat et d'autre part, rendre difficile la compréhension à la fois des impacts environnementaux et sanitaires d'un projet, mais également rendre difficile la communication entre les différents acteurs d'un projet de construction.
Cette difficulté de compréhension devient d'autant plus importante que les bases de données et la méthodologie qui ont servi à l'élaboration de l'outil ne sont pas accessibles, comme c'est le cas pour le Green Guide ou le logiciel ENVEST.

Suite à l'analyse des outils existants, nous avons pu établir quelques pistes de réflexion pour l'élaboration de notre outil. Ces réflexions sont les suivantes:
L'outil doit être développé à la fois comme un outil d'aide à la décision, un outil d'analyse critique et de vérification, mais également comme un outil de communication. Pour ce faire, il est important d'offrir à l'utilisateur un accès aisé aux bases de données ainsi qu'à la méthodologie utilisée, mais également des outils de communication (graphiques, chiffres, échelles de valeurs, etc.). Si son fonctionnement doit être facilement appréhendable, l'outil doit présenter un degré élevé de fiabilité notamment par une approche scientifique suffisamment étoffée.
Dans l'objectif de réduction globale des impacts environnementaux, l'outil tiendra compte des performances énergétiques à atteindre. L'étude des différents impacts doit se faire en fonction d'une performance d'isolation (standard «basse énergie» ou standard passivhaus»).
L'outil doit être développé sur base d'une vision globale des impacts environnementaux et sanitaires en reprenant à la fois :
- des critères quantitatifs (mesurables), mais également des critères qualitatifs (non mesurables);
- les différentes phases du cycle de vie, y compris les phases de transports

L'outil doit pouvoir évoluer dans le temps, tant au niveau des impacts (les connaissances scientifiques vont encore progresser dans ce domaine), mais également au niveau du marché des matériaux de construction qui est en constante augmentation et évolution.
L'outil, ses critères d'évaluation, sa méthodologie et son fonctionnement sont décrits dans la partie suivante.

22 Ceci n'est pas le cas en Suisse où le maître d'ouvrage est responsable des déchets engendrés par son projet. Il a donc l'obligation de les gérer: plan de gestion des déchet à introduire lors du dépôt de permis de construire.

Partie D

Développement d'un outil d'évaluation

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre 1 - L'évaluation environnementale, nécessité, défis et philosophie suivie **226**

Nécessité de l'évaluation environnementale 226

Outil d'évaluation – défis et philosophie recherchée 227

Chapitre 2 - La maison individuelle et ses composants, support de l'outil **231**

Chapitre 3 - Méthodologie **233**

Définition du champ de l'étude 233

Critères et indicateurs considérés 233

Élaboration d'une base de données 235

Durée d'évaluation 240

Unité de comparaison 241

Synthèse et compilation des données 241

Question ouverte: la pondération des critères 242

Arboresence et schémas de fonctionnement 243

L'évaluation environnementale, nécessité, défis et philosophie suivie

En tant qu'architecte ayant, pendant une dizaine d'années, eu la responsabilité de mener à bien des projets de construction et de rénovation dans la région bruxelloise, il me semblait essentiel de pouvoir retirer l'essence même de cette recherche et de la mettre à profit pour les différents acteurs de la construction en Belgique et en particulier pour les architectes.

Le métier d'architecte est un métier passionnant, mais difficile. Les maîtres d'ouvrage souhaitent aujourd'hui construire des bâtiments pour un coût minimum et dans des délais de plus en plus courts. Les contraintes administratives sont également de plus en plus conséquentes et les intervenants de plus en plus nombreux. Si les contraintes budgétaires et administratives peuvent être pensées comme des atouts et peuvent stimuler le processus de conception, ce n'est pas le cas de la contrainte de temps. L'architecture est un jeu de patience, le projet doit mûrir, décanter...
Le métier d'architecte est un métier de service où, en bâtissant des édifices, l'architecte s'engage à fournir à la communauté des espaces de vie, des « refuges». Pour mettre en oeuvre son projet, il doit dialoguer, apprendre à connaître et à cerner les personnalités, les attentes, les besoins, les envies et les dépasser. Il doit également communiquer, avec son client, avec l'entrepreneur sur chantier, avec les administrations, avec les bureaux d'étude-conseil...
Le métier d'architecte est un métier de synthèse entre différents savoirs: l'histoire, la géographie, les mathématiques, les sciences, l'anthropologie, la psychologie, l'écologie et toutes autres notions liées à l'esthétique, la technologie, le climat et la société... Bâtir n'est pas la manifestation d'un «don» spécifique, c'est simplement la synthèse d'un travail de recherche et d'expérimentation autour de ces différents savoirs avec lesquels l'architecte se mesure et jongle chaque jour. Ce faisant, lorsqu'il cherche une information, il doit pouvoir la trouver rapidement. Et lorsqu'il est face à un maître d'ouvrage ou tout autre intervenant, il doit pouvoir la communiquer le plus clairement possible.

Pour ces différentes raisons, je me suis engagée personnellement, au travers de cette thèse, à aider les architectes praticiens, en mettant à leur disposition un outil d'aide à la décision.

1. Nécessité de l'évaluation environnementale

Face, d'une part, aux enjeux environnementaux et énergétiques auxquels est confrontée notre société et d'autre part, à la diversité impressionnante de matériaux de construction qui est mise à notre disposition, il s'avère nécessaire de pouvoir évaluer les bâtiments et les matériaux qui les composent en termes de qualités environnementale et sanitaire.
Conférer une qualité « soutenable et globale » à un projet d'architecture au travers des éléments qui le composent sous-entend qu'un nombre important de critères soient intégrés au processus de décision ; processus allant du concept ou de la pensée jusqu'à sa concrétisation sur chantier.
Par définition, un projet d'architecture soutenable doit tenir compte de manière simultanée des aspects environnementaux, économiques et sociaux. Pour être effective, cette prise en compte ne peut être superficielle ou ponctuelle ; elle doit se développer dans une approche véritablement réflexive et holistique, permettant un « réglage » continu et itératif du projet.
Cette approche se traduit par la nécessité voire l'obligation de disposer d'informations précises et structurées sur la façon dont le projet d'architecture et ses composants répondent aux exigences, aux objectifs et aux attentes des différents acteurs du projet, qu'ils soient concepteurs ou demandeurs. Ceci est la base même de l'évaluation.
En fournissant de manière régulière des « indications»

relatives aux performances du projet aux praticiens de l'architecture et aux décideurs, l'évaluation n'est pas déconnectée du projet, au contraire, elle participe ainsi à sa définition. Si cette évaluation repose sur une méthodologie adaptée aux différents enjeux d'un projet d'architecture, elle joue alors différents rôles complémentaires au service de la dynamique du projet et du choix des matériaux composant celui-ci.

L'évaluation est d'abord un outil d'analyse critique, de vérification et d'aide à la décision. L'évaluation fournit davantage d'informations et de connaissances sur le projet et ses composants, en relation avec les différentes dimensions et priorités du développement durable. C'est pourquoi elle permet aux différents acteurs impliqués d'analyser le projet et ses composants de manière critique et d'effectuer des choix en meilleure connaissance de cause, et cela à tout moment de l'évolution du projet.

L'évaluation est également un outil d'aide à la résolution de problèmes. Par les informations qu'elle fournit, l'évaluation alimente le processus de résolution de problèmes. Elle permet en effet d'évaluer et de comparer différentes options ou variantes, de capitaliser les connaissances et d'ainsi développer un processus d'optimisation.

L'évaluation est aussi un outil privilégié de communication. En effet, un projet d'architecture soutenable repose en grande partie sur une communication accrue entre les différents acteurs impliqués. Avec l'objectif de faciliter cette communication, l'évaluation peut constituer un moyen efficace de structurer ou de gérer les échanges entre partenaires. Elle peut également, grâce aux résultats obtenus, alimenter certains processus participatifs et échanges entre demandeur et concepteur.

Pour être réellement efficace, le processus d'évaluation doit idéalement avoir lieu dès le début du projet d'architecture. Trop souvent encore, l'évaluation n'est demandée qu'une fois le projet réellement concrétisé sur papier, après un permis d'urbanisme voire au moment du chantier.
Évaluer le projet dès la phase d'esquisse est primordial car c'est souvent dans cette phase que sont effectués des choix cruciaux en termes de matériaux de construction, de procédés constructifs ou tout simplement en termes de développement futur du projet.
Cette première étape, caractérisée par une grande liberté d'optimisation du projet, correspond de manière assez paradoxale au moment où la connaissance des différents paramètres est souvent la plus faible.
Au fur et à mesure que le projet évolue vers sa concrétisation sur chantier, la connaissance du projet tend à augmenter, mais les nombreuses décisions qui sont prises, diminuent au fur et à mesure la marge de manœuvre exploitable pour influencer le projet et limitent ainsi les possibilités de réaction des différents acteurs.

Dans l'objectif de pouvoir prendre les meilleures décisions au moment adéquat, il apparaît donc indispensable de disposer d'un maximum d'informations le plus en amont possible dans le développement d'un projet.
Mais l'évaluation ne doit pas se faire uniquement lors de la phase de conception et de réalisation d'un projet d'architecture, elle doit au contraire se poursuivre tout au long de la vie de celui-ci en intégrant également la phase d'utilisation, voire à plus long terme, la phase de rénovation ou de déconstruction.
L'évaluation doit donc idéalement couvrir plusieurs phases temporelles en étant prospective, accompagnatrice et récapitulative.
L'évaluation se doit d'être prospective dans les premières phases du projet d'architecture. Elle doit en effet permettre d'estimer les performances attendues et de les comparer avec les objectifs fixés préalablement.
L'évaluation doit également être accompagnatrice dans les phases conduisant à la concrétisation du projet en permettant une vérification régulière des performances obtenues ainsi qu'une optimisation par ajustements successifs.
L'évaluation se doit d'être également récapitulative, c.-à-d. qu'au terme de la concrétisation et du chantier, l'évaluation permet d'offrir une synthèse des caractéristiques du projet tel qu'il a été réellement construit. Cette synthèse peut également favoriser l'émergence de nouvelles connaissances, particulièrement pour les étapes ou les phases du cycle de vie futures (rénovation, déconstruction), et plus largement, pour d'autres projets similaires.

2. Outil d'évaluation – défis et philosophie recherchée

Comme nous l'avons constaté au chapitre précédent, en termes de cadre législatif et de réalisation d'analyses de cycle de vie au niveau du secteur industriel de la construction, la Belgique est le mauvais élève de l'Europe.
Cependant, de plus en plus d'architectes, de maîtres d'ouvrage, d'administrations et/ou de décideurs politiques sont en demande d'informations « environnementales ».
Il nous apparaissait donc urgent de développer un outil en réponse à cette demande.
Mais l'idée même de développer un tel outil a germé suite à deux autres constats.
Le premier concerne la politique – non globale - d'économie d'énergie. Dans le secteur de la construction, on a vu apparaître ces dernières années une volonté de réduire considérablement la consommation d'énergie liée à l'utilisation des bâtiments (chauffage, climatisation, éclairage…). Celle-ci est sans nul doute liée à l'augmentation importante du prix des combustibles fossiles

,mais également à la prise de conscience de certains impacts environnementaux tels que le réchauffement climatique, l'épuisement de certaines ressources naturelles et les dommages causés aux écosystèmes terrestres et marins…
Cette volonté est exprimée à plusieurs échelles, à la fois de la part des acteurs politiques et des administrations par des mesures de subsides et de primes, mais également de la part des concepteurs et des particuliers soucieux d'alléger leur facture énergétique.
La réduction des besoins en énergie dans l'habitat individuel se marque essentiellement par une isolation et une étanchéité très performantes permettant d'atteindre certains standards énergétiques comme le standard «passivhaus ».
Cependant, différentes études réalisées en Suisse, en France et au sein de l'équipe de recherche « Architecture et Climat » ont démontré que lorsqu'on tend à diminuer sensiblement la consommation d'énergie à l'utilisation d'une habitation en travaillant sur la performance de l'enveloppe, on consomme proportionnellement davantage d'énergie grise liée à l'utilisation de matériaux de construction. Cette énergie grise devient alors prédominante dans le bilan énergétique global.
En outre si, dans un contexte global et mondial, les économies d'énergie fossile et la réduction des émissions de gaz à effet de serre sont des critères importants pour le choix des matériaux de construction, ils ne peuvent plus aujourd'hui être considérés comme des critères « uniques », au regard des différents dommages causés à l'environnement : perte de biodiversité, problème d'approvisionnement en eau, acidification des lacs....
Au contraire, ces critères doivent être englobés dans un panel plus large reprenant également des critères tels que la consommation des ressources naturelles, la consommation en eau, le recyclage des déchets, la santé, etc. Il est donc essentiel que l'architecte puisse œuvrer à une conception cohérente en tenant compte

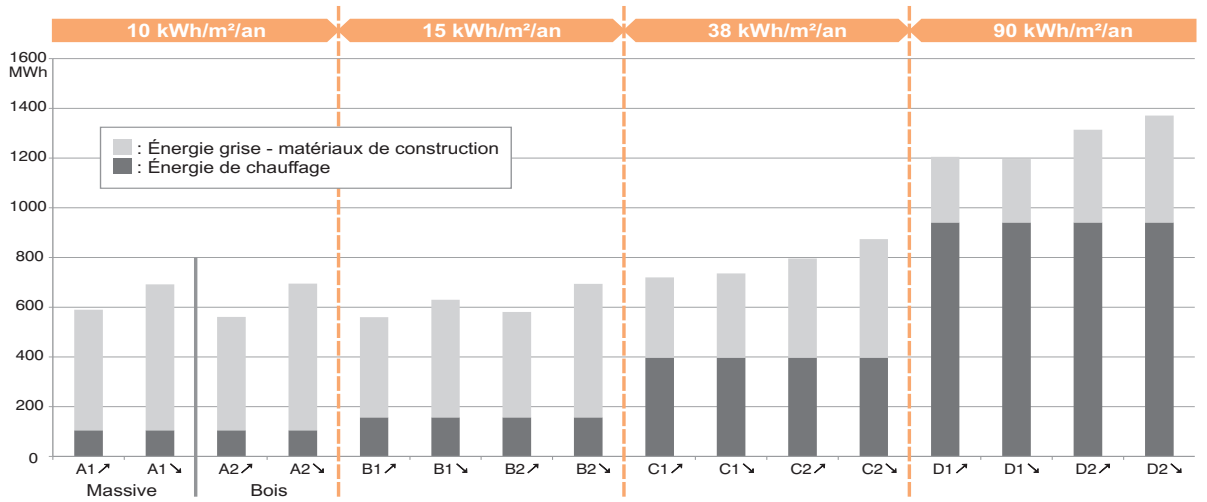


Illustration D1.01 : Comparaison énergie de chauffage et énergie grise sur 50 ans

Explication de l'illustration D1.01:

Les comparaisons «énergie grise / énergie de chauffage» sont basées sur un modèle «maison individuelle», suivant quatre niveaux de performance (heating demand)

[D]: proche de 90 kWh/m².an;
[C]: 38 kWh/m².an;
[B]: 15 kWh/m².an;
[A]: 10 kWh/m².an.

Le système de chauffage a été considéré avec un rendement global de 80 %. Celui-ci est produit à partir de gaz naturel avec un niveau de potentiel de réchauffement climatique (GWP) de 231 g éq CO2/kWhPC.
Chaque niveau de performance correspond à une épaisseur spécifique des matériaux d'isolation pour chaque composition de la paroi.
Deux typologies constructives ont été définies (massive et à ossature). Pour chacune de ces typologies, selon le type de mur, les auteurs ont défini des compositions de murs avec divers matériaux. Deux cas ont été retenus pour la définition des murs :

[↗] matériau avec un potentiel important de réchauffement climatique
[↘] matériau avec un faible potentiel de réchauffement climatique

Les comparaisons ont été faites sur 50 ans, en tenant compte du remplacement et de l'élimination de certains matériaux

d'un équilibre entre performances énergétiques et performances environnementales.
Un second constat concerne l'importance donnée à l'enveloppe extérieure des bâtiments aussi bien en termes d'image qu'en termes de performance énergétique.
Incontestablement, en termes d'image, on met aujourd'hui l'accent sur la surface. Certains architectes proposent des façades « écrans » aux images/surfaces multicolores. Cette tendance peut parfois avoir comme conséquence que l'image d'un bâtiment devient plus importante que le bâtiment lui-même.
En termes de performance énergétique, l'enveloppe du bâtiment est considérée comme un filtre devant protéger l'ambiance intérieure contre les aléas du climat. Cette exigence est aujourd'hui exacerbée par les défis énergétiques auquel doit faire face notre société.
Mais l'enveloppe du bâtiment a deux faces. D'une part, il y a la face extérieure qui est tournée vers l'espace public et collectif. Et d'autre part, il y a également une face intérieure en interaction constante avec l'occupant et qui peut influencer le bien-être, le confort et la santé de celui-ci. Cette face intérieure et son influence sur l'être humain doivent également être prises en considération si l'on souhaite répondre aux priorités sociales du développement durable c.-à-d. améliorer la qualité de vie de chaque être humain en lui offrant des espaces de vie et de travail confortables, agréables et respectueux de la santé.
Face à ces différents constats, il nous semblait indispensable de mettre au point un outil d'évaluation ayant les fondements suivants :

2.1. Outil basé sur une vision qui se veut globale

Aujourd'hui tout industriel, tout producteur de matériau affirment développer des produits « soutenables ».
Certains fabricants vont encore plus loin dans cette démarche et revendiquent, publicité à l'appui, les caractéristiques suivantes pour leurs produits : matériau « naturel », matériau « sain », matériau « renouvelable», matériau « recyclable », matériau « local », matériau «peu énergivore»...
Ces producteurs et ces fabricants ont sans aucun doute raison… mais leurs messages sont simplifiés, réduits à certains critères et sont donc partiellement « faux » ou incomplets.
En effet :

- certains matériaux naturels sont rares ou peu développés ; dans ce cas, leur exploitation peut être dommageable pour l'environnement;
- la gestion de certaines exploitations de matériaux naturels, tels que certains bois tropicaux, est également dommageable pour l'environnement;
- certains matériaux naturels peuvent présenter des risques pour la santé, comme l'amiante notamment.

En outre:

- un matériau n'est le plus souvent naturel que par sa provenance. Son utilisation dans le bâtiment nécessite des transformations et l'ajout plus ou moins important d'additifs;
- un matériau « sain » ou respectueux de la santé l'est avant tout par la qualité de sa mise en œuvre;
- un matériau respectueux de la santé cesse de l'être s'il est traité avec des produits toxiques, comme le sont certains traitements du bois;
- de nombreux produits ou éléments de construction peuvent être recyclés par des techniques appropriés. Cependant peu d'entre eux le sont réellement par manque de filières effectives;
- les matériaux renouvelables ont des durées de renouvellement très variables (exemple : 30 ans pour le bois, 9 ans pour le liège, 1 an pour le lin);
- certaines ressources renouvelables, notamment le liège n'existent pas en quantité suffisante que pour être fortement utilisées.

L'objectif de cet outil d'évaluation, n'est donc pas de mettre en avant les matériaux dits « écologiques » mais d'établir de manière objective et sur base de la définition et des priorités de l'Architecture Soutenable, un ensemble cohérent de critères, respectueux à la fois de l'environnement, de la santé des êtres vivants et de la viabilité économique, tout en tenant compte des réalités du secteur, des réalités de chantier, mais également des caractéristiques spécifiques et des performances atteintes par les matériaux une fois mis en œuvre.

2.2. Outil d'évaluation associant des indicateurs quantitatifs et qualitatifs

Établir un ensemble cohérent de critères signifie, d'une part, tenir compte de l'ensemble du cycle de vie du bâtiment ainsi que des matériaux, produits et éléments qui le composent et d'autre part, tenir compte à la fois des impacts environnementaux qui sont aujourd'hui scientifiquement identifiés, mais également des impacts environnementaux « supposés » suivant le principe de précaution.
Développer un outil d'évaluation environnementale signifie avoir une réflexion prospective c.-à-d. une réflexion



Illustration D1.02 : Défis d'un outil d'aide à la décision

qui dépasse le stade des connaissances actuelles et qui élabore de nouveaux critères. Ceux-ci ne seront alors pas présentés de manière quantitative, mais qualitative, au moyen d'une échelle graphique.

Exemple:

Pour illustrer ce propos, la consommation des ressources non énergétiques peut être mise en évidence grâce au kg Antimoine équivalent, chaque ressource étant comparée à l'Antimoine sur une échelle de valeurs. Par contre, les résultats (chiffres/nombres) obtenus ne nous disent pas si la ressource est naturelle, synthétique ou recyclée, si elle est renouvelable ou non, etc.

C'est pourquoi l'outil associe des critères « quantitatifs» ou mesurables et des critères « qualitatifs ».
Cette association est également une spécificité propre au monde de la construction où par exemple la qualité de mise en œuvre suppose à la fois des matériaux dont les performances auront été testées et quantifiées sur une échelle de valeurs, mais avant tout une utilisation intelligente de la matière et une main-d'œuvre de qualité.

2.3. Outil alliant « pédagogie et compréhension » des enjeux et données scientifiques

Pour qu'un outil d'aide à la décision soit efficace c.-à-d. être apprécié et utilisé par de nombreux acteurs du monde de la construction, il doit pouvoir répondre à différents critères:

- son fonctionnement doit être aisé: l'utilisateur doit rapidement entrer dans l'outil et en comprendre le fonctionnement;
- son approche scientifique doit être accessible: l'outil doit avoir une démarche pédagogique en ce sens qu'il met en évidence et de manière compréhensible les enjeux environnementaux et de santé;
- l'outil doit être précis sans être trop exhaustif: plus l'outil sera exhaustif, plus son utilisation deviendra complexe et peu accessible. Dans ce cas, l'architecte passera rapidement la main et fera appel à un bureau d'étude spécialisé;
- l'outil doit fonctionner sur base de données scientifiques rigoureuses, tout en évitant d'abandonner les critères qualitatifs non mesurables;
- l'outil ne doit pas substituer à l'intelligence de l'utilisateur: son fonctionnement doit permettre la créativité et donc être itératif;
- l'outil doit pouvoir être utilisé à chaque phase de conception et de construction (esquisse, avant-projet, permis d'urbanisme...) en donnant une réponse adéquate face à l'avancement du projet et aux demandes spécifiques de chaque phase.

En un mot, l'outil d'aide à la décision doit être simple (dans son accessibilité et fonctionnement) sans être simpliste (données scientifiques, critères...).

2.4. Outil évolutif qui anticipe les réglementations « à venir »

Nous souhaitons développer un outil qui puisse s'ajuster au mieux à l'évolution des critères environnementaux et sanitaires, mais également à l'évolution du marché des matériaux de construction :

- Évolution des critères

Fondés sur les connaissances actuelles (environnement et santé), les critères d'évaluation environnementale sont voués à évoluer. En effet, la découverte d'atteintes à l'environnement ou à la santé, aujourd'hui inconnues, pourra, dans un avenir proche ou lointain, nécessiter la définition de nouveaux critères.

- Évolution des matériaux

La plupart des fabricants de matériaux de construction, traditionnels ou non, tentent d'améliorer et d'adapter la composition des matériaux en fonction d'exigences croissantes en matière d'environnement et de santé. Ceci signifie que des matériaux aujourd'hui « déconseillés » pourraient être « acceptables » ou « recommandés» demain.

- Évolution des réglementations

L'ensemble des réglementations liées à l'environnement et l'énergie sont en train d'évoluer, et cela tant au niveau de l'Europe que de la Belgique ou des Régions. C'est notamment le cas au niveau du marquage CE, le marquage français Afsset pour ce qui concerne l'aspect santé. C'est aussi le cas de la performance énergétique des bâtiments (PEB)dont les exigences vont se renforcer dans les prochaines années.
L'outil d'aide à la décision doit anticiper ces mesures, voire innover, en proposant des critères et une évaluation qui vont au-delà des législations en vigueur.

La maison individuelle et ses composants, support au développement de l'outil

Le développement de l'outil d'aide à la décision s'est fait sur base d'un modèle de maison individuelle et de ses composants. La maison « de référence » dont les plans et les élévations sont présentés ci-après, est une maison « 4 façades» utilisée précédemment dans le cadre du contrat de recherche « Élaboration d'un outil d'aide à la conception de maisons individuelles à basse et très basse consommation d'énergie» et de la publication[1] « *Choix des matériaux – Ecobilans de parois*» réalisés pour le Département de l'Énergie et du Bâtiment durable du Service Public de Wallonie.

S'il est évident que la maison individuelle n'est pas une réponse adéquate aux priorités de l'urbanisme et de la ville soutenable qui tentent de densifier le tissu urbain et de limiter les réseaux, cette typologie d'habitat a été choisie comme base d'étude et cela pour deux raisons. Premièrement, s'attarder sur la maison individuelle a permis de simplifier le modèle d'étude et d'arborescence de l'outil d'aide. En effet, les typologies et les systèmes constructifs que l'on retrouve dans l'habitation individuel sont relativement élémentaires et le nombre de matériaux de construction utilisés peut-être restreint à 150 voir 200 matériaux.

En second lieu, selon l'Enquête socio-économique réalisée par la Direction générale des Statistiques et Informatique économique en 2001[2], il apparaît que le logement représente la plus grande part du patrimoine immobilier belge. Trois types de construction ont été différenciés parmi les maisons unifamiliales : les constructions ouvertes, semi-ouvertes et fermées. Il apparaît que les constructions ouvertes (4 façades) sont les plus courantes en Belgique (32%). Se pencher sur ce type

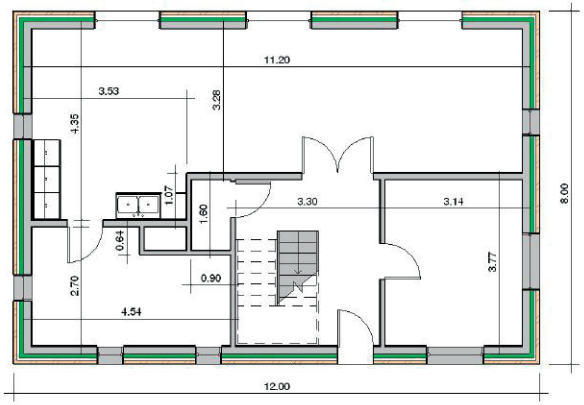


Illustration D2.01 : Maison de référence : plan du rez

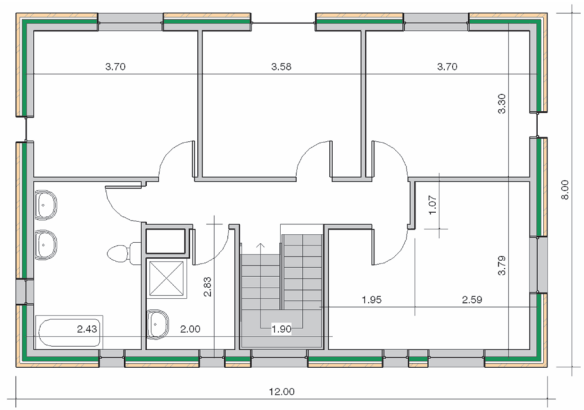


Illustration D2.02 : Maison de référence : plan du 1er étage

1 [TRACHTE 2010]

2 Enquête socio-économique générale 2001, Institut national de Statistiques (INS), Service public fédéral Economie, P.M.E, Classes moyennes et Energie, Direction générale Statistique et Information économique, Bruxelles, 2007

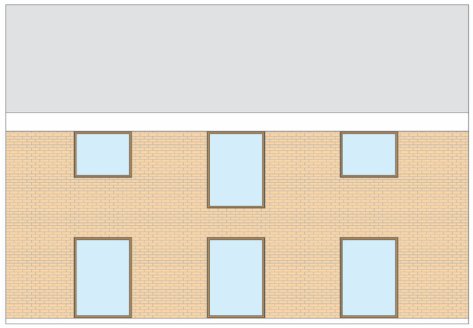


Illustration D2.03 : Maison de référence : élévation Sud

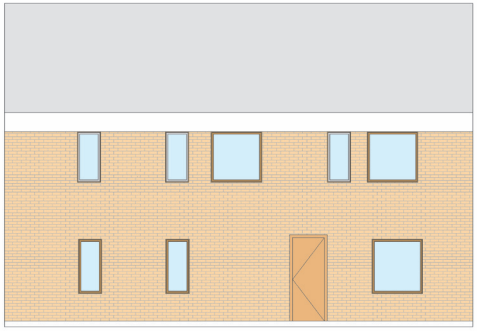


Illustration D2.04 : Maison de référence : élévation Nord

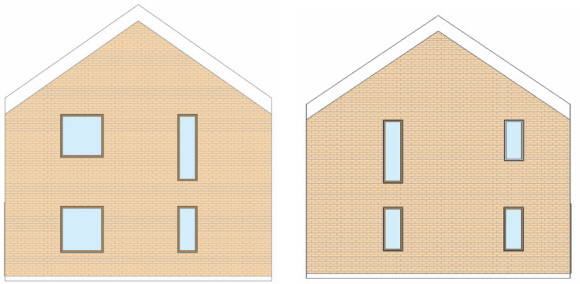


Illustration D2.05 : Maison de référence : élévations Ouest et Est

d'habitat permet d'une part d'en diminuer à la fois ses impact énergétique et environnemental et d'autre part de sensibiliser un grand nombre d'architectes et de particuliers.
La maison de référence a ensuite été décomposée en parois comme le présentent les illustrations D2.06 et D2.07 : murs extérieurs, toitures, dalles de sol, ensemble châssis/vitrage, plancher d'étage, cloisons intérieures...
Pour chaque type de parois, deux types de structure ont été établis:

- une structure dite «massive»: murs porteurs en blocs de maçonnerie, dalle en béton armé, plancher d'étage en hourdis...
- une structure dite à « ossature bois »

Sur base de ces deux types de structure, nous avons ensuite sélectionné différentes typologies de parois, en fonction du type de bardage extérieur et de la finition intérieure.
Exemple:
Pour les murs extérieurs - structure massive, nous avons sélectionné les typologies suivantes : enduit sur isolant, parement en briques (enduites ou non), bardage sur lattis.

Afin de composer les différentes parois en respectant le type de stuctur et les typologies sélectionnées, près de deux cents matériaux de construction ont été sélectionnés et étudiés. Parmi ceux-ci on retrouve notamment :
- les matériaux de structure;
- les blocs et briques;
- le bois et dérivés;
- les métaux;
- les isolants;
- les matériaux de second-oeuvre;
- les matériaux de couverture;
- les matériaux de parement;
- les revêtement de sol;
- les châssis et vitrages.

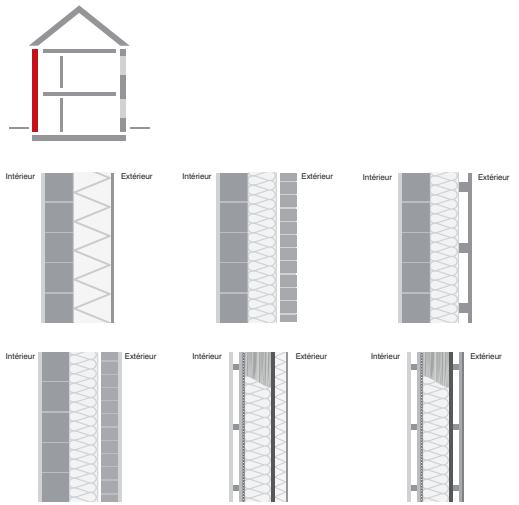


Illustration D2.06 : Maison de référence : typologies de mur extérieur

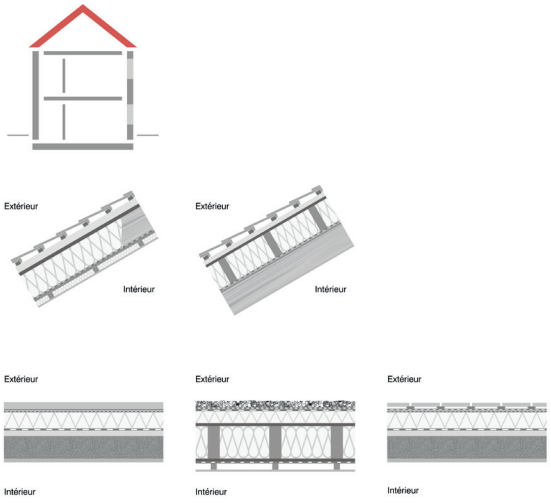


Illustration D2.07 : Maison de référence : typologies de toiture

Méthodologie

1. Définition du champ de l'étude

1.1. Phases analysées

Notre objectif est de développer un outil permettant d'analyser un bâtiment et ses composants sur l'ensemble des phases du cycle de vie.
Suivant cet objectif, nous avons considéré les phases suivantes :

[FAB] : La phase « du berceau à la porte » qui reprend l'extraction, la fabrication et le transport entre ces deux phases;

[MEO] : La phase « mise en oeuvre » qui reprend le type d'assemblage utilisé et les nuisances «santé» provoquées par la mise en oeuvre sur les ouvriers;

[REN] : La phase d'utilisation avec la rénovation ou le remplacement éventuel de certains composants. Cette phase reprend, pour ces composants, une phase «du berceau à la porte»

[FIN] : La phase de fin de vie en tenant compte du traitement actuel des déchets et du potentiel de recyclage de ceux-ci.

Nous n'avons pas considéré les critères liés à la consommation d'énergie grise et d'émissions de polluants atmosphériques lors de la phase de mise en oeuvre, et ce pour les raisons suivantes:

- la phase de mise en oeuvre dépend de nombreux facteurs qui peuvent difficilement être déterminés avec précision et en amont du projet: typologie et mode constructif, situation du chantier, type d'entreprises ou d'entrepreneurs...;
- la plupart des matériaux peuvent être mis en oeuvre de plusieurs façons et à l'aide de différents modes d'assemblage : mécanique, collage, cimentage... La mise en oeuvre des matériaux et le mode d'assemblage dépendent évidemment des directives données par l'architecte lors de l'exécution, mais également des habitudes de l'entrepreneur;

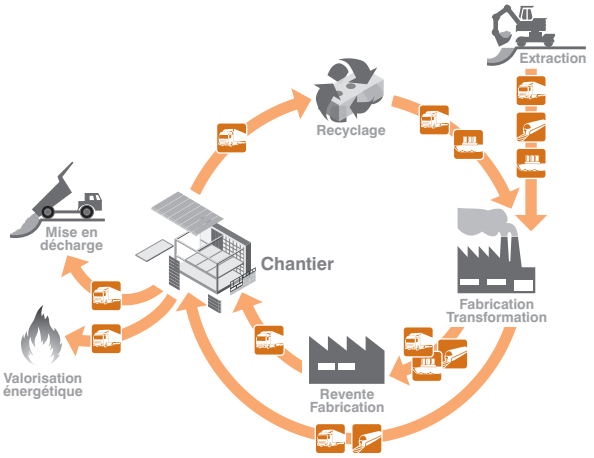


Illustration D3.01 : Cycle de vie d'un matériau

- de nombreux matériaux « additifs » sont utilisés lors de la mise en oeuvre. La quantité (nombre ou poids volumique) utilisée est souvent difficile à évaluer ou à mesurer. À titre d'exemple, nous ne sommes pas parvenus à estimer la quantité de pièces métalliques (vis, boulon...) utilisées dans une construction à « ossature bois », même en questionnant plusieurs entrepreneurs spécialisés dans ce type de construction.

Par contre, d'autres critères liés à l'utilisation des ressources et à la santé ont été pris en compte.

1.2. Matériaux et composants exclus du champ d'étude

Certains éléments ou composants ont été exclus du champ de l'étude par manque de données. Il s'agit des matériaux de finition tels que peintures, papier peint, colles, vernis, etc.

2. Critères et indicateurs considérés

Comme nous l'avons dit précédemment, notre objectif

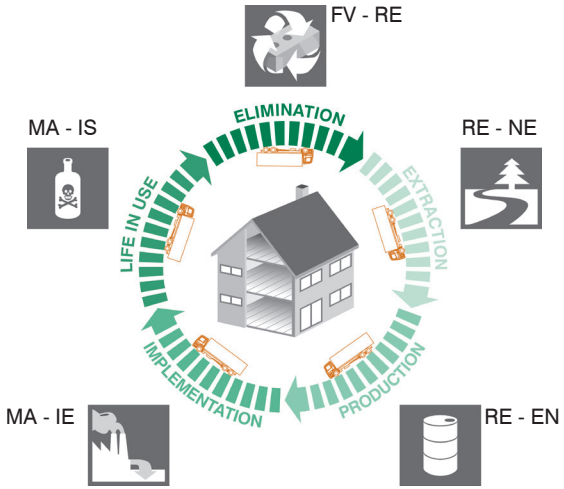


Illustration D3.02 : Cycle de vie et catégorie de critères

est de développer un outil comportant à la fois des critères quantitatifs et des critères qualitatifs.
Suivant cet objectif, cinq catégories de critères ont été définies :
[RE-EN] : Économie des ressources énergétiques
[RE-NE] : Économie des ressources non énergétiques
[MA-IE] : Maîtrise des impacts sur l'environnement
[MA-IS] : Maîtrise des impacts sur la santé
[FV-RE] : Fin de vie et potentiel de recyclage

2.1. Économie des ressources énergétiques

Les indicateurs repris sont des indicateurs quantitatifs :
[TTE] : Consommation d'énergie grise totale
[NRE] : Consommation d'énergie non renouvelable
[TRA]: Impact du transport sur la consommation d'énergie totale

Les indicateurs [TTE] et [NRE] sont calculés pour les trois phases considérées [FAB], [REN] et [FIN], tandis que l'indicateur [TRA] ne considère que la distance parcourue entre l'usine de fabrication et le chantier (centre de Bruxelles) en fonction de la situation géographique de l'usine (voir scénarios de transport, partie B, chapitre 4)

2.2. Économie des ressources non énergétiques

Les indicateurs considérés sont à la fois quantitatifs et qualitatifs :
- le type des matières premières dominantes utilisées : naturelle, synthétique ou recyclée;
- l'état de la ressource utilisée : est-elle renouvelable ou non renouvelable ? Est-elle présente en grande quantité ou au contraire en très faible quantité ?
- la disponibilité de la ressource via l'indice de rareté

L'indice de rareté est basé sur la comparaison entre la « rareté » des ressources naturelles non renouvelables abiotiques et celle de l'Antimoine (Sb) qui, par convention, a une valeur de 1. Plus l'indice de rareté est grand, plus la ressource est limitée et son utilisation est problématique en termes de préservation des ressources.

2.3. Maîtrise des risques sur l'environnement

Les indicateurs repris sont des indicateurs quantitatifs liés essentiellement à la pollution atmosphérique :
[GWP] : Potentiel d'effet de serre
[AP] : Potentiel d'acidification
[POCP] : Potentiel de formation d'ozone troposphérique
[TRA] : Impact du transport sur la pollution atmosphérique
L'indicateur [GWP] est calculé pour les trois phases considérées [FAB], [REN] et [FIN].
Les indicateurs [AP], [POCP] sont calculés uniquement pour la phase [FAB].
L'indicateur [TRA] ne considère que la distance parcourue entre l'usine de fabrication et le chantier (centre de Bruxelles) en fonction de la situation géographique de l'usine (voir scénarios de transport, partie B, chapitre 4)

2.4. Maîtrise des risques sur la santé

Les indicateurs repris sont des indicateurs qualitatifs:
[NMO] : nuisances lors de la mise en oeuvre
La mise en oeuvre des matériaux dans le bâtiment peut occasionner des nuisances pour les ouvriers, telles que l'irritation des yeux, l'irritation des mains et/ou l'irritation des voies respiratoires. Celles-ci sont occasionnées par la texture du matériau, ses dégagements ou les additifs nécessaires à la mise en oeuvre.
En théorie, le travail sur chantier requiert un certain nombre de protections relatives à chacun des risques encourus pour la santé des ouvriers. Les précautions à prendre sont indiquées dans les fiches de données de sécurité (FDS) rédigées par les fabricants de substances, en accord avec le Règlement CLP[3].
En pratique, malgré une gestion attentive et consciensieuse de cet aspect sur chantier, de nombreux hommes de métiers n'appliquent pas scrupuleusement toutes les recommandations de protection. En vertu du principe de précaution, il convient donc de considérer que le risque encouru par les ouvriers peut-être potentiellement important, voire maximal dans certains cas.
[SUT] : substances toxiques pour la santé
La phase de fabrication implique parfois l'utilisation de substances dangereuses pour la santé.
Ces substances et leur étiquetage étant aujourd'hui réglementés par le règlement CLP, nous baserons notre évaluation d'une part sur les phrases de danger et d'autre part sur des publications d'organismes spécialisés en maladie du travail et substances dangereuses tels que l'INRS et l'INERIS.
[EMT] : émissions toxiques pour la santé
Pour évaluer les matériaux selon ce critère, nous nous baserons à la fois sur des publications de médecins ou d'organisme spécialisés en pollution de l'air inté-

3 réglement CLP: Regulation (EC) n°1272/2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures

rieur ainsi que sur la réglementation française relative à l'étiquetage des niveaux d'émission de 11 polluants majeurs (protocole Afsset)
Il faut toutefois signaler que les informations permettant de répondre aux deux derniers critères sont encore relativement peu accessibles. En effet, en ce qui concerne le règlement CLP, toutes les substances doivent être classées et étiquetées depuis le 1er décembre 2010 et cette obligation s'appliquera également aux mélanges à partir de juin 2015.
Concernant le protocole Afsset, un étiquetage des caractéristiques d'émissions de substances, selon leur niveau d'émission, sera obligatoire dès janvier 2012 pour les matériaux de construction et de décoration

2.5. Fin de vie et potentiel de recyclage

Les indicateurs repris sont des indicateurs qualitatifs:
[WAS] : traitement actuel en fin de vie.
Cet indicateur permet de préciser, en plus de la quantité « réelle » de déchets produits, ce qu'il advient aujourd'hui des matériaux de construction en fin de vie. En effet, aujourd'hui, de nombreux matériaux qui ont la capacité d'être recyclés ne le sont pas pour des raisons économiques (coût du transport) , par manque d'infrastructure (ou de législation adéquate) et/ou par manque d'informations.
Ce critère permet donc d'avoir une vision de ce qui se fait actuellement en termes de traitement de déchets.
Certains détracteurs avanceront sans doute l'argument de l'évolution des filières de recyclage dans les dix prochaines années pour démontrer l'intérêt de ce critère. Mais il est clair qu'un concepteur responsable et soucieux de développer une architecture soutenable appliquera le principe de précaution et sera attentif au traitement actuel des matériaux qu'il met en oeuvre.
[RRM] : contenu recyclé introduit dans le processus de fabrication
[REC] : potentiel de recyclage des matériaux
[ASS] : type d'assemblage utilisé lors de la mise en oeuvre

Tableau D3.01: Récapitulatif des critères et indicateurs par phase de cycle de vie

CYCLE DE VIE DU MATERIAU							
[FAB] cradle to gate		**[MEO]** mise en œuvre		**[REN]** utilisation/vie en œuvre		**[FIN]** fin de vie	
critère	*indicateur*	*critère*	*indicateur*	*critère*	*indicateur*	*critère*	*indicateur*
[RE - EN]	[TTE] [NRE] [TRA]	**[RE - EN]**	/ / /	**[RE - EN]**	[TTE] [NRE] [TRA]	**[RE - EN]**	[TTE] [NRE] [TRA]
[RE - NE]	type de ressources état de la ressource origine abiotic resource depl.	**[RE - NE]**	type de ressources état de la ressource origine	**[RE - NE]**	type de ressources état de la ressource origine abiotic resource depl.	**[RE - NE]**	/ / / /
[MA - IE]	[GWP] [AP] [POCP] [TRA]	**[MA - IE]**	/ / / /	**[MA - IE]**	[GWP] [AP] [POCP] [TRA]	**[MA - IE]**	[GWP]
[MA - IE]	[SUT]	**[MA - IE]**	[NMO]	**[MA - IE]**	[EMT]	**[MA - IE]**	/
[FV - RE]	[RRM]	**[FV - RE]**	[ASS]	**[FV - RE]**	[RRM]	**[FV - RE]**	[WAS] [REC] [FIL]

[FIL] : situation des filières de recyclage
Ce dernier indicateur peut porter à confusion. En effet, selon les législations belge et européenne, aucun déchet ne peut sortir des frontières d'un pays[4]. Nous avons ici pris en considération que les déchets subissaient une transformation (concassage,etc.) avant d'être envoyés vers les filières de recyclage à travers toute l'Europe et à proximité des usines de productions.

Le tableau ci-après présente un récapitulatif des différents critères et indicateurs repris selon la phase de cycle de vie considérée.

4 Convention de Bâle : décision 97/640/CE du Conseil du 22 septembre 1997.

3. Élaboration d'une base de données

Notre objectif premier est de développer un outil d'aide à la décision basé sur un contexte belgo-belge tant au niveau des traditions constructives que du secteur industriel des matériaux de construction, en prenant en compte les déclarations environnementales de produit ou les analyses de cycle de vie réalisées par les producteurs belges de matériaux de construction.
Après avoir consulté de nombreux producteurs, fabricants et revendeurs de matériaux de construction ainsi que les différentes fédérations belges de producteurs et de fabricants, le constat fut décevant.
Il n'y a toujours pas, en Belgique, de cadre législatif pour la réalisation d'analyses de cycle de vie. De surcroît, le secteur industriel belge de la construction manifeste une très grande inertie quant à la réalisation et la

publication d'analyses de cycle de vie ou de déclarations environnementales. Ces aspects environnementaux et sanitaires semblent encore tabou pour la plupart des fabricants, hormis quelques exceptions.
Fin 2008, seuls quelques fabricants avaient réalisé une analyse de cycle de leur(s) produit(s) et seules les « Carrières de Pierre Bleue Belge» les ont rendues publiques. Aujourd'hui, certains industriels semblent avoir compris l'importance de ce type d'analyse, notamment en termes de communication commerciale. Les cimentiers, les bétonniers et les briquetiers ont développé des analyses de cycle de vie pour différents produits. Quelques initiatives doivent cependant être soulignées:

- certaines fédérations et confédérations se lancent dans des déclarations environnementales « raccourcies » donnant quelques informations sur les impacts environnementaux liés à la fabrication de leur produit (du berceau à la porte). C'est un premier pas important, mais réellement insuffisant face à la demande à la fois des concepteurs, mais également des différents instituts ou équipes de recherche comme le VITO[5], le CSTC et Architecture et Climat;
- le projet financé par le ministère fédéral de la santé concernant la mise au point de règles pour l'élaboration d'une analyse du cycle de vie et pour la rédaction d'une déclaration des produits respectueux de l'environnement (PCR - Product Category Rules) et cela pour les matériaux d'isolation. Ce projet est mené par le VITO en colaboration avec le VIBE[6] et le CERAA[7];
- le projet MMG (Materiaalgebonden Milieuprofielen van Gebouwelementen) mené par le VITO pour le compte de l'OVAM[8].

Au vu de ce constat, nous avons décidé de travailler en deux temps. Dans un premier temps, nous avons élaboré une base de données en nous appuyant sur des bases de données existantes (ECOINVENT, écobilans KBOB, ECOSOFT, etc.). Utiliser trois bases de données, même étrangères, offre un intérêt majeur: être au plus près d'une réalité industrielle. En effet,d'une part, l'évaluation environnementale basée sur l'ACV reste encore aujourd'hui très approximative et d'autre part, les pays européens utilisent un « mix énergétique » différent, l'utilisation de ces trois bases de données (dont deux se réfèrent à des EPD de fabricants et de l'industrie de la construction) permet d'être au coeur d'une certaine complexité qui, prise globalement, autorise l'élaboration de données pertinentes et admissibles pour le secteur de la construction en Belgique.
Dans un second temps, nous souhaiterions travailler en collaboration avec les producteurs et fédérations afin d'établir une base de données spécifique au secteur belge de la construction ; sachant que cette collaboration ne pourra se faire que lorsque la Belgique bénéficiera d'un cadre réglementaire pour la réalisation d'ACV.

3.1. Bases de données existantes

Les bases de données utilisées pour la réalisation de cet outil d'évaluation sont les suivantes :

- la base de données KBOB (Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der Offentlichen Bauherren). Cette base de données est accessible sur le site internet (http://www.bbl.admin.ch/kbob/00493/00495/index.html?lang=fr)
- la base de données du logiciel autrichien ECOSOFT, développé par l'Institut IBO (IBO - Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie). Cette base est accessible sur le site internet (http://www.ibo.at/de/oekokennzahlen.htm)
- la base de données d'inventaire ECOINVENT. Cette base de donnée est née de l'initiative du Centre Ecoinvent - Swiss Centre for Life Cycle Inventories, un centre de compétences qui réunit plusieurs organismes tels que l'Agroscope de Reckenholz-Tänikon (ART), l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich (ETHZ), l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) et le Laboratoire Fédéral d'Essai des Matériaux et de Recherche (EMPA)

Celles-ci ont été sélectionnées sur base de différents critères présentés ci-dessous:

La transparence et la fiabilité des informations

Ayant pour objectif de développer un outil transparent tant sur la méthodologie que sur les résultats obtenus, il est essentiel que les bases de données utilisées aient été développées sur base des mêmes principes de transparence. Cette transparence concerne plusieurs points : la source des données, la ou les méthodes de calcul et les limites du système de l'analyse de cycle de vie du produit étudié.
Il est également essentiel de pouvoir informer l'utilisateur sur la provenance des informations récoltées : proviennent-elles d'un institut spécialisé, proviennent-elles de fabricants ou de producteurs et dans ce cas ont-elles été vérifiées...?
Les trois bases de données sont présentées avec un ou plusieurs rapports expliquant la méthodologie utilisée, les limites de l'étude, la manière dont les données ont été récoltées et vérifiées.
Ces rapports sont téléchargeables sur les sites internet suivants:

- KBOB : http://www.bbl.admin.ch/kbob/00493/00495/index.html?lang=fr
- ECOSOFT : http://www.ibo.at/de/oekokennzahlen.htm

5 VITO: Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek www.vito.be
6 VIBE: Vlaams Instituut voor Bio-Ecologisch Bouwen en Wonen - www.vibe.be
7 CERAA : Centre d'Etudes, de Recherches et d'Actions en Architecture - www.ceraa.be
8 OVAM: Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij www.ovam.be

- ECOINVENT: tous les rapports (format pdf) sont disponibles en s'inscrivant comme « guest » sur le site http://www.ecoinvent.org/documentation/reports/

Les bases de données KBOB et ECOSOFT ont utilisé les données spécifiques aux matériaux de construction de la base de données Ecoinvent ainsi que des données ACV ou EPD de fabricants.

Le champ ou les limites du système d'évaluation

Les bases sélectionnées doivent avoir le même champ d'étude ou tout au moins une partie du champ d'étude doit être identique.
Les trois bases de données sélectionnées ont été établies selon une approche « cradle to gate » selon la norme ISO 14040 « Management environnemental ».
Seule, la base KBOB donne des informations sur la fin de vie en termes de consommation d'énergie grise et d'émission de gaz à effet de serre, en considérant un pourcentage de recyclage moyen européen.

Le choix des indicateurs / la terminologie

Les bases de données sélectionnées doivent contenir en totalité ou en partie les critères et indicateurs de l'outil à développer.

- La base de données KBOB reprend deux indicateurs: la consommation d'énergie grise (totale et non renouvelable) et les émissions de gaz à effet de serre (GWP);
- La base ECOSOFT reprend les indicateurs suivants: la consommation d'énergie grise (renouvelable et non renouvelable), les émissions de gaz à effet de serre (GWP), les émissions de gaz acidifiants (AP), les émissions provoquant le phénomène d'eutrophisation (EP) et d'ozone photochimique (POCP);
- La base ECOINVENT reprend de nombreux indicateurs suivants différentes méthodes de calcul d'impact. Nous avons considéré les indicateurs suivants: «depletion of abiotic resources », « acidification potential », « global warming potential/100y », « photochemical ozone creation potential » selon la méthode CML2001.

Les données concernant la consommation d'énergie grise d'ECOINVENT ont été tirées de la publication luxembourgeoise « Leitfaden für nachhaltiges Bauen und Renovieren » éditée en 2008 par le Centre de Ressources des Technologies pour l'Environnement(CRTE), Luxembourg.

La mise à jour des données

L'objectif étant de développer un outil évolutif dans le temps et en fonction des innovations du secteur industriel, il est essentiel que les bases sélectionnées effectuent également des mises à jour régulières ou annuelles. Les trois bases de données sont mises à jour tous les ans.

Autres sources d'information

Ponctuellement, d'autres sources d'informations ont été utilisées pour répondre à certains critères qualitatifs. Il s'agit entre autres de:

- la base suisse de déclarations environnementales de produits « SIA »;
- la base française de déclarations environnementales de produits « INIES »;
- la publication « Leitfaden für nachhaltiges Bauen und Renovieren » éditée par le Centre de Ressources des Technologies pour l'Environnement (CRTE), Luxembourg en 2008;
- la publication autrichienne « Passivhaus-Bauteilkatalog » réalisée par l'Osterrichisches Institut fur Baubiologie und Okologie (IBO), éditée par Springer Wien NewYork en 2009.

Concernant les critères liés au traitement en fin de vie et au recyclage, nous avons travaillé sur base de différents ouvrages dont:

- le guide multimédia MARCO « Construire avec l'environnement »
- la publication anglaise « Choosing construction products, guide to the recycled content of mainstream construction product, publiée par the Waste and Resources Action Program (WRAP), en 2008, téléchargeable sur www.wrap.org.uk

Nous nous sommes également et plusieurs fois entretenus avec les sociétés TRADECOWALL et VEOLIA.

3.2. Compilation des données et création d'une base de données « Architecture et Climat »

Critères quantitatifs

Pour les critères quantitatifs tels que [TTE], [NRE], [GWP], [AP] et [POCP], la compilation de ces données a été réalisée de la manière suivante :

- lorsque les trois bases de données présentent des données pour un matériau sélectionné, nous avons calculé la moyenne de celles-ci et pris la donnée se rapprochant le plus de cette moyenne;
- lorsque seulement deux bases de données présentent des données pour un matériau sélectionné, c'est la donnée la plus favorable qui a été prise en considération;
- Lorsqu'une seule base de données présente des données pour un matériau sélection, ce sont ces données qui a été prises en compte.

Les illustrations D3.03 et D3.04 ci-après présentent une explication graphique de la méthode utilisée.
L'ensemble des données a été compilé dans un tableur Excel dont une partie est montrée en exemple ci-après par l'illustration D3.05.

Critères qualitatifs

Les critères qualitatifs ont été évalués suivant une échelle de couleur allant du vert au rouge, comme le présentent les trois tableaux D3.02, D3.03 et D3.04

Matériau	Base de données	Indicateurs		
		Fabrication	Elimination	NRE
Laine de roche	ECOSOFT	22.7	/	22.2
	KBOB	22.6	0.248	21.7
	ECOINVENT	22.3	/	20.98
Energie grise consommée		22.6	0.248	21.7

Illustration D3.03 : Compilation des données environnementales

Matériau	Base de données	Indicateurs		
		Fabrication	Elimination	NRE
Panneau OSB	ECOSOFT	45.8	/	17.5
	KBOB	36.4	0.165	13.8
	ECOINVENT	/	/	/
Energie grise consommée		36.4	0.165	13.8

Illustration D3.04 : Compilation des données environnementales

Matériaux et composants	Densité ρ kg/m³	Energie grise fabrication MJ/kg	NRE fabrication MJ/kg	Energie grise élimination MJ/kg	Effet de serre fabrication kg CO2 eq/kg	Effet de serre élimination kg CO2 eq/kg	Acidification fabrication kg SO2 eq/kg	Ozone troposph. fabrication kg H2C2 eq/kg
GRANULATS								
sable de rivière/mer	2000	0,0587	0,0541	0,235	0,00239	0,0118	0,00004	0
sable de carrière	2000	0,0587	0,0541	0,235	0,00239	0,0118	0,00004	0
gravier de rivière/mer	2000	0,136	0,1	0,177	0,00426	0,00937	0,00004	0
gravier de carrière	2000	0,0587	0,0541	0,177	0,00239	0,00937	0,00004	0
BETON COULE ET CIMENT								
béton maigre	*[2000 à 2200]* **2000**	0,374	0,351	0,177	0,05	0,0088	0,00019	0,00001
béton normal armé (dalles)	2400	0,61	0,56	0,201	0,11	0,0104	0,00021	0,00001
béton normal armé (charges élévées)	2400	0,96	0,89	0,201	0,134	0,0104	0,0003	0,00001
ciment portland CEM I	900 à 1900	3,78	3,5	/	0,83	/	0,0013	0,00004
chape de compression sur hourdis	1700	1,292	1,088	0,196	0,17	0,00953	0,00306	0,0000085
chape ciment	1700	1,292	1,088	0,196	0,17	0,00953	0,00306	0,0000085
BETON PREFABRIQUE								
hourdis en béton	1800	0,8	0,8	/	0,13	/	0,00041	0,00001
BLOCS DE MACONNERIE								
bloc de béton lourd	2400	0,8	0,75	0,201	0,12	0,00935	0,00028	0,00001
bloc de béton semi-lourd	2000	0,8	0,75	0,201	0,12	0,00935	0,00028	0,00001
bloc de béton léger (argile expansé)	1200	5,15	4,94	0,188	0,429	0,00897	0,00262	0,00004
bloc de terre cuite plein	1000	2,85	2,58	0,188	0,238	0,00867	0,00064	0,00004
bloc de terre cuite creux	650	2,85	2,58	0,188	0,238	0,00867	0,00064	0,00004
bloc silico-calcaire	1800	1,4	1,28	0,177	0,13	0,0088	/	/
bloc béton cellulaire	*[600 à 800]* **650**	3,49	3,25	0,188	0,411	0,00897	0,00075	0,00003

Illustration D3.05: Base de données «Architecture et Climat»

Tableau D3.02 : Échelle graphique - critère [RE-NE]

Échelle graphique	Nature de la ressource	État de la ressource	Origine de la ressource
	issue du recyclage	quantité importante	Local
	naturelle renouvelable	/	Benelux
	/	quantité suffisante	Local et/ou Europe
	naturelle non renouvelable	/	Europe
	/	quantité limitée	Europe et/ou Monde
	synthétique non renouvelable	rare	Monde

Tableau D3.03 : Échelle graphique - critère [FV-RE]

Échelle graphique	Contenu recyclé	Potentiel de recyclage	Assemblage	Origine de la ressource
	> 75%	> 75%	solidarisation sans élément	Local
	61% à 75%	61% à 75%	fixation mécanique	Benelux
	46% à 60%	46% à 60%	mortier ou soudure	Local et/ou Europe
	31% à 45%	31% à 45%	mortier colle	Europe
	16% à 30%	quantité limitée	colle ou bitume	Europe et/ou Monde
	< 15%	rare		Monde

Tableau D3.04 : Échelle graphique - critère [NMO]

Échelle graphique	Irritation des mains	Irritation des yeux	Irritation des voies respiratoires
	non	non	non
	oui	non	non
	oui	oui	non
	non	non	oui
	non	oui	oui
	oui	oui	oui

3.3. Durée de vie des matériaux

La base de données ainsi créée reprend également une estimation de la durée de vie des matériaux selon leur application dans la construction (voir tableau D3.05. ci-après). Cette donnée est indispensable, voire indissociable des impacts environnementaux.

En effet, un matériau ayant au départ, de faibles impacts environnementaux, mais une durée de vie courte peut, à terme, provoquer plus de dommages qu'un matériau ayant à la fois des impacts environnementaux conséquents et une durée de vie importante.

La définition d'une durée de vie typique (DVT) des matériaux de construction n'a pas encore fait l'objet d'un consensus au niveau des fabricants.
C'est sans doute en raison des enjeux économiques ou commerciaux qui en découlent, mais également parce que la durée de vie d'un matériau dépend fortement de la qualité de conception des détails constructifs, de mise en œuvre des matériaux sur chantier et du soin donné à l'entretien et la maintenance du bâtiment et de

Tableau D3.05 : Estimation de la durée de vie des matériaux selon son application dans le bâtiment - logements

	Applications				Durée de vie moyenne
	Structure	Peau extérieure	Peau intérieure	Autres	
béton coulé	100	100	100	/	100
béton préfabriqué	100	100	100	/	100
blocs béton	100	100	100	/	100
briques terre cuite	100	100	100	/	100
autres blocs	100	/	100	/	100
profilés acier	100	80	/	100	95
profilés acier inox.	100	100	/	100	100
tôle aluminium	/	100	/	100	92
tôle cuivre	/	100	/	100	100
tôle zinc	/	100	/	/	100
bois massif	80	50	30	30	48
panneaux à particules	40	20	30	30	30
isolant minéraux	/	40	60	60	55
isolant synthétiques	/	50	60	60	57
isolants - fibres vég.	/	40	60	60	53
étanchéité	/	30	40	40	37
pare et freine-vapeur	/	30	40	40	37
enduit et plâtre int.	/	/	30	30	30
enduit extérieur	/	30	/	/	30
carrelage	/	/	/	80	80
pierre naturelle	/	100	/	100	100
revêtements de sol souples	/	/	/	5 à 30	5 à 30
chassis/vitrage		40	40	/	40

Tableau D3.06 : Impact de la durée de vie / durée d'évaluation sur le bilan environnemental d'un matériau

	Durée de vie moyenne	Durée d'évaluation de 50 ans		Durée d'évaluation de 100 ans	
		remplacement	élimination	remplacement	élimination
béton coulé	100	0	1	0	1
béton préfabriqué	100	0	1	0	1
blocs béton	100	0	1	0	1
briques terre cuite	100	0	1	0	1
autres blocs	100	0	1	0	1
profilés acier	95	0	1	0	1
profilés acier inox.	100	0	1	0	1
tôle aluminium	92	0	1	1	2
tôle cuivre	100	0	1	0	1
tôle zinc	100	0	1	0	1
bois massif	48	0	1	1	2
panneaux à particules	30	1	2	3	4
isolant minéraux	37	1	2	2	3
isolant synthétiques	37	1	2	2	3
isolants - fibres vég.	37	1	2	2	3
étanchéité	26	1	2	3	4
pare et freine-vapeur	37	1	2	2	3
enduit et plâtre int.	30	1	2	3	4
enduit extérieur	25	1	2	3	4
carrelage	80	0	1	1	2
pierre naturelle	100	0	1	0	1
revêtements de sol souples	13	4	5	7	8
chassis/vitrage	40	1	2	2	3

ses composants.

4. Durée d'évaluation

L'évaluation des matériaux de construction ou de composants doit permettre de tenir compte de la durée de vie moyenne d'un bâtiment, qu'il soit dédié au logement, à l'habitat ou à toute autre fonction.
Mais elle doit également tenir compte de la durée de vie des matériaux de construction[9] qui le composent, de l'intervalle d'entretien, si ceux-ci nécessitent un entretien, et de l'intervalle de renouvellement, en fonction de la durée de vie spécifique à chaque matériau ou composant.
Pour ce faire, il est nécessaire d'évaluer les matériaux de construction ou composants sur un certain laps de temps. De manière générale, les durées d'évaluation utilisées sont de l'ordre de 60 à 75 ans :
- 60 ans pour le Green Guide to Housing Specifications;
- 75 ans pour la norme NIBE;
- 60 ans pour l'outil Catalogue construction;
- 60 ans pour le Référentiel du CSTC.

La durée d'évaluation devrait idéalement se baser sur la durée de vie moyenne des bâtiments. Hors la durée de vie d'un bâtiment n'est pas une donnée fixe, elle dépend du système constructif, de la localisation de la construction, des matériaux employés, de la qualité de réalisation de la construction et de son affectation...
Dans le cadre de cette recherche et de l'outil développé, nous évaluerons les compositions suivant deux durées différentes:

- une durée de 50 ans.
  Cette durée de temps correspond à un temps d'utilisation, après construction, sans gros travaux de rénovation, de réaménagement ou transformation.

9 Nous avons considéré que les matériaux de construction ont été mis en œuvre de manière correcte, selon les différentes normes en vigueur et les codes de bonnes pratiques.

Au terme des cinquante ans, le bâtiment considéré doit être complètement ou partiellement rénové. Cette rénovation s'avère nécessaire pour des questions d'habitabilité (changement de propriétaire, agrandissement...) et d'affectations (changement de fonction) mais également pour des questions de performances (exigences énergétiques, exigences sanitaires, etc.)

- une durée de 100 ans.

  Cette durée de temps permet de mettre en évidence la durée de vie importante de certains matériaux tels les bétons, les maçonneries, certains métaux et autres matériaux de structure ou de gros-oeuvre.

  Cette durée de temps accentue également l'importance du choix des matériaux de second-oeuvre et de finition en termes de bilan environnemental: plus la durée de vie du matériau sera courte, plus souvent le matériau devra être remplacé et plus bilan environnemental de celui-ci sera conséquent.

4.1. Analyse de l'impact de la durée de vie moyenne des matériaux en fonction de la durée d'évaluation

Comme le montre le tableau D3.06, il est évident que le choix de la durée d'évaluation a un impact relativement conséquent sur l'évaluation des dommages causés par les matériaux sur l'environnement, surtout pour les matériaux à courte durée de vie (< 40 ans).

C'est le cas pour les isolants et les matériaux d'étanchéité qui doivent répondre aux exigences de performance énergétique et qui doivent assurer ces performances dans le temps, idéalement, le plus longtemps possible.

C'est aussi le cas pour les revêtements intérieurs qui sont d'une part, fort dépendants des effets de mode (décoration intérieure, aménagement) et d'autre part, soumis à de nombreux contacts directs avec l'occupant (piétinements, frottements, coups, salissures, etc.). Ces matériaux sont ainsi plus susceptibles d'être remplacés régulièrement.

5. Unité de comparaison

L'unité de comparaison utilisée pour l'évaluation doit permettre l'évaluation d'un système c.à-d. un ensemble constitué de plusieurs couches de matériaux ayant chacune une fonction et répondant à certaines exigences techniques.

L'unité choisie est le mètre carré de paroi répondant à certaines exigences thermiques.

Si l'unité de comparaison est le mètre carré de paroi, il est important de souligner que l'outil prend également en considération la masse volumique ou la densité de chaque matériau puisqu'il évalue les différents impacts environnementaux en fonction de la quantité de matière utilisée dans le mètre carré de paroi:

Exemple:

L'énergie grise nécessaire à la fabrication de la couche d'isolant X est le résultat du calcul suivant :

$$\rho_x \times Ep_x \times \text{Energie fab (produit x)}$$

où ρ_x : densité de l'isolant x (en kg/m³), Ep_x: épaisseur de la couche d'isolant X (m) et Energie fab: énergie grise à la fabrication du produit x (MJ/kg)

Exigences thermiques des parois extérieures

Pour les parois de l'enveloppe extérieure, l'évaluation se fera en tenant compte d'un coefficient de transmission thermique « U global » de la paroi permettant d'atteindre les standards énergétiques « basse énergie » ou « passivhaus». Les coefficients à atteindre sont les suivants:

Standard «basse énergie» - 30kWh/m².an	
parois	coefficient «U» maximum
mur extérieur	U< 0.20 W/m²K
toiture	U< 0.20 W/m²K
dalle de sol	U< 0.20 W/m²K
ensemble châssis/vitr.	U< 1.65 W/m²K

Standard «passivhaus» - 15kWh/m².an	
parois	coefficient «U» maximum
mur extérieur	U< 0.15 W/m²K
toiture	U< 0.15 W/m²K
dalle de sol	U< 0.15 W/m²K
ensemble châssis/vitr.	U< 0.8 W/m²K

Prise en compte des performances d'inertie thermique des parois

En terme de confort thermique, il y a lieu de considérer l'inertie thermique des différentes parois du bâtiment ou de l'édifice considéré.

En effet, puisque l'inertie thermique d'un bâtiment est définie comme étant la capacité à stocker et à restituer de la chaleur avec un déphasage de temps, elle permet d'aplanir les pics de chaleur (en été, combinée avec une ventilation) et aide à éviter les grandes variations de température (en hiver).

L'inertie thermique a donc un effet positif sur le confort climatique intérieur.

6. Synthèse et compilation des données

L'ensemble des informations récoltées ont été mises sur cinq tableurs Excel.

- Tableur « Performances hygrothermiques des matériaux de construction» mis en annexe 2;
- Tableur « Performances environnementales des matériaux de construction – critères quantitatifs »;
- Tableur « Performances environnementales des matériaux de construction – critères économie des ressources non énergétiques »
- Tableur « Performances environnementales des matériaux de construction – critère santé »
- Tableur « Performances environnementales des matériaux de construction – critère fin de vie et recyclage»

Les 4 derniers tableurs, bien qu'ils représentent une part im-

portante du travail réalisé, ne sont pas intégrés dans le présent travail. L'auteur et le promoteur de cette thèse désirant lancer la programmation informatique de l'outil dans les prochains mois ne souhaitent pas diffuser publiquement ces informations.

7. Questions ouvertes

7.1. La pondération des critères

Nous avons constaté, dans l'analyse des différents outils d'aide existants que la plupart des outils pondéraient les critères ou les indicateurs, c.à-d. qu'ils avaient mis en place une hiérarchie. Certains critères sont donc plus importants que d'autres.
Dans notre approche holistique et multicritère, nous avons accordé un poids identique à chaque indicateur, estimant que chacun des indicateurs avait son importance dans l'évaluation environnementale et sanitaire de la paroi et/ou du bâtiment.
Un des objectifs de notre outil est de conscientiser les utilisateurs aux différents enjeux environnementaux et sanitaires liés au choix des matériaux, des éléments et des procédés constructifs.
En effet, si dans un contexte global et mondial, les économies d'énergie fossile et la réduction des émissions de gaz à effet de serre sont des priorités majeures, ces deux enjeux ne peuvent plus aujourd'hui être considérés que des critères uniques ou plus importants que les autres. Au contraire, ils doivent être englobés dans une vision globale sur le respect de l'environnement et de la santé qui reprend également des critères tels que la consommation des ressources, la consommation en eau, le recyclage des déchets, les émissions toxiques, etc.
En outre, donner un poids plus important à certains critères peut engendrer par la suite, des choix inadéquats et donc dévier l'utilisateur de l'objectif initial, à savoir réduire l'impact environnemental global.
Exemple: si l'on compare, à même performance thermique, les différents types d'isolant, en tenant uniquement compte des critères «énergie grise» et «GWP», les isolants synthétiques se placeront dans le peloton de tête. Il est cependant évident qu'en terme d'utilisation de ressources, de potentiel de recyclage et d'émissions toxiques, ces isolants ne sont pas les plus intéressants.
Dans l'étude sur les isolants naturels que nous avons réalisée au sein de la cellule de recherche Architecture et Climat, nous avons mis en place différents scénarios de pondération, à la fois pour les critères quantitatifs et qualitatifs. Chaque scénario accordait un poids plus important à une catégorie de critères et a ainsi donné lieu à des résultats fort différents pour chaque isolant.

D'autre part, il faut mettre l'accent sur la difficulté de pondérer des critères quantitatifs et qualitatifs. C'est d'ailleurs une des raisons pour lesquelles la plupart des outils existants ne proposent que des critères quantitatifs.
Néanmoins, cette question suscite un intérêt scientifique particulier.
Voici donc quelques pistes de réflexion sur une manière possible ou souhaitable de pondérer l'ensemble des critères proposés:

- la première piste de réflexion consiste à mettre en évidence les critères qui ont des répercussions notables sur une série d'autres critères

Exemple: le critère de recyclage influence à la fois la consommation des ressources non énergétiques (l'utilisation de matières recyclées permet de limiter l'utilisation de ressources naturelles)et la consommation des ressources énergétiques (les procédés utilisant des matières recyclées demandent moins d'énergie). De ce fait, le critère de recyclage influence également les émissions de polluants atmosphériques.
Le critère de recyclage limite également la production et le traitement de déchets (la réutilisation limite la quantité de déchets à gérer).

- la seconde piste de réflexion consiste à dégager les critères qui ont le plus d'influence sur l'utilisateur tout en ayant des répercussions notables sur d'autres critères

Exemple: le critère « santé - émissions toxiques» touchera un grand nombre d'utilisateurs. Ce faisant, ce critère influencera également la consommation des ressources énergétiques et non énergétiques, mais également les émissions de polluants atmosphériques et les critères liés à la fin de vie des matériaux.
Vu l'ampleur de cette problématique, nous laisserons cette question ouverte et la proposerons dans nos conclusions comme une perspective de recherche future.

7.2. L'intégration du facteur «coût»

Le facteur «coût» est un facteur décisif en termes de choix de matériaux et de systèmes constructifs. Il peut même être aujourd'hui considéré comme le facteur ayant le plus de poids dans les choix effectués par le maître d'ouvrage. Il aurait donc été intéressant, voire essentiel, d'intégrer cette notion de coût dans le développement de l'outil d'aide.
Cependant, nous avons volontairement laissé cet aspect en suspens, et ce pour la raison suivante. Celle-ci est fondamentale bien qu'idéologique et relativement éloignée de la réalité du quotidien. Elle pose la question de l'adéquation possible entre la valeur «écologique» d'un bien immobilier et sa rentabilité économique.
Vu la dégradation alarmante de notre planète, doit-on encore considérer une habitation et/ou un bâtiment en termes de rentabilité économique ou au contraire l'évaluer en termes de valeurs écologiques et sanitaires?
La rentabilité économique implique un «retour sur investissement», idéalement le plus rapide possible. Cette économie à court terme est parfois difficilement conciliable avec la notion d'habité, de confort et de respect de l'environnement ou de la santé qui sont des valeurs qui s'expriment à plus long terme.
Intégrer la notion du long terme écologique et sanitaire dans un processus de rentabilité économique implique d'analyser le coût d'un bâtiment en termes de coût

d'investissement, mais également et surtout en termes de coût global (coût d'investissement additionné des coûts de fonctionnement et de maintenance, des coûts écologiques et sanitaires...). A l'image de l'évaluation des impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie d'un matériau ou d'un bâtiment, le coût devrait également s'évaluer sur l'ensemble du cycle de vie d'un matériau et/ou d'un bâtiment et non se limiter au seul coût d'investissement lors de la construction.
Il est crucial, en termes d'architecture soutenable d'également tenir compte des coûts liés à l'entretien et à la maintenance, des coûts liés à l'exploitation ainsi que des coûts - aujourd'hui difficilement chiffrables - liés à l'empreinte environnementale du matériau ou du bâtiment et à la santé des occupants.
La question posée ci-avant pose les fondements d'un débat de fonds qui ne peut être résolu par cette thèse, mais elle soulève également d'autres questions:

- comment évaluer le coût économique d'un impact environnemental?
- comment évaluer l'économie potentielle des coûts liés au soin de santé par rapport au confort apporté?

Vu l'ampleur de cette problématique, nous laisserons cette question ouverte et la proposerons dans nos conclusions comme une perspective de recherche future.

Lorsqu'on parle de rentabilité, il est intéressant de constater que la rentabilité économique n'est pas exigée à tous les postes de la construction. Par exemple, on n'exige aucune rentabilité économique pour les aménagements de cuisine et de salles de bains, de plus en plus suréquipés. Ceci n'est pas le cas pour un choix d'isolant ou un choix d'un parement. De manière évidente, nos dépenses sont davantage influencées par des éléments subjectifs et affectifs que par la raison.

8. Arborescence et schémas de fonctionnement de l'outil

Une arborescence et des schémas de fonctionnement ont également été pensés et présentés en défense privée et en défense publique.
Afin d'en préserver la totale confidentialité et d'ainsi assurer la possibilité de mener à bien la programmation de l'outil, nous n'avons pas souhaité l'intégrer dans le présent document.

Conclusions

Vers un choix et une utilisation soutenables des matériaux de construction

Cette recherche part d'un constat sur les matériaux de construction, leur relation à l'architecture et leur influence sur l'environnement et la santé tout au long de leur cycle de vie.
Si dans le monde de l'architecture et de la construction, le choix des matériaux est donc une étape fondamentale dans le processus de conception d'un bâtiment, cette étape devient aujourd'hui prépondérante dans la mesure où l'architecte, en matière de choix, fait face à quatre questions majeures: la diversité toujours croissante des matériaux sur le marché de la construction, la tendance à dématérialiser l'architecture, l'augmentation des exigences énergétiques et l'augmentation des exigences environnementales et sanitaires.
Ce faisant, l'utilisation « raisonnée » des matériaux qui avait peu à peu été négligée depuis le 19e siècle est à nouveau d'actualité : le matériau de construction, sa surface, sa matière et ses propriétés intrinsèques jouent un rôle prépondérant dans l'architecture et la construction en répondant à des exigences de performances, de protection et de confort tout en favorisant un langage architectural et en éveillant des sensations.
Mais ce traitement réfléchi de la matière dépasse la notion d'image ou de performance énergétique : le matériau de construction doit aujourd'hui répondre à des exigences de préservation des ressources, de réduction d'impact sur l'environnement et sur la santé, mais également à des exigences de réutilisation ou de recyclage.
Les questions qui nous ont occupés au travers de ce travail furent donc les suivantes:

- quels sont, aujourd'hui, les enjeux des matériaux de construction dans la composition architecturale vis-à-vis de ces différentes matérialités?
- est-il aujourd'hui possible, en termes de choix, de concilier ces matérialités ? Comment choisir un matériau ou un assemblage de matériaux alliant éveil des sens, performance énergétique, respect de l'environnement et de la santé et viabilité économique?

Ces questions ont été développées par rapport à la notion de confort. La notion de confort a été elle-même envisagée, d'une part, sur une échelle spatiale, en questionnant à la fois l'environnement intérieur et l'environnement extérieur et, d'autre part, envisagée sur une échelle temporelle, depuis l'extraction des matières premières jusqu'au traitement en fin de vie et recyclage éventuel en élargissant la notion de confort aux aspects « santé », « réponse aux besoins», etc.
Face au manque évident d'informations environnementales sur les produits de construction en Belgique et la non-adéquation des outils étrangers au contexte belge est apparue une question corollaire aux deux premières : comment aider aujourd'hui le concepteur belge à faire un choix « responsable » ? Comment développer un outil qui soit à la fois accessible, compréhensible, qui permette une réelle prise de conscience et qui soit établi sur base de données scientifiques rigoureuses ? Comment développer un outil basé sur une réflexion globale et prospective allant au-delà des connaissances actuelles ?

La **première partie de cette thèse « Architecture et Matériau de construction »** s'est attachée à analyser brièvement le rôle joué par les matériaux de construction dans l'architecture et leur évolution dans l'histoire de l'humanité. Elle s'est ensuite attelée à décrire les spécificités des grandes familles de matériaux en s'attardant davantage sur les propriétés hygrothermiques: propriétés hygrothermiques, résistance mécanique, caractéristiques techniques, environnementales et sanitaires ainsi que les modes constructifs s'y rapportant.

Le premier chapitre « Matériau, matière d'Architecture Soutenable, tentative de définition » a résumé les différentes matérialités des matériaux de construction en différenciant la matérialité visible qui utilise les textures, les couleurs, les formes, les surfaces pour éveiller des sensations et permettre à tout occupant ou utilisateur de percevoir les espaces architecturaux, la matérialité intrinsèque qui, par les spécificités techniques, physiques et chimiques des

matériaux, permet à ceux-ci et à l'assemblage de ceux-ci de répondre aux exigences fonctionnelles de l'architecture (stabilité, protection, confort, sécurité...) et la matérialité soutenable qui, au travers du cycle de vie des matériaux et des différentes transformations subies par celui-ci, répond aux priorités du développement durable.
Le second chapitre « Architecture et matériaux de construction au fil de l'Histoire, bref aperçu » **offre au lecteur une nouvelle perspective sur les matériaux de construction en détaillant l'évolution des matériaux et des techniques constructive depuis la sédentarisation en 10 000 ans av.J-C. grâce à une série de lignes du temps.**
Ce chapitre a mis en évidence d'une part la grande constance dans l'utilisation de certaines matières, les périodes propices aux innovations et d'autre part les nombreux progrès technologiques de ces deux derniers siècles et l'augmentation croissante et fulgurante de la consommation des différentes ressources naturelles : combustibles fossiles, eau, matériaux... Le facteur principal de progrès est la découverte et l'accessibilité aux combustibles fossiles (coke, charbon, fuel et gaz naturel). L'usage intensif de ces « *trésors énergétiques* » a décuplé l'efficacité et la rentabilité des processus industriels et a ainsi permis l'essor du transport et du commerce international ainsi que l'évolution de notre société vers une société de consommation.
Le troisième chapitre « Caractéristiques des matériaux de construction », complété par l'annexe 1, a mis en évidence l'ensemble des spécificités des grandes familles de matériaux: bois, pierre naturelle, terre crue, terre cuite, métaux, liants minéraux, béton, verre, matières plastiques, matières bitumineuses et matériaux isolants. Chaque famille de matériaux a été étudiée sous différents aspects: évolution historique, propriétés physiques, mécaniques, environnementales et sanitaires, spécificités de mise en œuvre, types de produit, fin de vie et recyclage.
Ce chapitre a fait valoir les multiples potentialités techniques et physiques des matériaux en identifiant d'une part les possibilités « sensibles », les possibilités techniques de mise en œuvre, mais également l'influence de chaque matériau sur l'environnement et la santé.
La conclusion de cette première partie a mis en lumière, par le biais de l'architecture et de l'utilisation des matériaux de construction, le changement majeur dans la relation que l'homme entretient avec la nature, et ce depuis 1800 : l'homme se détourne de l'artisanat pour s'engager dans l'industrie de masse, il se détache de l'écosystème dont il fait partie en considérant celui-ci comme un bien de consommation et en exploitant sans retenue les ressources naturelles.
En architecture, le 19e siècle est à la fois marqué par la rupture entre la structure de l'édifice et son enveloppe, mais également par la diversité croissante des matériaux de construction et de techniques constructives.
Cette rupture entre structure et enveloppe est une véritable « révolution » dans le monde de la construction, car elle a provoqué une véritable métamorphose de l'architecture: la façade s'affranchissant d'un rôle structurel, d'une fonction portante, libère l'espace, ouvre l'édifice et se couvre de matières diverses. Ce bouleversement a engendré non seulement le développement de nouvelles technologies et de nouveau matériaux, mais aussi un désir de dématérialisation de l'architecture qui s'est traduit par un souhait de légèreté, d'ouverture spatiale et de transparence. Ce désir de dématérialisation est aujourd'hui exacerbé, notamment par une société vouée à l'image et aux écrans, au point que de plus en plus souvent la signification prend le pas sur la fonction.
L'évolution des matériaux a eu lieu à une vitesse exponentielle, en moins de deux siècles alors que l'homme construit depuis plus de 10 000 ans, grâce notamment à l'essor du commerce international, au développement des connaissances scientifiques, mais aussi et surtout grâce à la rapidité des échanges d'informations. Au point qu'aujourd'hui tout semble possible et réalisable.
Si cette diversité « infinie » de matières et de techniques constructives offre bien entendu des possibilités insoupçonnées et terriblement excitantes pour le concepteur, elle est également source de risque avec en premier lieu la

délicate question du choix puisque l'architecte n'a plus à sa disposition toutes les connaissances préalablement acquises par ses prédécesseurs, ni le recul et les connaissances suffisantes pour pouvoir juger correctement de leurs performances.
C'est donc la question fondamentale du «comment choisir» qui est remise sur la table de l'architecte. Cette première partie a répondu à cette question en démontrant que la prise de connaissance de ces trois matérialités et la conjugaison raisonnée de celles-ci lors de la conception d'un projet donnaient forme à une architecture honnête, réfléchie, emplie de sens et en adéquation avec son lieu d'implantation et sa fonction.

A la vision relativement stimulante développée par la question du matériau de construction, ses différentes matérialités, ses évolutions dans le temps, ses caractéristiques propres, ses réponses aux exigences et la question du choix de celui-ci, la **deuxième partie de cette thèse «Matériau de construction et cycle de vie»** a opposé une vision plus réaliste en présentant les conséquences environnementales de l'utilisation de matériaux de construction.Cette deuxième partie a ciblé, tout au long du cycle de vie des matériaux, quatre répercussions majeures sur l'environnement et la santé : consommation de ressources naturelles (énergétiques et non énergétiques), pollution de l'air, de l'eau et du sol, effets sur la santé et production de déchets.
Cette partie de thèse propose au lecteur un nouveau regard sur les impacts environnementaux d'une part, en partant des cycles biogéochimiques pour expliquer les phénomènes de pollution que connaît notre système terrestre et d'autre part en fondant la réflexion sur deux notions fondamentales: la notion de cycle qui à l'image des cycles naturels de recyclage transformant indéfiniment les matières dites « polluantes » en matières « nutritives » et la notion de lien qui met en évidence les liens de cause à effet entre l'homme et son environnement.
Cette partie de thèse a démontré que si ces deux notions sont intégrées en amont du processus de conception et de construction, elles favorisent une architecture soutenable c.-à-d. une architecture qui interagit avec le milieu dans lequel elle s'intègre en bénéficiant des avantages de celui-ci, en protégeant ses occupants des agressions de celui-ci, en apportant à celui-ci des améliorations durables et en protégeant celui-ci ainsi que ses occupants de ses propres nuisances.
Le premier chapitre « Le cycle de vie, de la matière première au déchet » a décrit brièvement les différentes phases du cycle de vie des matériaux de construction depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie, la démolition et les différents traitements et valorisation des déchets, en passant par les différents procédés de fabrication, les différentes mises en œuvre, la vie en œuvre et les notions de durée de vie et de remplacement. Ce chapitre a principalement été étudié suivant la notion de cycle et a apporté des éléments de réponse à travers les aspects suivants : adaptabilité, flexibilité, systèmes de fixation, déconstruction et tri.
Le deuxième chapitre « Les matières premières, exploitation et consommation des ressources » s'est plus longuement attardé sur les matières premières et l'influence de l'exploitation de celles-ci sur la consommation des ressources. Les matières premières ont été classées et décrites suivant leur nature: végétale, animale, synthétique, minérale et issue du recyclage. Les différentes ressources ont été analysées suivant leur disponibilité et leur potentiel de renouvellement et ensuite classées en trois catégories: les ressources énergétiques, les ressources non énergétiques et les ressources en eau. Ces trois catégories de ressources ont été étudiées en tenant compte de leur exploitation et des conséquences environnementales engendrées par cette exploitation. Ce chapitre a mis en évidence non seulement la pression exercée par notre société de consommation et l'industrie sur la biocapacité ou la capacité de renouvellement des stocks terrestres, mais plus spécifiquement la non-adéquation entre les cycles

de production et de consommation et les cycles naturels de renouvellement de la matière et le peu de considération que montre notre société vis-à-vis des déchets qu'elle produit.
Le troisième chapitre « Les processus de fabrication, impacts sur la qualité de l'air, du sol et de l'eau » s'est attaché à décrire de manière précise, d'une part, les cycles biogéochimiques ou cycles de recyclage qui sont à la base de la régulation du système terrestre et, d'autre part, les phénomènes de pollution scientifiquement connus et engendrés par les activités humaines qui, en augmentant sensiblement la quantité de « matière polluante », mettent en péril ces différents systèmes de régulation.
Les phénomènes de pollution engendrés par les activités anthropiques sont l'augmentation de l'effet de serre et les conséquences climatiques, l'acidification de l'atmosphère, l'eutrophisation des eaux de surface et du sol et les pollutions liées à l'ozone. Ces différents phénomènes de pollution ont été longuement analysés en décrivant de manière précise le phénomène biochimique de pollution, les causes et les différents gaz à l'origine du phénomène de pollution et les conséquences locales, régionales, et/ ou globales de celui-ci sur l'environnement.
Ce chapitre a permis d'évaluer les conséquences environnementales à différentes échelles: du micro au macro, en passant de la molécule de carbone aux conséquences climatiques globales. Ce saut d'échelle a confirmé la position de l'homme dans l'écosystème terrestre: l'homme est un maillon d'un processus très large qui le dépasse spatialement et temporellement, mais dont la survie va dépendre de sa rapidité à agir.
Ce positionnement de l'homme par rapport à son environnement confirme ainsi l'importance d'intégrer cette dimension environnementale dans la discipline architecturale. Les questions posées par ces phénomènes de pollution relèvent donc de la manière dont la pratique architecturale, avec l'échelle d'action qui lui est propre, va pouvoir répondre à ces préoccupations. Et une première réponse est le choix réfléchi et l'utilisation raisonnée des matériaux de construction. Car le matériau qui ne sera pas mis en œuvre ne sera également pas produit et n'engendrera aucun impact sur l'environnement et la santé.
Le transport de matériaux de construction tout au long de leur cycle de vie de ceux-ci a fait l'objet du quatrième chapitre « Les matériaux et leur transport, quels impacts? ». **Ce chapitre qui présente un nouvel éclairage sur cette problématique avait comme objectif de répondre à la question suivante: travailler avec des matériaux locaux, régionaux ou européens permet-il réellement de limiter l'impact énergétique et environnemental du transport. Le transport a-t-il une réelle influence sur l'impact environnemental global d'un matériau**?
Ce chapitre a proposé des éléments de réponse en trois points:
- une description de l'historique du commerce international et de l'évolution du transport de marchandises qui a mis en évidence la situation privilégiée ou favorable de la Belgique par rapport aux modes de transport alternatifs.
- l'étude de l'impact environnemental des différents moyens de transport selon différents scénarios et en fonction de sept distances à parcourir. Cette étude a démontré la prédominance du mode de transport sur le bilan environnemental de celui-ci. Ce constat a ensuite été confirmé par une rapide étude sur le transport de certains bois.
- l'étude globale du transport sur le cycle de vie d'un matériau et son bilan environnemental. Cette étude a été réalisée sur base de deux matériaux de la société Knauf et Knaufinsulation.

Le cinquième chapitre « Les matériaux de construction et la santé » **a tenté d'une part de mettre à plat l'ensemble des connaissances actuelles en matière d'impact sanitaire des polluants atmosphériques et des polluants de l'air intérieur et d'autre part, de dépasser ce stade par une approche prospective en tenant compte du principe de précaution et par une approche globale en tenant compte des nuisances sanitaires lors de la fabrication et de la mise en œuvre des matériaux. Ce faisant, ce chapitre met en lumière cet aspect social du secteur de la construction qui est aujourd'hui encore trop souvent négligé.**

Car si ce domaine de recherche est relativement récent et dépasse largement le cadre de la construction, il est évident que les matériaux, tant durant leur fabrication que durant leur mise en œuvre et leur vie en œuvre peuvent avoir des conséquences préoccupantes, voire dramatiques, dans certains cas (amiante notamment).
Les principaux polluants atmosphériques émis entre autres par les procédés industriels de fabrication des matériaux et les moyens de transport, ont été répertoriés en tenant compte de leur influence sur la santé humaine, l'environnement et le patrimoine bâti et en précisant les valeurs guides préconisées par l'Organisation mondiale de la santé.
Ce chapitre s'est ensuite penché sur les produits et les substances nocives utilisés dans les procédés de fabrication et de mise en œuvre en faisant le point sur la réglementation européenne en matière de substances chimiques et dangereuses (règlement REACH, règlement CLP). La question des fibres et matériaux fibreux a également été abordée. Nous avons finalement analysé les émissions des matériaux dans l'air intérieur en présentant le cadre réglementaire et différents labels, en distinguant polluants chimiques et polluants physiques et en décrivant l'influence des principaux polluants intérieurs sur la santé.
Ce chapitre a souligné toute la signification «sociale» du principe de précaution défini par la notion de développement durable. Notre société « technologique », dans sa course à l'innovation, a délibérément oublié ce principe élémentaire et a accordé peu d'intérêt au statut social et à la santé des travailleurs et des utilisateurs. L'exemple le plus probant en est l'amiante et les produits fabriqués à base d'amiante. Si les dangers liés à la manipulation de l'amiante ont été clairement identifiés dans les années 20, il a fallu attendre les années 80 pour interdire l'utilisation de cette matière dans les produits de construction, soit soixante années durant lesquelles les fabricants, par une politique lobbyiste influente, ont continué à produire des produits nocifs en cachant ou minimisant l'impact sanitaire de ces produits à la collectivité. Au lieu d'innover honnêtement dans d'autres produits non toxiques...
Aujourd'hui, face à la progression du nombre de cancers, d'allergies, de maladies chroniques et de syndromes du bâtiment malsain (SBS), l'homme se pose enfin la question de la qualité de l'air, de la qualité des espaces construits en termes de confort et de bien-être. C'est pourquoi il est urgent de traduire les avancées scientifiques dans ce domaine en termes objectifs, clairs et précis pour une population non « avertie » et d'intégrer obligatoirement ce critère dans l'évaluation des matériaux de construction et tout autre produit de consommation. C'est ce que ce travail de thèse a tenté de faire.
Le sixième et dernier chapitre « Les matériaux en fin de vie et la production de déchets » **s'est attaché à la fin de vie des matériaux et à la production de déchets engendrée par celle-ci en offrant, toujours suivant les notions de cycle et de lien, de nouvelles perspectives pour les déchets. Ce chapitre a proposé des éléments de réponse en termes de réduction de déchets, de flux de matières et de type de transformation ou de mise en œuvre afin de favoriser le renouvellement continu et soutenable de la matière.**
Il est en effet assez paradoxal de constater d'une part, qu'aujourd'hui le secteur de la construction consomme presque autant de ressources qu'il ne produit de déchets et d'autre part que notre société vouée à l'innovation technologique ne s'est que trop rarement penchée sur la valeur et le potentiel «matière» de ces déchets.
Ce chapitre a mis en évidence d'une part, l'absence de législation adéquate et d'autre part, la valeur économique de ces «rebuts» et leur potentiel à être réutilisé ou recyclé.
Après avoir présenté les filières traditionnelles de traitement de déchets et leurs désavantages économiques et environnementaux, ce chapitre s'est penché sur les filières de valorisation, qu'elles soient «matière» ou «énergie» tant du point de vue de l'économie des ressources que de l'économie de moyens. Les notions de «décyclage»

et de «recyclage» ont aussi été abordées. Un point a été fait sur les implications architecturales et constructives engendrées par une politique de prévention et de valorisation des déchets, et ce, sous trois aspects: la responsabilité de l'architecte, l'influence de la mise en œuvre et la déconstruction d'un édifice.
Ce chapitre a démontré l'importance d'intégrer la notion de cycle dès la phase de conception de manière à limiter autant que possible à la fois la consommation de matières à construire, mais aussi la production de déchets.
La conclusion de cette seconde partie a démontré l'importance de considérer et d'intégrer la notion de lien et la notion de cycle à la fois dans le processus de conception et dans le processus industriel.
Dans l'écosystème terrestre dont l'homme est un des maillons, tout est lié par des échanges constants de matières. Cela signifie que chaque impact, qu'il soit environnemental ou sanitaire,doit être pris en considération. Il ne s'agit plus de se concentrer sur l'économie des ressources énergétiques et sur la réduction des gaz à effet de serre. La politique du développement durable implique de prendre en considération cette notion de lien et d'englober l'ensemble des nuisances provoquées par l'être humain sur son environnement et sur lui-même.
Dans l'écosystème terrestre, toute matière est recyclée, tout ce qui est produit est utilisé, transformé et récupéré. Depuis deux siècles un élément fait exception à cette règle ancestrale: l'être humain. Dans sa course effrénée vers une production industrielle, agricole et technologique de masse, l'homme a oublié de prendre en considération la valeur de ses rebuts. Aujourd'hui, on achète, on utilise et on jette sans jamais prêter attention ni à la valeur intrinsèque et technologique de la matière ni à la valeur du travail humain qui est incluse dans le produit de consommation. Si l'humanité, depuis deux cents ans, a développé de nombreuses technologies et produits en tout genre, elle doit maintenant et pour la première fois de son histoire aussi faire face à ses déchets. Ceux-ci ne doivent pas être vus comme tels, mais au contraire comme une chance, une opportunité de répondre à un besoin grandissant en matières premières.
Cette conclusion met en exergue l'urgence à réagir rapidement. Il y a en effet urgence, car les mécanismes de régulation ne sont pas négociables. L'humanité, dont la survie dépend totalement de l'enveloppe protectrice de l'atmosphère et de ces mécanismes de régulation, se trouve au bord d'un gouffre environnemental qu'elle ne peut plus éviter ou renier. Si la situation est délicate, voire catastrophique, nous avons la conviction que c'est lorsqu'elle est acculée, que l'humanité trouve en elle le courage d'affronter ses responsabilités, de relever le défi auquel elle fait face et d'ainsi évoluer. Il doit réorienter la machine industrielle et constructive en devenant le gardien de seuils ou de frontières à ne pas franchir en termes d'environnement et de santé.
C'est pourquoi, à l'échelle du bâtiment et du matériau ou composant, nous avons proposé des principes ou des critères dont tout concepteur devra tenir compte. Ces critères, qui sont la base même d'un choix et d'une utilisation soutenable des matériaux de construction, mettent en évidence les notions de rationalisation de la matière, de flexibilité et d'adaptabilité, de durée de vie, d'assemblage, d'adéquation à l'usage, de recyclage, de réemploi, de localisation tout en insistant fortement sur l'importance d'une pensée holistique.

La **troisième partie de cette thèse « Analyse de cycle de vie et outils d'aide existants »** fait le point, d'une part, sur l'analyse de cycle de vie, méthode normalisée d'identification et de quantification des impacts environnementaux et d'autre part, sur les différents outils à la disposition du concepteur.
L'analyse de cycle de vie, méthode d'identification, de quantification et d'évaluation des impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit ou d'un matériau, a été analysée dans le premier chapitre « Analyse de cycle de vie », d'un point de vue législatif et d'un point de vue pratique.
L'analyse de cycle de vie (ACV), malgré sa complexité, est un instrument indispensable au développement et au

maintien d'une politique d'utilisation raisonnée et soutenable des ressources, mais aussi d'une politique visant au respect de l'environnement et au bien-être de tout être humain.
Le deuxième chapitre « Labels environnementaux et déclarations environnementales de produit » de cette partie s'est intéressé aux labels environnementaux et aux déclarations environnementales de produits qui sont considérés comme des marquages régis par des normes européennes en détaillant les différents types de labels, les critères d'évaluation de ceux-ci et les mesures de contrôle des informations. Le contenu des déclarations environnementales de produit (DEP) a été examiné en profondeur à travers la présentation de la base française INIES. Un point a également été établi sur le développement des DEP en Belgique.
Les outils d'aide existants ont ensuite été étudiés dans le troisième chapitre « Outils d'aide pour l'évaluation environnementale » en faisant la distinction entre les outils de type « checklist » et les logiciels ACV. L'analyse des différents outils a été présentée sous forme de tableau.
La conclusion de cette troisième partie a mis en évidence l'importance de pouvoir quantifier et d'évaluer les impacts environnementaux et sanitaires de tout produit ou matériau de construction à travers l'analyse de cycle de vie. Cependant, la complexité d'analyse et d'interprétation des résultats, le manque d'harmonisation européenne et le caractère non obligatoire de l'analyse de cycle de vie sont des freins ou des obstacles à sa diffusion.
L'analyse de cycle de vie n'est pas, en tant que telle, un outil d'aide pour le concepteur. Par contre, elle est d'une part, un instrument scientifique indispensable les instituts de recherche développant des outils d'aide et d'autre part, une étape essentielle dans le développement d'outils de communication : labels et déclarations environnementales.
Pour devenir un instrument efficace d'une politique de gestion environnementale, l'ACV est une méthode qui doit évoluer tant au niveau des étapes du cycle de vie que des critères considérés. Elle doit également être harmonisée pour l'ensemble des pays européens.
De leur côté, les labels et les déclarations environnementales sont des outils de communication nécessaire à l'intégration de la problématique environnementale et sanitaire dans le secteur de la construction. Le label environnemental doit être considéré comme un indicateur dans la mesure où il n'embrasse que certaines problématiques bien ciblées.
L'analyse des différents outils d'aide à l'évaluation nous a permis de tirer plusieurs conclusions. La première est la prédominance de la base suisse de données d'inventaire ECOINVENT. La deuxième concerne l'adéquation des critères d'évaluations, qu'ils soient quantitatifs ou qualitatifs. En effet, si les critères quantitatifs relatifs à la consommation d'énergie grise et aux émissions de polluants sont utilisés par la plupart des outils parce que facilement quantifiables et reconnus universellement comme étant une réponse claire aux impacts environnementaux, les critères « qualitatifs », plus difficilement chiffrables ont également toute leur importance dans l'évaluation environnementale d'un bâtiment ou d'un composant. En effet, dans un secteur responsable à la fois de l'exploitation des ressources à raison de 50 % et de la production de déchets à raison de 40 %, il est impensable, dans un but d'économiser des matières premières, de ne pas tenir compte du type de ressources utilisées, du contenu recyclé de certains matériaux, de l'indice de rareté ou du temps de renouvellement de ces ressources, du potentiel de recyclage ou de valorisation des matériaux mis en œuvre ainsi que de l'existence des filières de recyclage.
On ne peut également plus faire l'impasse sur le critère « santé », sachant que la population européenne passe aujourd'hui plus de 80 % de son temps de vie dans des milieux intérieurs avec des concentrations élevées en polluants provenant de l'extérieur, mais également de polluants provenant de sources spécifiques à l'environnement intérieur (mobilier, matériaux de construction et de décoration, activités humaines, détergents et cosmétiques…).

Or ces critères sont de moins en moins présents dans les évaluations environnementales. Nous estimons qu'ils doivent à nouveau faire partie de l'évaluation et ce, les diverses raisons évoquées ci-dessus.
La troisième et dernière conclusion concerne l'évaluation. L'évaluation environnementale d'un matériau ou d'un composant ne peut se faire sans tenir compte de ses propriétés intrinsèques ni les réponses données aux exigences fonctionnelles. Elle doit également se faire sur l'ensemble des phases du cycle de vie, y compris la phase de mise en œuvre et la phase de démolition en fin de vie, de manière à intégrer la problématique des déchets et leur potentiel de réutilisation.

La **quatrième partie de cette thèse « Développement d'un outil d'évaluation »** est **l'aboutissement de l'ensemble des questionnements repris dans les trois premières parties de ce travail. Il peut être considéré comme la mise forme des différents aspects, connaissances et réflexions menées dans cette thèse. Celui-ci est basé d'une part sur une réflexion prospective suivant le principe de précaution et d'autre part, sur une approche globale sur l'ensemble du cycle de vie des matériaux et des systèmes et sur un ensemble cohérent de critères à la fois quantitatifs et qualitatifs. Ce faisant, il présente une originalité ou une évolution par rapport aux outils existants tout en offrant une réponse adaptée au contexte belge.**
Le premier chapitre «L'évaluation environnementale, nécessité, défis et philosophie suivie» a souligné l'importance d'évaluer l'impact environnemental de tout produit, y compris les bâtiments. Il présente l'outil d'aide comme un outil évolutif, à cibles multiples selon la phase dans laquelle se trouve le projet d'architecture ou de construction: outil de vérification, outil de communication... Ce chapitre a également suggéré une philosophie à suivre pour l'élaboration de l'outil. Plusieurs objectifs ont été poursuivis:
- conscientiser l'utilisateur à développer une vision globale et multidimensionnelle sur la politique et évaluation environnementale, en déployant un ensemble cohérent de critères, respectueux à la fois de l'environnement, de la santé et du bien-être tout en tenant compte des réalités de terrain et des caractéristiques propres à chaque matériau;
- associer des critères quantitatifs et qualitatifs en ayant une vision prospective qui dépasse le stade des connaissances actuelles et qui applique le principe de précaution;
- allier pédagogie et compréhension afin de conscientiser l'ensemble des acteurs de la construction et leur offrir des éléments probants pour communiquer vers d'autres secteurs.

Le deuxième chapitre « La maison individuelle et ses composants, support de l'outil» a exposé les éléments qui ont servi de base au développement de l'outil en décrivant la maison de référence, les différentes parois composant celle-ci, les typologies constructives proposées et les différentes familles de matériaux étudiées. Sur cette base, plus de deux cents matériaux ont été sélectionnés.
Le troisième chapitre « Méthodologie » décrit le fonctionnement de l'outil en détaillant les phases du cycle de vie considérées, les critères et indicateurs pris en compte, la compilation des données et l'élaboration de la base de données « Architecture et Climat ».
Le quatrième et dernier chapitre «Arborescence et schémas de fonctionnement» propose, sous forme d'illustrations, l'arborescence de l'outil informatique à développer. Cette arborescence se veut flexible et offre une certaine liberté à l'utilisateur, tant dans les critères considérés, dans la composition des parois que dans la durée d'évaluation. Ce dernier chapitre, bien qu'il ait été présenté en défense privée, n'a pas été intégré dans le présent document afin d'en préserver la confidentialité et de nous permettre de mener à bien la programmation informatique.

Si cette thèse s'est efforcée de questionner de nombreux domaines dont nous n'étions pas spécialistes, elle a également, par nécessité de limiter la recherche et par choix, privilégié certains domaines qui semblaient plus pertinents pour aborder les enjeux architecturaux et environnementaux liés aux matériaux de construction. C'est pourquoi les aspects juridiques et économiques liés aux choix et à la mise en œuvre des matériaux de construction n'ont pas été pris en compte. Ceci étant, il est évident que ces aspects font obligatoirement partie de la réalité professionnelle et quotidienne de l'architecte, ce qui n'est pas le cas des aspects environnementaux et sanitaires, encore trop souvent délaissés. Or, ceux-ci sont, à nos yeux, fondamentaux dans une utilisation raisonnée et responsable des matériaux de construction. Nous espérons donc vivement que des architectes pourront profiter des aspects relevés dans cette recherche et les mettre en pratique dans de nouvelles réalisations ou des projets de rénovation.
Cette thèse a présenté les enjeux liés choix des matériaux et des systèmes constructifs à travers la conception architecturale actuelle et par différents questionnements tant au niveau du matériau même que par ses spécificités, son évolution, ou encore l'impact environnemental et sanitaire de son cycle de vie.
Les matériaux sont la substance de l'architecture. Ils sont la matière avec laquelle les architectes vont donner corps à ce qui est initialement un projet spatial et humain. Les matériaux et leur mise en œuvre font évoluer le projet de l'idée abstraite du dessin sur papier à une réalité concrète, tangible et habitable.
Les matériaux, avant d'être mis en œuvre, portent déjà en eux la nature du projet, grâce à une multitude de potentialités et de caractéristiques qu'il convient de connaître et d'intégrer dès la phase de conception d'un bâtiment pour comprendre le sens et les conséquences de leur utilisation, tant sur la fonction, la forme et l'évolution spatiale et temporelle du bâtiment que sur les effets environnementaux et sanitaires.
Les matériaux de construction font partie de notre quotidien depuis plus de 10 000 ans. Pendant longtemps, à l'image de l'artisan, nous les avons extraits, pétris, mélangés, façonnés, mis en œuvre à main nue. Aujourd'hui encore, bien qu'industrialisés, ils nous invitent à les toucher, à les sentir, à les ressentir.
Les matériaux de construction sont le fruit de la relation que l'homme a entretenue et entretient encore avec la nature et avec son environnement. Avec la découverte des combustibles fossiles, cette relation s'est sensiblement modifiée: l'homme est passé d'une société d'artisanat qui a profité des bienfaits de la nature à une société industrielle et technique qui a eu pour objectifs de maîtriser et d'exploiter la nature. Cet état d'esprit l'a conduit à innover prodigieusement, et cela dans tous les domaines: sciences, santé et médecine, transports, construction... Mais depuis deux siècles, dans l'effervescence des progrès technologiques et dans sa course effrénée à l'innovation, l'homme a oublié qu'il faisait partie d'un tout, d'un système fragile régi par des échanges entre atmosphère, biosphère, lithosphère et hydrosphère.
Les phénomènes de pollution que connaît aujourd'hui notre société, l'influence scientifiquement avérée de certaines substances ou matières sur notre bien-être et notre santé lui font aujourd'hui reconnaître ses responsabilités et prendre conscience de l'urgence à réagir efficacement.
Si le secteur de la construction n'est pas le seul secteur à devoir réagir et à devoir faire des efforts en termes de réduction d'impact, il est, d'une part, le secteur qui a le plus de potentiel de changement et d'amélioration et, d'autre part, il est le secteur qui a le plus d'influence sur notre manière de vivre. Influencer ou modifier notre manière de vivre aura sans aucun doute des répercussions sur notre manière de consommer, de produire et de penser.

Derrière cette thèse qui tente de concilier sensations, fonction et soutenabilité, se cache donc une question plus fondamentale: l'utilisation raisonnée de la matière et du matériau de construction ne permet-elle pas à l'homme

de vivre en harmonie avec la Nature, ne réconcilie-t-elle pas l'homme avec son environnement et avec lui-même. Car s'il est évident qu'en utilisant à outrance les ressources naturelles et ce faisant en modifiant sensiblement les cycles biogéochimiques, l'homme court à sa perte, il est aussi indiscutable que tout changement, tout revirement de situation ne se fera que par l'homme.
De tout temps, l'homme a eu la volonté extraordinaire de dépasser les limites du savoir établi, d'aller au-delà des domaines connus, d'explorer les potentialités d'innovation de chaque matière. L'homme, qu'il soit concepteur, bâtisseur ou industriel, devra trouver en lui le courage d'innover de manière soutenable en ouvrant les portes à de nouveaux modes de pensée, de production et de consommation et en intégrant dans la notion de « progrès technologique » le respect de l'environnement et le respect du bien-être de tout citoyen. Car, comme le disait Albert Einstein, on ne résout pas un problème avec les modes de pensée qui l'ont engendré.
Le secteur industriel devra évoluer, se renouveler, se transformer en intégrant dans sa démarche les notions de cause à effet, de cycle et de renouvellement et en appliquant avec force le principe de précaution.
La conception architecturale devra passer par une remise en question importante en considérant les aspects environnementaux et sanitaires comme des contraintes incontournables, mais également en réinterprétant les trois principes de Vitruve «Venustas», «Firmitas» et «Utilitas» dans une combinaison harmonieuse et équilibrée des différentes matérialités.
L'outil dont nous avons établi la méthodologie et proposé l'arborescence pourra dans un avenir proche, nous l'espérons vivement, aider les architectes et l'ensemble du monde de la construction à travailler et à agir en ce sens.

Sophie Trachte
15 mai 2012

Perspectives de recherche

Les perspectives de prolongation de cette recherche sont nombreuses.
Tout d'abord, nous souhaitons finalisé l'outil d'aide et lancer la programmation informatique de celui-ci suivant la méthodologie et les critères[1] proposés dans la dernière partie de cette thèse.
Par ailleurs, l'outil pourrait encore gagner en performance et en qualité sur plusieurs points :

- les bases de données que nous avons élaborées pourraient être enrichies de certains indicateurs comme l'utilisation de territoire, la consommation en eau ou le potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique (OD) ;
- les bases de données pourraient intégrer les matériaux de finition tels que les peintures, colles, vernis, papiers peints... qui sont non seulement des matériaux en relation directe et quotidienne avec l'occupant, mais également des matériaux complexes constitués de nombreux additifs et dont la durée de vie est courte;
- les compositions proposées pourraient être élargies aux modes constructifs des logements collectifs, des immeubles de bureaux et autres fonctions ;
- l'outil d'aide pourrait englober un aspect financier également développé sur l'ensemble du cycle de vie. En effet, un autre souci capital lié à la matière et aux matériaux est l'économie. Cette notion doit être comprise au sens large en impliquant non seulement l'investissement financier direct lors de l'achat et de la mise en œuvre des matériaux, mais aussi le coût global de l'énergie utilisée et de l'impact environnemental à long terme.

Il serait également intéressant de trouver réponse à la question, restée ouverte, concernant la hiérarchisation et/ou la pondération des critères. La pertinence de cette pondération est fondamentale. Elle doit faire ressortir avec précision et objectivité l'ensemble des enjeux environnementaux et sanitaires de manière à favoriser une meilleure approche conceptuelle et constructive des matériaux, des produits, des éléments et des techniques de construction.

Deux problématiques relatives à la consommation des ressources pourraient aussi être développées.
La première concerne les matériaux de construction et leur consommation en eau. L'eau est une ressource qui intervient non seulement en tant que matière première dans de nombreux matériaux, mais également dans de nombreux processus de fabrication. Vu la faible disponibilité de cette ressource et les enjeux sociaux et économiques qui y sont liés, cette question est aussi importante que la consommation des ressources énergétiques. Cette problématique devrait être détaillée sur l'ensemble du cycle de vie des matériaux, mais également en tenant compte du cycle naturel de l'eau : quel type d'eau est utilisé? En quelle quantité? Y a-t-il rejet d'eau en fin de processus? Si oui, l'eau est-elle polluée? Par quoi? L'eau est-elle utilisée en boucle?...
La deuxième problématique serait, dans un objectif de réduction des flux de matières et de déchets, l'établissement du lien entre la consommation des matières premières et le potentiel de matières secondaires créé par les filières de réemploi et de recyclage. Cette problématique viserait à imaginer ces flux de matières et de déchets comme un «éco»système dont le fonctionnement se baserait sur celui des cycles biogéochimiques, c.-à-d. un cycle où aucune matière ne serait jetée, mais bien transformée et/ou réutilisée.
Deux notions importantes doivent être traitées dans cette problématique : la notion de cycle et la notion de transformation. La notion de cycle tiendrait compte d'une répétition possible en termes de recyclage : on ne recyclerait pas seulement une fois, mais indéfiniment. Ces cycles à répétition permettraient de limiter de manière considérable la pression exercée par notre société sur les stocks ou les réserves terrestres.

1 Une arborescence a été présentée en défense privée et le sera également en défense publique. Cette arborescence n'a pas été intégrée dans ce travail de thèse afin d'en assurer la confidentialité.

La notion de transformation impliquerait l'étude approfondie des transformations subies par la matière première, mais également celles subies par le matériau après un premier cycle de vie. Elle mettrait en évidence les transformations propices au réemploi et/ou au recyclage et celles qui ne le sont pas.
Les réponses apportées par notre société de consommation à ces deux problématiques sont primordiales en termes de développement durable, car elles auront des implications majeures sur notre manière de fabriquer et de concevoir, sur nos modes de fonctionnement et de consommation. De surcroît, ces réponses permettront de réduire sensiblement l'impact de nos activités sur la pollution atmosphérique grâce à une utilisation rationnelle des matières premières puisées dans les stocks terrestres et à une réutilisation responsable des matières secondaires puisées dans nos stocks de déchets ou rejets.

L'impact des matériaux de construction sur la qualité de l'air et la santé esquissé dans le chapitre 5 de la seconde partie de cette thèse pourrait être davantage approfondi avec la collaboration d'une unité de médecine et un centre de recherche spécialisé dans l'analyse des émissions de matériaux.
En effet, les avancées technologiques et scientifiques permettent actuellement d'évaluer les émissions propres à chaque matériau en chambre de test suivant la méthode d'analyse et les conditions « standard » de température et d'humidité définies par les normes ISO 16000. Cependant, plusieurs constats mettent en évidence le potentiel d'amélioration de cette méthode :
- *la méthode d'analyse et ces conditions de test s'appliquent à des matériaux simples, c'est-à-dire testés individuellement et ne considèrent par encore les assemblages de plusieurs matériaux avec leur système de fixation et/ou de collage ;*
- *la procédure de test tient compte uniquement de conditions « climatiques » fixes et normalisées qui peuvent parfois être fort différentes des conditions de chantier ou d'utilisation. Les chambres de test permettent essentiellement d'appliquer les paramètres repris dans la norme. La considération d'autres paramètres comme l'ensoleillement n'est actuellement pas prévue ;*
- *les mesures sont effectuées sur des échantillons de très petite taille (1 cm²), ces échantillons ne sont donc pas représentatifs d'une surface ou d'un espace bâti ;*
- *les mesures sont réalisées sur des temps d'exposition de 1 à 28 jours maximum, échelle temporelle non représentative de la vie en oeuvre des matériaux de construction ;*
- *les mesures étant spécifiques à un matériau particulier; elles ne tiennent pas compte des émissions secondaires provoquées par l'assemblage de plusieurs matériaux.*

Sur base de ces constats, il serait judicieux de développer un nouveau protocole d'analyse basé sur un assemblage ou une composition de plusieurs matériaux (y compris les moyens de fixation) de manière à identifier des polluants primaires et secondaires ainsi que les interactions possibles entre composants d'une même paroi.
Les mesures, au lieu d'être statiques, seraient dynamiques, c.-à-d. effectuées étape par étape tout au long du processus de mise en œuvre et sur des intervalles de temps plus importants (au-delà de 28 jours) en faisant varier les paramètres d'ambiance pour se rapprocher d'une occupation réelle.
Les mesures devraient être réalisées sur un échantillon de taille représentative, le mètre carré de paroi.
Ces différentes mesures permettraient de mettre en évidence, d'une part, les polluants primaires émis par chaque matériau (et son mode de fixation : colle, ciment…) et, d'autre part, les polluants primaires et secondaires (produits par l'interaction de plusieurs polluants primaires) émis par l'assemblage des différents matériaux au sein de la paroi.

Ces mesures permettraient d'identifier objectivement la durée des émissions, d'évaluer l'impact des cycles de température et d'humidité dans le bâtiment sur les cinétiques d'émission des parois et les éventuels effets de barrière de certains composants, ainsi que l'influence du renouvellement d'air sur la dissolution ou non-dissolution des polluants.

Parallèlement à la problématique de la qualité de l'air intérieur et de la santé, il serait éclairant de développer une recherche poussée sur les performances à atteindre par les couches intérieures de l'enveloppe d'un bâtiment (matériaux d'isolation, de seconde œuvre et de finition), tant au niveau du confort hygrothermique qu'au niveau du respect de la santé et de l'environnement. En effet, contrairement aux couches extérieures, les matériaux de seconde œuvre et de finition sont des matériaux complexes constitués de nombreux additifs, généralement de courte durée de vie et en relation directe avec l'ambiance intérieure et l'occupant. Ils ont donc davantage d'influence à la fois sur la qualité des espaces de vie, sur le confort (thermique, hygrothermique, olfactif, acoustique, respiratoire), mais également sur l'environnement puisqu'ils sont remplacés plus souvent.

Tout au long de ce travail, nous avons principalement développé l'aspect social sous l'angle de la santé et du respect de celle-ci. Il serait cependant opportun d'examiner l'aspect social lié aux matériaux de construction en tenant compte du statut social des travailleurs et des ouvriers tout au long du cycle de vie des matériaux, et en particulier les ouvriers œuvrant à l'extraction des matières premières ou de matériaux de construction.
À l'instar des produits alimentaires et vestimentaires « fair-trade », il serait intéressant de pouvoir identifier des produits de construction fabriqués dans de bonnes conditions (sociales et environnementales) et garantissant que les ouvriers perçoivent un salaire leur permettant de vivre dignement.
Certains fabricants agissent déjà en ce sens. On peut notamment citer la société 3Form qui crée des panneaux décoratifs, à partir de diverses matières (écorce, végétation, métaux, textiles) liées dans une résine naturelle. Les matières utilisées par la société sont achetées, au prix coûtant, à des petits producteurs dans le monde entier. Après la vente des panneaux, la société reverse un pourcentage des bénéfices à ces différents producteurs.
A contrario, si la pierre chinoise que de nombreux acteurs de la construction assimilent à la pierre bleue belge est encore financièrement avantageuse après avoir parcouru plus de 10 000 kilomètres pour atteindre la Belgique, il est clair que c'est au détriment des conditions de travail et du salaire des ouvriers des carrières.

Il est évident que l'application des différentes perspectives de recherche proposées nécessitera un changement de mentalité, non seulement au niveau des maîtres d'ouvrage et des administrations, mais également au niveau des concepteurs et des entrepreneurs. Les mentalités et les modes de fonctionnement influencent largement la rapidité d'application de solutions nouvelles et/ou de changement. C'est pourquoi il devient en outre urgent d'analyser cette problématique sociologique et d'en retirer les outils exploitables dans le secteur de la construction, et ce, à chaque étape de l'évolution d'un projet d'architecture.

Table des illustrations

PARTIE A

ILLUSTRATIONS

Chapitre 1

Figure [A1.01] Moellons de pierre et paroi vitrée page 26
Figure [A1.02] Façade vitré - Munich page 26
Figure [A1.03] Association de chaume et de vitrage page 27
Figure [A1.04] Texture de l'acier Cor-ten page 28
Figure [A1.05] Textures: briques anciennes et enduit page 28
Figure [A1.06] Texture lisse et réfléchissante des vitrages page 28
Figure [A1.07] Mise en oeuvre de pierre naturelle, Thermes de Vals page 29
Figure [A1.08] Rolex Learning Center de Sanaa, EPFL, Lausanne page 30
Figure [A1.09] Casa Neruda, Chili page 30
Figure [A1.10] Maçonneries de briques page 31
Figure [A1.11] Matière rugueuse et matière lisse page 31
Figure [A1.12] Matière chaude et matière froide page 31
Figure [A1.13] Principes de la perception thermique de l'être humaiN page 3
Figure [A1.14] Rôles joués par l'enveloppe du bâtiment page 32
Figure [A1.15] Vieillissement du bois qui prend une teinte grisâtre page 35
Figure [A1.16] Vieillissement des bétons, mise à nu des armatures page 35

Chapitre 2

Figure [A2.01] Ligne du temps - matériau bois page 42
Figure [A2.02] Ligne du temps - matériau bois - dilatation 1800/2000 page 43
Figure [A2.03] Ligne du temps - matériau pierre naturelle page 44
Figure [A2.04] Ligne du temps - matériau terre crue page 46
Figure [A2.05] Ligne du temps - matériau métal page 48
Figure [A2.06] Ligne du temps - matériau métal - dilatation 1800/2000 page 49
Figure [A2.07] Ligne du temps - matériau béton page 50
Figure [A2.08] Ligne du temps - matériau béton - dilatation 1800/2000 page 51
Figure [A2.09] Ligne du temps - matériau verre page 52
Figure [A2.10] Ligne du temps - matériau verre - dilatation 1800/2000 page 53

Figure [A2.11] Ligne du temps - matériau plastique page 54
Figure [A2.12] Ligne du temps - matériau plastique - dilatation 1800/2000 page 55
Figure [A2.13] Ligne du temps - compilation de l'ensemble des matériaux page 56
Figure [A2.14] Ligne du temps - compilation - dilatation 1800/2000 page 57

Chapitre 3

Figure [A3.01] Illustration de la conductivité thermique page 61
Figure [A3.02] Noeuds constructifs linéaires page 61
Figure [A3.03] Influence de l'inertie sur le lissage des températures page 61
Figure [A3.04] Courbe de rétention de l'humidité page 63
Figure [A3.05] Teneur en eau des matériaux et zonage page 63
Figure [A3.06] Courbe d'élasticité d'un matériau page 65
Figure [A3.07] Descriptif des produits en bois ou à base de bois page 70
Figure [A3.08] Différentes mises en oeuvre du matériau bois page 70
Figure [A3.09] Descriptif des différentes roches et pierres naturelles page 71
Figure [A3.10] Mises en oeuvre de pierres naturelles page 71
Figure [A3.11] Descriptif des différents produits/matériaux en terre crue page 72
Figure [A3.12] Mises en oeuvre et produits en terre crue page 72
Figure [A3.13] Descriptif des produits en terre cuite page 73
Figure [A3.14] Mises en oeuvre de briques en terre cuite page 73
Figure [A3.15] Descriptif des différents métaux page 74
Figure [A3.16] Eléments et mises en oeuvre de produits métalliques page 74
Figure [A3.17] Descriptif des matériaux et produits à base de liants minéraux page 75
Figure [A3.18] Mises en oeuvre de produits à base de liants minéraux page 75
Figure [A3.19] Coque en béton armé, Lausanne page 76
Figure [A3.20] Mises en oeuvre intérieures et extérieures de bétons page 76
Figure [A3.21] Descriptif des produits en verre page 77
Figure [A3.22] Mises en oeuvre de produits verriers page 77
Figure [A3.23] Descriptif des matériaux et produits en matière plastique page 78
Figure [A3.24] Descriptif des liants contenant du bitume page 79
Figure [A3.25] Descriptif des bandes bitumineuses page 79

Figure [A3.88] Descriptif des produits isolants page 80
Figure [A3.89] Matériaux isolants page 80

PARTIE B

ILLUSTRATIONS

Chapitre 1

Figure [B1.01] : Cycle de vie d'un matériau de construction page 87
Figure [B1.02] : Extraction des blocs de pierre page 88
Figure [B1.03] Equarrissage des blocs de pierre page 88
Figure [B1.04] Sciage d'un bloc de pierre page 88
Figure [B1.05] Sciage d'un bloc de pierre au moyen d'un disque diamanté page 89
Figure [B1.06] Découpage et finition des dalles de pierre page 89
Figure [B1.07] Découpage d'une tranche d epierre en petits blocs page 89
Figure [B1.08] Assemblage en vrac - isolation d'un plancher page 91
Figure [B1.09] Flocons de vermiculite page 91
Figure [B1.10] Fixations mécaniques - ossature bois. page 91

Chapitre 2

Figure [B2.01] Répartition de la consommation mondiale d'électricité par secteur page 100
Figure [B2.02] Répartition de la consommation mondiale de fuel par secteur page 100
Figure [B2.03] Répartition de la consommation mondiale de charbon par secteur page 100
Figure [B2.04] Répartition de la consommation mondiale de gaz naturel par secteur page 100
Figure [B2.05] Wallonie: répartition énergétique par secteur page 100
Figure [B2.06] Wallonie: évolution des consommations finales d'énergie de l'industrie page 100
Figure [B2.07] Comparaison énergie grise et énergie d'opération sur 50 ans page 101
Figure [B2.08] La ressource en eau douce page 102
Figure [B2.09] Répartition mondiale des ressources en eau douce page 102
Figure [B2.10] Répartition mondiale de la consommation d'eau potable page 102
Figure [B2.11] Empreinte sur l'eau de quelques pays page 103
Figure [B2.12] Consommation globale de matériaux et d'énergie par habitant - 1900 à 2000 page 105
Figure [B2.13] Extraction des ressources par catégories - 1980 à 2030 page 105
Figure [B2.14] Utilisation des ressources par personne et par pays - 2000 et 2007 page 106

Figure [B2.15] Empreinte écologique et biocapacité mondiale page 106
Figure [B2.16] Empreinte écologique par groupe de pays page 106
Figure [B2.17] Labels FSC et PEFC page 107

Chapitre 3

Figure [B3.01] Les échanges entre les 4 composante du système terrestre page 111
Figure [B3.02] Cycle global du carbone page 111
Figure [B3.03] Cycle du carbone inorganique page 112
Figure [B3.04] Cycle de l'azote page 112
Figure [B3.05] Cycle du phosphore page 114
Figure [B3.06] Cycle du soufre page 114
Figure [B3.07] Conséquences du réchauffement climatique page 115
Figure [B3.08] Description de l'effet de serre page 115
Figure [B3.09] Emission de gaz à effet de serre - comparaison entre 1970 et 2001 page 116
Figure [B3.10] Les 10 pays les plus pollueurs - 2006 page 116
Figure [B3.11] Pays signataires du Protocole de Kyoto - 2010 page 118
Figure [B3.12] Trou d'ozone page 127
Figure [B3.13] Les diférentes couches de l'atmosphère page 127
Figure [B3.14] Nombre de jours respectifs au cours desquels la concentration d'ozone dépasse les seuils d'information et d'effet sur la santé en Belgique page 132

Chapitre 4

Figure [B4.01] Phases de transport sur le cycle de vie d'un matériau page 134
Figure [B4.02] Evolution du transport routier de marchandises page 137
Figure [B4.03] Evolution des immatriculations page 137
Figure [B4.04] Part de marché des différents modes de transport - 1970 page 137
Figure [B4.05] Part de marché des différents modes de transport - 2006 page 137
Figure [B4.06] Le trafic maritime en mer du Nord. page 138
Figure [B4.07] Le trafic fluvial en Belgique - données 2006/2007 page 138
Figure [B4.08] Le trafic ferrovier en Belgique - données 2005 page 139
Figure [B4.09] Le trafic routier - données 2006 page 139

Figure [B4.10] Les grands ports autour de la Belgique page 140
Figure [B4.11] Evolution des émissions de gaz à effet de serre par secteur d'activités page 141
Figure [B4.12] Phases de transport ayant été étudiées page 143
Figure [B4.13] Situation des différents sites de traitements de déchets page 144
Figure [B4.14] Identification des différentes zones reprises dans les scénarios page 145
Figure [B4.15] Scénarios Benelux page 147
Figure [B4.16] Scénarios régions limitrophes page 147
Figure [B4.17] Scénarios pays limitrophes page 147
Figure [B4.18] Scénarios Europe proche page 148
Figure [B4.19] Scénarios Europe élargie page 148
Figure [B4.20] Scénarios reste du monde page 148
Figure [B4.21] Consommation d'énergie grise par «tonne x le nombre de kilomètres parcourus» page 149
Figure [B4.22] Consommation d'énergie grise par «tkm» page 149
Figure [B4.23] Emission de gaz à effet de serre par «tonne x le nombre de kilomètres... page 149
Figure [B4.24] Emission de gaz à effet de serre par «tkm» page 149
Figure [B4.25] Impact du transport selon l'origine - cas du bois page 150
Figure [B4.26] Questionnaire transport page 151
Figure [B4.27] Produit TI135U : Calcul de l'impact du transport - par phase page 152
Figure [B4.28] Produit MP75 : Calcul de l'impact du transport - par phase page 154

Chapitre 5

Figure [B5.01] Description des étiquettes de produits chimiques page 164
Figure [B5.02] Marquage CE - description page 167
Figure [B5.03] Label GUT - critères d'évaluation page 167
Figure [B5.04] Label M1 et étiquettage AFSSET page 167

Chapitre 6

Figure [B6.01] Répartition des déchets par secteur page 176
Figure [B6.02] Répartition des déchets de construction. page 176
Figure [B6.03] Répartition par fraction de déchet page 176
Figure [B6.04] Gestion actuelle des déchets de bétons et autres inertes page 181
Figure [B6.05] Valorisation avec un bouclage de cycle page 181

Figure [B6.06] Container pour matériaux inertes page 185
Figure [B6.07] Tri des fractions «bois» sur chantier page 185
Figure [B6.08] Tri sur chantier - chantier Nestlé à Vevey. page 185
Figure [B6.09] Exemple de plan de gestion page 186

TABLEAUX

Chapitre 2

Tableau [B2.01] Classification des minéraux page 98

Chapitre 3

Tableau [B3.01] Temps de séjour des gaz à effet de serre page 119
Tableau [B3.02] Equivalent carbone des gaz à effet de serre page 119
Tableau [B3.03] Potentiel d'acidification des principaux gaz acides page 124
Tableau [B3.04] Potentiel de création d'ozone photochimique de certains gaz page 132

Chapitre 4

Tableau [B4.01] Impacts environnementaux des différents modes de transport page 142
Tableau [B4.02] Organisation et mode de transport selon la catégorie de produit page 144

Chapitre 5

Tableau [B5.01] Pictogrammes devant être étiquetés sur les produits chimiques page 164

Chapitre 6

Tableau [B6.01] Coût des filières d'élimination (2000 et 2007) et de valorisation (2007) page 181

PARTIE C

ILLUSTRATIONS

Chapitre 1

Figure [C1.01] Cycle de vie d'un matériau, d'un élément de construction et d'un bâtiment page 198
Figure [C1.02] Comparaison entre un produit X et sn alternative Y page 202
Figure [C1.03] Les quatres étapes de l'analyse de cycle de vie page 202
Figure [C1.04] ACV d'un bâtiment et ACV d'un produit selon les projets de norme prEN15978 et prEN15804 page 205
Figure [C1.05] Triangle de communication entre fabricant, architecte et institut de recherche page 206

Chapitre 2

Figure [C2.01] Ecolabel européen, label Natureplus, label Blauer Engel, label Nordic Swan,

label NF Environnement, label Milieukeur page 209
Figure [C2.02] Etiquette OKO-TEST et étiquette RESSOURCEN page 209
Figure [C2.03] Bases nationales de DEP page 211
Figure [C2.04] Résumé d'un EPD, base de données INIES page 212

Chapitre 3

Figure [C3.01] Comparaison des outils «checklist» - partie 1 page 217
Figure [C3.02] Comparaison des softwares « LCA »- partie 1 page 217
Figure [C3.03] Comparaison des outils «checklist» - partie 2 page 218
Figure [C3.04] Comparaison des softwares « LCA »- partie 1 page 218

PARTIE D

ILLUSTRATIONS

Chapitre 1

Figure [D1.01] Comparaison énergie de chauffage et énergie grise sur 50 ans page 228
Figure [D1.02] Défis d'un outil d'aide à la décision page 229

Chapitre 2

Figure [D2.01] Maison de référence : plan du rez page 231
Figure [D2.02] Maison de référence : plan du 1er étage page 231
Figure [D2.03] Maison de référence : élévation Sud page 232
Figure [D2.04] Maison de référence : élévation Nord page 232
Figure [D2.05] Maison de référence : élévations Ouest et Est page 232
Figure [D2.06] Maison de référence : typologies de mur extérieur page 232
Figure [D2.07] Maison de référence : typologies de toiture page 232

Chapitre 3

Figure [D3.01] Cycle de vie d'un matériau page 233
Figure [D3.02] Cycle de vie et catégorie de critères page 234
Figure [D3.03] Compilation des données environnementales page 238
Figure [D3.04] Compilation des données environnementales page 238
Figure [D3.05] Base de données «Architecture et Climat» page 238

TABLEAUX
Chapitre 3

Tableau [B3.01]	Récapitulatif des critères et indicateurs par phase de cycle de vie	page 235
Tableau [B3.02]	Echelle graphique - critère [RE-NE]	page 238
Tableau [B3.03]	Echelle graphique - critère [FV-RE]	page 238
Tableau [B3.04]	Echelle graphique - critère [NMO]	page 239
Tableau [B3.05]	Estimation de la durée de vie des matériaux selon son application dans le bâtiment - logement	page 239
Tableau [B3.06]	Impact de la durée de vie / durée d'évaluation sur le bilan environnemental d'un matériau	page 240

ANNEXE 1
ILLUSTRATIONS

Figure [AN.01]	Descriptif des produits en bois ou à base de bois	page 290
Figure [AN.02]	Différentes mises en oeuvre du matériau bois	page 290
Figure [AN.03]	Structure d'un tronc	page 292
Figure [AN.04]	Bois de bardage - Auberge de jeunesse de Vidy, Lausanne	page 293
Figure [AN.05]	Bois, techniques constructives et éléments de fixation	page 295
Figure [AN.06]	Bois de structure	page 297
Figure [AN.07]	Panneaux de fibres : OSB, Multiplex	page 297
Figure [AN.08]	Panneaux de fibres : MDF, Aggloméré	page 297
Figure [AN.09]	Maison à ossature bois: panneaux et bois de structure	page 298
Figure [AN.10]	Réalisation de cloisons intérieures en panneaux OSB	page 298
Figure [AN.11]	Mélange de bois brut, de bois de structure et de panneaux	page 298
Figure [AN.12]	Bardage, bois courbé - bâtiment Provelo - Bruxelles	page 300
Figure [AN.13]	Descriptif des différentes roches et pierres naturelles	page 301
Figure [AN.14]	Mise en oeuvre de pierres naturelles	page 301
Figure [AN.15]	Mise en oeuvre de moellons de pierre	page 302
Figure [AN.16]	Revêtement de sol en pierre - Malmö	page 302
Figure [AN.17]	Schéma de formation des roches	page 303

Figure [AN.18]	Variété de pierres : pierre bleue belge, marbre rouge, granit, marbre blanc	page 306
Figure [AN.19]	Pierre bleue belge - Bâtiment Glaverbel, Bruxelles	page 305
Figure [AN.20]	Pierre de sable rouge clivée, Museum aan de Stroom, Anvers	page 308
Figure [AN.21]	Carrière de Pierre bleue belge	page 309
Figure [AN.22]	Carrière de Pierre bleue belge	page 309
Figure [AN.23]	Rebuts de carrière - Pierre bleue belge	page 309
Figure [AN.24]	Finitions de la Pierre bleue belge	page 310
Figure [AN.25]	Aménagement extérieur en Pierre bleue belge	page 311
Figure [AN.26]	Mur de façade en moellons de pierre	page 311
Figure [AN.27]	Descriptif des différents produits/matériaux en terre crue	page 312
Figure [AN.28]	Mises en oeuvre et produits en terre crue	page 312
Figure [AN.29]	Vue de Ghadamès, Libye	page 314
Figure [AN.30]	Fabrication de briques en terre crue	page 314
Figure [AN.31]	Matériaux et techniques en terre crue	page 315
Figure [AN.32]	Desert Interpretive Center, Canada,	page 316
Figure [AN.33]	Chapelle de la réconciliation, Berlin	page 316
Figure [AN.34]	Ecole primaire, Gando, Burkina Faso	page 318
Figure [AN.35]	Immeuble de 3 étages, Chili	page 318
Figure [AN.36]	Descriptif des produits en terre cuite	page 319
Figure [AN.37]	Mises en oeuvre de briques en terre cuite	page 319
Figure [AN.38]	Faces de l’élément brique	page 323
Figure [AN.39]	Différents types d’assise de briques	page 323
Figure [AN.40]	Appareils décoratifs	page 323
Figure [AN.41]	Habitation à Anvers	page 326
Figure [AN.42]	Habitation individuelle à Tervueren	page 326
Figure [AN.43]	Habitation individuelle	page 326
Figure [AN.44]	Descriptif des différents métaux	page 327
Figure [AN.45]	Elements et mises en oeuvre de produits métalliques	page 327
Figure [AN.46]	Oxydation du cuivre - Bâtiment KBC, Anvers	page 330
Figure [AN.47]	Oxydation d’une toiture métallique - Munich	page 330

Figure [AN.48]	Acier Cor-ten - boulangerie à Clabecq	page 330
Figure [AN.49]	Couverture métallique d'un hangar - jeu de texture	page 332
Figure [AN.50]	Protection solaire en aluminium, Anvers	page 332
Figure [AN.51]	Mélange d'aluminium et cuivre oxydé - Bâtiment KBC, Anvers	page 336
Figure [AN.52]	Revêtement de toiture en zinc, Anvers	page 336
Figure [AN.53]	Descriptif des matériaux et produits à base de liants minéraux	page 337
Figure [AN.54]	Mises en oeuvre de produits à base de liants minéraux	page 337
Figure [AN.55]	Différents types de joints	page 342
Figure [AN.56]	Blocs de béton cellulaire	page 342
Figure [AN.57]	Mises en oeuvre des blocs de béton cellulaire	page 343
Figure [AN.58]	Blocs silico-calcaires	page 343
Figure [AN.59]	Coque en béton armé, Lausanne	page 346
Figure [AN.60]	Mises en oeuvre intérieures et extérieures de bétons	page 346
Figure [AN.61]	Rolex Learning Center, EPFL, Lausanne	page 348
Figure [AN.62]	Université de Louvain la Neuve	page 348
Figure [AN.63]	Bâtiment de bureau chaussée de la Hulpe, Bruxelles	page 348
Figure [AN.64]	Plafond en béton, intégration de panneaux acoustiques	page 351
Figure [AN.65]	Mise en oeuvre intérieure du béton	page 351
Figure [AN.66]	Descriptif des produits en verre	page 352
Figure [AN.67]	Mises en oeuvre de produits verriers	page 352
Figure [AN.68]	Fabrication du verre float	page 355
Figure [AN.69]	Briques de verre	page 356
Figure [AN.70]	Façade vitrée, Malmö	page 356
Figure [AN.71]	Verre martelé	page 356
Figure [AN.72]	Traitements des arêtes du verre	page 355
Figure [AN.73]	Verre sérigraphié	page 358
Figure [AN.74]	Verre sérigraphié	page 358
Figure [AN.75]	Verre coloré ou émaillé	page 358
Figure [AN.76]	Descriptif des matériaux et produits en matière plastique	page 361
Figure [AN.77]	Descriptif des produits bitumineux	page 367

Figure [AN.78] Descriptif des bandes bitumineuses page 367
Figure [AN.79] Mise en oeuvre de bandes bitumineuses page 370
Figure [AN.80] Mise en oeuvre de bandes bitumineuses page 370
Figure [AN.81] Mise en oeuvre de bandes bitumineuses page 370
Figure [AN.82] Descriptif des produits isolants page 372
Figure [AN.83] Matériaux isolants page 372
Figure [AN.84] Laine de roche page 377
Figure [AN.85] Verre cellulaire page 377
Figure [AN.86] Perlite expansée page 377
Figure [AN.87] Polystyrène expansé (EPS) page 380
Figure [AN.88] Polystyrène extrudé (XPS) page 380
Figure [AN.89] Polyuréthane page 380
Figure [AN.90] Matelas de fibres de bois page 382
Figure [AN.91] Panneaux de bois aggloméré page 382
Figure [AN.92] Panneaux de liège expansé page 382
Figure [AN.93] Laine de chanvre page 384
Figure [AN.94] Laine de lin page 384
Figure [AN.95] Matelas de cellulose page 384
Figure [AN.96] Laine de mouton page 386
Figure [AN.97] Béton de chaux et de chanvre page 386

TABLEAUX

Chapitre 3

Tableau [AN.01] Caractéristiques mécaniques - bois résineux page 294
Tableau [AN.02] Classes de risque - utilisation du bois page 296
Tableau [AN.03] Durabilité des essences de bois page 297
Tableau [AN.04] Les différents usages du matériau pierre et les essais spécifiques page 305
Tableau [AN.05] Classes de résistance et de masse volumique des différents types de briques page 324
Tableau [AN.06] Désignation des différents ciments page 340
Tableau [AN.07] Données physiques du verre page 354
Tableau [AN.08] Marquage des plastiques - recyclage page 365

Références

Références bibiographiques

[ADEME, 2002] *Qualité environnementale des bâtiments, manuel à l'usage de la maîtrise d'ouvrage et des acteurs du bâtiment,* ADEME, Paris, 2002

[AFSSET 2009] *Procédure de qualification des émissions de composés organiques volatils par les matériaux de construction et produits de décoration*, Rapport d'expertise collective, AFSSET, septembre 2009

[AFSSET 2008] *Les fibres minérales artificielles siliceuses – Laines minérales, Filaments continus de verre – Evaluation de l'exposition de la population générale et des travailleurs*, Rapport d'expertise collective, AFSSET, octobre 2008

[ALLACKER 2010] ALLACKER, *Sustainable Building, the development of an evaluation method,* thèse de doctorat, directeur de thèse : dr.ir F. De Troyer, Katholiek Universiteit of Leuven, Louvain, 2010

[ANDERSON date] ANDERSON, HOWARD, *the Green Guide to Housing Specification*, BREPRESS, Londres, date

[ARCHI. STUDIO 2009] ARCHITECTURE STUDIO, *La ville écologique, contribution pour une architecture durable*, AAM editions, Barcelone, 2009

[ARUP 2003] ARUP.and PARTNERS, *the Green Construction Handbook, A manuel for Clients and construction Professionals*, JT Design Build, 1993

[ATLASENERGIE] Atlas énergétique http://www.icedd.be/atlasenergie/

[AUBECQ 2011] AUBECQ, EVRARD, REGNIERS, DEHERDE, *Rapport sur la définition d'un isolant naturel, élaboration de critères dans le cadre de la surprime «isolants naturels»*, rapport réalisé en 2011 par Architecture et Climat et financé par SERVICE PUBLIC DE WALLONIE DG04 Département de l'Energie et du Bâtiment durable

[BEUMIER 2006] BEAUMIER JL., *L'isolation phonique écologique, matériaux et mise en œuvre*, Terre Vivante, Mens, 2006

[BIRON 2008] BIRON, *Dynamique Forme / Lumière ; Exploration du processus de création de l'espace architectural par modèles maquette/images*, Mémoire présenté à Québec, Université de Laval, novembre 2008

[BOEGLIN 2005] BOEGLIN, VEUILLET, *Introduction à l'Analyse de Cycle de Vie (ACV)*, note de synthèse, ADEME, département Eco-conception et consommation durable, mai 2005, disponible sur www.ademe.fr

[BRANDERS 2009] BRANDERS, V*ers des enveloppes durables, intégration de la problématique des matériaux et des typologies constructives pour une démarche globale et équilibrée*, travail de maîtrise présenté à Toulouse, promoteur : André De Herde, Université de Louvain la Neuve, septembre 2009

[BREELS 2005] BREELS, *La gestion des déchets dans le secteur de la construction : enjeux de la conception architecturale, Proposition d'étude pour la réduction de la production des déchets en phase de rénovation*, travail de maîtrise présenté à Lausanne, promoteur : André De Herde, Université de Louvain la Neuve, septembre 2005

[CERAA 2008] *L'application de principes de la maison passive en région Bruxelles-Capitale*, étude réalisée par le centre d'étude, de recherche et d'action en architecture asbl, pour Benoît CEREXHE Ministre de l'économie de l'emploi et Evelyne HUYTEBROECK Ministre de l'Environnement et de l'Energie de la Région de Bruxelles-Capitale, rapport final, Bruxelles, juin 2008

[CNUDDE 1990] CNUDDE, HAROTIN, MAJOT, *Pierres et Marbres de Wallonie*, Ministère de la Région Wallonne, Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement, éditions AAM, Bruxelles, 1990

[COE 2011] *Les risques sanitaires des métaux lourds et d'autres métaux*, Rapport de la Commission des questions sociales, de la santé et de la famille, Rapporteur: M. Jean HUSS, Luxembourg, Groupe socialiste, Doc. 12613, mai 2011, Assemblée parlementaire du Conseil de l'Europe, accessible sur http://assembly.coe.int/Documents/WorkingDocs/Doc11/FDOC12613.pdf

[COMCLIMAT 2007] *Emissions des gaz à effet de serre en Belgique, tendances, projections, progrès par rapport à l'objectif Kyoto*, Rapport de la Commission Nationale Climat, 2007, téléchargeable sur http://www.klimaat.be/IMG/pdf/Emissions_de_GES_2007.pdf

[COUASNET 2007] COUASNET, *Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction, référentiels normatifs européens et internationaux, critères de classement des performances*, 2ème édition, Le Moniteur, Paris, 2007

[CRTE 2008] *Leitfaden für nachhaltiges Bauen und Renovieren*, Centre de Ressources des Technologies pour l'Environnement(CRTE), Luxembourg, 2008

[CSTC 2007] *Informations environnementales propres aux produits: le point de la situation en Belgique et en Europe*, Les Dossiers du CSTC - N° 1/2007 - Cahier n° 3, Bruxelles, 2007

[CSTC 2010] *Bepalingsmethode Milieugerelateerde Materiaalprestatie van gebouwelementen*, étude réalisée par le CSTC, VITO et la KUL à la demande de l'OVAM, rapport de mai 2010

[DEBACKER 2008] DEBACKER, *Structural design and environmental load assessment of multi-use construction kits for temporary applications based on 4Dimensional Design*, thèse de doctorat,directeur de thèse : WP De Wilde, Vrije Universiteit Brussel, Bruxelles, 2008

[DEBAUCHE 2009] DEBAUCHE, *Les enjeux du transport de marchandises dans un contexte de mobilité durable, rapport d'étude réalisé pour le XXIème Congrès belge de la Route*, ABR/AWW, Gand, 22-25 septembre 2009, thème « Mobilité durable » téléchargeable sur http://www.brrc.be/pdf/gent/VI.A.21.pdf

[DEOUX 2006] DEOUX, *Le guide de l'habitat sain*, éditions MEDIECO, Paris, 2006

[DEOUX 2010] DEOUX, *Bâtir pour la santé de nos enfants*, éditions MEDIECO, Andorra, 2010

[DEOUX 2011] DEOUX, COEUDEVEZ, *Bâtiments, Santé, le tour des labels: ajouter l'humain aux performances environnementales et énergétiques*, éditions MEDIECO, Andorra, 2011

[DGS 2002] *Les effets du plomb sur la santé*, rapport de DGS /Sous-direction de la gestion des risques des milieux, Bureau Bâtiment, Bruit et milieu de travail (SD7C), Sous-Direction des pathologies et de la santé, 2002, Paris, téléchargeable sur http://www.sante.gouv.fr/IMG/pdf/effetsplombsante.pdf

[DIAMOND 2006] DIAMOND, *Effondrement, Comment les sociétés décident de leur disparition ou leur survie*, Folio Essais, édition Gallimard, 2006

[EEA 2008a] *Climate for a transport change, TERM 2007: indicators tracking transport and environment in the European Union*, EEA Technical report No 1/2008 disponible sur http://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2008_5/at_download/file

[EEA 2008b] *Air pollution by ozone across Europe during summer 2007, Overview of exceedances of EC ozone threshold values for April–September 2007*, EEA Technical report No 5/2008, disponible sur http://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2008_5/at_download/file

[EEA 2010] *The European Environment, State and outlook 2010, Material resource and waste*, EEA publication, disponible sur www.eea.europa.eu/.../europe/material-resources

[EPFL] *Le réchauffement climatique, Partie 1*, EPFL, Lausanne, Suisse, disponible sur http://aero-ge.epfl.ch/recherche/co2_partie1

[EVRARD 2005] EVRARD, DE HERDE, *Béton et utilisation rationnelle de l'énergie* – dossier ciment, dossier publié par la Fédération de l'Industrie Cimentière Belge (FEBELCEM), éditeur responsable JP. Jacobs, 2005

[EVRARD 2010] EVRARD, DE HERDE, *Le béton et la construction durable*, dossier publié par la Fédération de l'Industrie Cimentière Belge (FEBELCEM), éditeur responsable A. Jasienski, 2010

[FEBELCEM 1997] *Mémento, ciments et bétons*, publication éditée par la FEBELCEM, la Fédération de l'Industrie Cimentière Belge, Bruxelles, 1997

[FEBELCEM 2003] *ABC du ciment et du béton*, publication éditée par le Groupement belge du Béton (GBB), la Fédération de l'Industrie du Béton (FEBE), la Fédération de l'Industrie Cimentière Belge (FEBELCEM), la Fédération des Importateurs et Producteurs d'Adjuvants et Additifs pour Coulis, Mortiers et Béton de Ciment (FIPAH) et la Fédération du Béton prêt à l'Emploi (FSBP), Bruxelles, 2003

[FONTAINE, 2009] FONTAINE, ANGER, *Bâtir en Terre, du grain de sable à l'architecture*, editions Belin/Cité des Sciences et de l'Industrie, imprimé par Pollina, Luçon, 2009

[GAUZIN-MÜLLER 1999] GAUZIN-MÜLLER, *Construire avec le bois*, Le Moniteur, Paris, 1999

[GIEC 2007a] *Changements Climatiques 2007*, Rapport de Synthèse publié sous la direction de Rajendra K. Pachauri et Andy Reisinger, GIEC, Genève, Suisse 2007

[GIEC 2007b] *Changements climatiques 2007: les éléments scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, résumé à l'intention des décideurs, résumé technique et Questions fréquentes, publié sous la direction de S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, Jr, GIEC, Genève, Suisse, 2007

[GIEC 2007c] *Bilan 2007 des changements climatiques: Conséquences, adaptation et vulnérabilité,* Contribution du Groupe de travail II au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, résumé à l'intention des décideurs et résumé technique , publié sous la direction de M. Parry, O. Canziani, J. Palutikof, P. van der Linden and C. Hanson, Publié par le GIEC, Genève, Suisse, 2007

[HEGGER 2007] HEGGER , DREXLER, ZEUMER , *Basics Matérialité , Birkhaüser* – éditions d'Architecture, Bâle, 2007

[HEGGER 2009] HEGGER , AUCH-SCHWELK , FUCHS , ROSENKRANZ , *Construire, Atlas des matériaux*, éditions DETAIL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 2009

[HERTVELDT 2009] HERTVELDT, HOORNAERT, MAYERES, *Perspectives à long terme de l'évolution des transports en Belgique :projection de référence*, ouvrage publié par le Bureau fédéral du Plan, mai 2009, téléchargeable sur www.plan.be/admin/uploaded/200904211523080.

pp107_fr.pdf

[HERZOG 2007] HERZOG, KRIPPNER, LANG, *Construire des façades*, éditions DETAIL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 2007

[HOUBEN 2008] HOUBEN, GUILLAUD, T*raité de Construction en Terre*, CRATerre, Editions Parenthèses, 1995, Marseille

[HUYGEN 2008] HUYGEN, *La poubelle et l'architecte, vers le réemploi des matériaux*, L'impensé chez ACTES SUD, 2008

[IBGE 2000] *Guide de gestion des déchets de construction et de démolition, version décembre 2000* édité par l'IBGE (Institut bruxellois pour la Gestion de l'Environnement), éditeur responsable: JP Hannequart, Bruxelles, 2000

[IBGE 2007] *Guide pratique pour la construction et rénovation de petits bâtiments (<1000m²) – fiches matériaux et santé*, IBGE (Institut bruxellois pour la Gestion de l'Environnement), Bruxelles, 2007

[IBGE 2009] *Guide de gestion des déchets de construction et de démolition, version décembre 2009,* édité par l'IBGE (Institut bruxellois pour la Gestion de l'Environnement), éditeur responsable: JP Hannequart, Bruxelles, 2009, téléchargeable sur le site www.ibgebim.be

[IBO 2008] *Passivhaus-Bauteilkatalog, Details for Passive Houses: Ökologisch bewertete Konstruktionen, A Catalogue of Ecologically Rated Constructions*, publication de l'Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie, éditions Springler-Verlag en 2008

[IEA 2009] *Key World Energy Statistics*, rapport de l'Agence Internationale à l'Energie, 2009, téléchargeable sur http://www.iea.org/statistics/

[INERIS] *Fiches de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques*, de l'Institut National de l'Environnement industriel et des Risques, fiches téléchargeables sur sur http://www.ineris.fr/fr/rapports-d%C3%A9tude/toxicologie-et-environnement/fiches-de-donn%C3%A9es-toxicologiques-et-environnementales-

[INIES 2005] *Mieux comprendre la partie environnementale des déclarations environnementales et sanitaires des produits de construction selon la norme NF P01-010*, Comité technique de la base INIES, CSTB, version 1, juillet 2005, disponible sur www.inies.fr/documents

[INRS] *Fiches toxicologiques sur différents substances ou produits* de l'Institut National de Recherche et de Sécurité, , fiches téléchargeables sur http://www.inrs.fr/accueil/produits/bdd/recherche-fichetox-criteres.html

[INRS 2008] *Les fibres*, dossier WEB, Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), avril 2008

[INRS 2010] *Les solvants*, dossier WEB, Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), octobre 2010

[KINTS 2008] KINTS, *La rénovation énergétique et durable des logements wallons, Analyse du bâti existant et mise en évidence de typologies de logements prioritaires*, Architecture et Climat, Louvain-la-Neuve, 2008.

[KULA 2009] KULA , TERNAUX, *Materiology, matériaux et technologies : l'essentiel à l'usage des créateurs*, BIRKHAUSER et FRAME PUBLISHERS, 2009

[KUMMER 2007] KUMMER, *Construire en maçonnerie*, Collection Basics, Birkhauser - éditions d'architecture, Bâle, Suisse, 2007

[KUR 2005] KUR, *L'habitat écologique, quels matériaux choisir ?*, Terre Vivante, Mens, 2005

[LE GALL 2004] LE GALL, *Effets des dépôts atmosphériques de soufre et d'azote sur les sols et les eaux douces en France*, rapport INERIS pour le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, novembre 2004, France

[LEONARD 2008] LEONARD, *Relation « Matériaux-santé » en Architectecture*, travail de fin d'étude présenté à Louvain la Neuve, promoteur : André De Herde, année académique 2007 – 2008

[LIEBARD 2005] LIEBARD, DE HERDE, *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique, Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*, Observ'ER, Paris, 2005.

[MAHAUT 2009] MAHAUT, *L'eau et la ville, le temps de la réconciliation – Jardins d'orage et nouvelles rivières urbaines*, thèse de doctorat, directeur de thèse : A. De Herde, Université de Louvain la Neuve, Louvain la Neuve, octobre 2009

[MARCO 2004] Guide MARCO «Construire avec l'environnement», guide multimédia réalisé par la la Confédération Construction Wallone (CCW), accessible sur http://www.marco-construction.be

[MCDONOUGH 2002] MCDONOUGH, BRAUNGART., *Cradle to cradle: remaking the way we make things*, Edition North Point Press, 2002.

[MENGONI 2009] MENGONI JC., MENGONI M., *Matériaux écologiques d'intérieur, aménagement, finitions, décorations*, Terre Vivante, Mens, 2009

[MONITEUR 2008] *Caractéristiques des produits pour la construction durable, choisir et prescrire des solutions environnementales adaptées*, MEMENTO, Le Moniteur, 2008

[MONITEUR 2002] *Construire avec l'acier*, Le Moniteur, Paris, 2002

[MONITEUR 2000] *Construire avec les bétons*, Le Moniteur, Paris, 2000

[NATTERER 1991] NATTERER, HERZOG, VOLZ, *Construire en Bois 2*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1991, Lausanne, Suisse

[NORMAN 2003] NORMAN, *Le corps de l'espace, les nouveaux matériaux dans l'architecture depuis 1850*, éditeur responsable J.Benthuys, Centre culturel du Brabant wallon, 2003, Court St Etienne, Belgique

[OLIVA 2006] OLIVA, COURGEY, *La conception bioclimatique*, Terre Vivante, Mens, 2006

[OLIVA 2001] OLIVA, *L'isolation écologique, conception, matériaux et mise en œuvre*, Terre Vivante, Mens, 2001

[OMS 2005a] *Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air :particules, ozone,dioxyde d'azote et dioxyde de soufre - Mise à jour mondiale 2005*, Synthèse de l'évaluation des risques, étude réalisée par l'Organisation Mondiale pour la santé, 2005, téléchargeable sur http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair_aqg/fr/index.html

[OMS 2005b] *Air quality guidelines. Global update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide,* Rapport de l'Organisation Mondiale pour la santé sur l'évaluation des risques, 2005, téléchargeable sur http://www.euro.who.int/en/what-we-do/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/pre2009/air-quality-guidelines.-global-update-2005.-particulate-matter,-ozone,-nitrogen-dioxide-and-sulfur-dioxide

[OMS 2010a] *WHO Guidelines for Indoor Air Quality, Selected pollutants,* rapport de WHO European Centre for Environment and Health, Bonn Office,2010, téléchargeable en version anglaise sur http://www.euro.who.int/fr/what-we-publish/abstracts/who-guidelines-for-indoor-air-quality-selected-pollutants

[OMS 2010b] *WHO guidelines for indoor air quality : dampness and mould,* rapport de WHO European Centre for Environment and Health, Bonn Office,2010, téléchargeable en version anglaise sur http://www.euro.who.int/fr/what-we-publish/abstracts/who-guidelines-for-indoor-air-quality-selected-pollutants

[PEUPORTIER 2003] PEUPORTIER, *Eco-conception des bâtiments, bâtir en préservant l'environnement,* Presses de l'Ecole des Mines de Paris, Paris, 2003

[PEUPORTIER 2005] PEUPORTIER, PUTZEYS, *Presco workpackage 2, Intercomparison and benchmarking of LCA based environmental assessment and design tool*, final report, 2005, disponible sur www.etn-presco.net

[PFUNDSTEIN 2007] PFUNDSTEIN, GELLERT, SPITZNER, RUDOLPHI, I*nsulating materials – Principles, ma-*

terials, applications, éditions DETAIL, 2007

[RAPOPORT 1972] RAPOPORT, *Pour une anthropologie de la Maison*, collection Aspects de l'Urbanisme, éditions DUNOD, Paris, 1972

[RECORD2004] Synthèse de l'étude« *Détermination des potentiels de formation d'ozone (PCOP) pour les différentes espèces gazeuses à l'échelle de l'Europe de l'Ouest. Amélioration de l'indicateur de pollution photo-oxydante dans les ACV* »publiée en 2004 par RECORD, disponible sur http://www.record-net.org/

[REICHEL 2004] REICHEL, HOCHBERG, KÖPKE, *Plaster, Render, Paint and Coating – details, products and case studies*, Edition Detail, Birkhäuser, 2004, Munich

[REITER 2001] REITER, DE HERDE, *L'éclairage naturel des bâtiments*, publication du Ministère de la Région Wallonne, division Energie, Architecture et Climat, 2001

[R.DURABLE 2006-19] *Des technologies appropriées pour la construction, l'eau et la santé*, La Revue Durable, n°19,2006

[R.DURABLE 2009-32] *Biens de consommations et chimie : privilégier les filières saines*, La revue Durable, n°32, 2009

[R.DURABLE 2009-34] *Construire et rénover : les écomatériaux débordent d'atouts*, La Revue Durable, n°34, 2009.

[SCHITTICH 2005] SCHITTICH, *Enveloppes: Concepts, Peaux, Matériaux*, Birkhäuser, En Detail, 2005.

[SCHITTICH 2001] SCHITTICH, STAIB, BALKOW, SCHULER, SOBEK, *Construire en verre*, éditions DETAIL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 2001

[SCHWARZ 1998] SCHWARZ, *L'écologie dans le bâtiment, guides comparatifs pour le choix des matériaux* de construction, Verlag Paul Haupt, Berne, 1998

[STEIGER 2007] STEIGER, *Construire en bois*, Collection Basics, éditions Birkhauser Verlag AG, Bâle, Suisse, 2007

[STRALE 2011] STRALE, *L'évolution récente du transport de marchandises en Belgique*, EchoGéo(en ligne), numéro 15/2011, mis en ligne le 11 avril 2011. URL : http://echogeo.revues.org/12311

[STUDER 1997] STUDER, FREY, *Introduction à l'analyse des structures*, Presses Polytechniques et UniversitairesRomandes, Lausanne, 1997

[TRACHTE 2003] TRACHTE, *Gestion des déchets de chantier, Potentiel d'avenir pour le secteur de la construction en Région de Bruxelles-Capitale*, travail de maîtrise présenté à Toulouse,

promoteur : André De Herde, Université de Louvain la Neuve, septembre 2003

[TRACHTE 2010] TRACHTE, DE HERDE, *Choix des matériaux – Ecobilans de parois*, publication réalisée pour le compte de la Région Wallonne par Architecture et Climat, Louvain la Neuve, 2010

[TRANSPORT 2009] *Transports et environnement : comparaisons européennes* , Rapport du Commissariat général au développement durable, avril 2009, téléchargeable sur www.developpement-durable.gouv.fr/Transports-et-environnement

[VANNESTE 2007] VANNESTE, THOMAS, GOOSSENS, *Enquête socio-économique 2001 , Le logement en Belgique*, Monographies, réalisée pour le compte de SPF Economie, P.M.E., Classes moyennes et Energie, Direction générale Statistique et Information économique, éditeur responsable : Niko Demeester, Bruxelles 2007, téléchargeable sur statbel.fgov.be/fr/.../mono_200102_fr%5B1%5D_tcm326-35799.pdf

[VONWEIZSACKER 1997] VON WEIZSACKER, ERNST, AMORY, LOVINS, HUNTER, *Club de Rome,Facteur 4: deux fois plus de bien être en consommant deux fois moins de ressources*, Terre vivante, Mens, 1997

[WIGNANCOURT 2009] WIGNANCOURT, *Caractérisation, mesure et évaluation des indicateurs techniques, économiques et financiers des éco-matériaux : application au secteur du bâtiment*, thèse de doctorat, directeur de thèse : Ph. Deshayes, Ecole centrale de Lille, Lille, déc;2009

[WILQUIN 2001] WILQUIN, *Construire en aluminium*, Le Moniteur, Paris, 2001

[WINES 2000] WINES, *L'Architecture verte*, édition Benedikt Tashen Verlg GmbH, 2000, Köln

[WRAP 2008] *Choosing construction products, guide to the recycled content of mainstream construction product*, publié par le Waste and Resources Action Program (WRAP), version 4.1, June 2008, téléchargeable sur www.wrap.org.uk

[WWF 2008] *Rapport Planète Vivante 2008*, rapport international du WWF-World Wide Life Fund for Nature, 2008, téléchargeable en version française sur www.wwf.fr/pdf/LPR_2008_FR.pdf

[WWF 2010] *Rapport Planète Vivante 2010*, biodiversité, biocapacité et développement, rapport international du WWF-World Wide Life Fund for Nature, 2010, téléchargeable en version française sur www.wwf.fr/s-informer/dossiers/rapport-planete-vivante

[ZASTAVNI 2010] ZASTAVNI, Matières à construire, cours AUCE 1702 , Faculté d'Architecture, d'Ingénierie architecturale, d'Urbanisme

[ZIJLSTRA 2005] ZIJLSTRA, *Materials skills, evolution of materials*, éditions Materia, Rotterdam, 2005

Normes européennes et belges

[ISO 2006a] NORME ISO 14040: Management environnemental - Analyse de cycle de vie - Principes et cadres, 2006

[ISO 2006b] NORME ISO 14044 «Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Exigences et lignes directrices », 2006

[ISO 2006c] NORME ISO 14025 «Marquages et déclarations environnementaux -- Déclarations environnementales de Type III -- Principes et modes opératoires », 2006

[ISO 2004] NORME ISO 16000 «Air intérieur – stratégie d'échantillonnages du formaldéhyde et autres composés», 2004

[ISO 2000a] NORME ISO 14020 « Étiquettes et déclarations environnementales -- Principes généraux », 2000

[ISO 2000b] NORME ISO 14049 « Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Exemples d'application de l'ISO 14041 traitant de la définition de l'objectif et du champ d'étude et analyse de l'inventaire », 2000

[ISO 1999] NORME ISO 14024 «Marquage et déclarations environnementaux -- Étiquetage environnemental de type I -- Principes et méthodes », 1999

[NBN 2008] NORME NBN B 62-002, Annexe A - Tableaux de valeurs de calcul pour la conductivité thermique des matériaux de construction, 2008.

[NBN 2006] NORME NBN EN 12524, Matériaux et produits pour le bâtiment - Propriétés hygrothermiques - Valeurs utiles tabulées, 2000.

[NBN 2006] NBN_EN_120, concernant les teneurs admissibles en formaldéhyde

[NBN 2006] NBN_EN_717, liée aux dégagements de formaldéhyde

Réglementations européennes et belges

[85/203/CEE] Directive 85/203/CEE du Conseil, du 7 mars 1985, concernant les normes de qualité de

l'air pour le dioxyde d'azote

[89/106/CEE] Directive 89/106/CEE du Conseil du 21 décembre 1988 relative au rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives des États membres concernant les produits de construction

[2008/50/CE] Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe.

[2001/81/CE] Directive 2001/81/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2001 fixant les plafonds d'émission nationaux pour certains polluants atmosphériques

[85/203/CEE] Décision 2003/507/CE du Conseil du 13 juin 2003 portant approbation de l'adhésion de la Communauté européenne au protocole à la Convention de 1979 sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance relatif à la réduction de l'acidification, de l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique.

[2004/42/CE] Directive 2004/42/CE du 21 avril 2004 visant à limiter les émissions de COV dues à l'utilisation de solvants organiques dans certains vernis et peintures

[2000/69/CE] Directive 2000/69/CE du 16 novembre 2000 concernant les valeurs limites pour le benzène et le monoxyde de carbone dans l'air ambiant.

[Régl. CE 1005/2009] Règlement (CE) n° 1005/2009 du Parlement européen et du Conseil du 16 septembre 2009 relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone.

[KYOTO 1997] Protocole de Kyoto à Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, disponible sur http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpfrench.pdf

Note d'information technique (NIT) - CSTC - www.cstc.be

[NIT 163] Note d'Information Technique 163 : Les roches et les minéraux, publication du Centre scientifique et technique de la construction (CSTC), Bruxelles, 1986

[NIT 180] Note d'Information Technique 180 : le traitement curatif du bois dans le bâtiment, publication du Centre scientifique et technique de la construction (CSTC), Bruxelles, 1990

[NIT 199] Note d'Information Technique 199 : Les enduits intérieurs, publication du Centre scientifique et technique de la construction (CSTC), Bruxelles, 1996

[NIT 208] Note d'Information Technique 208 : Jointoiement des maçonneries, publication du

Centre scientifique et technique de la construction (CSTC), Bruxelles, 1998

[NIT 209] Note d'Information Technique 209 : Les enduits extérieurs, publication du Centre scientifique et technique de la construction (CSTC), Bruxelles, 1998

[NIT 214] Note d'Information Technique 214 : Le verre et les produits verriers - Les fonctions des vitrages, publication du Centre scientifique et technique de la construction (CSTC), Bruxelles, 1999

[NIT 225] Note d'Information Technique 225 : Toitures en plaques ondulées de fibres-ciment : Matériaux - Composition - Réalisation, publication du Centre scientifique et technique de la construction (CSTC), Bruxelles, 2002

[NIT 228] Note d'Information Technique 228 : Les pierres naturelles, publication du Centre scientifique et technique de la construction (CSTC), Bruxelles, 2006

[NIT 240] Note d'Information Technique 240 : Toitures en tuiles, publication du Centre scientifique et technique de la construction (CSTC), Bruxelles, 2011

[NIT 243] Note d'Information Technique 243 : Les revêtements de façade en bois et en panneaux à base de bois, publication du Centre scientifique et technique de la construction (CSTC), Bruxelles, 2011

Références internet - sites internet consultés

Centres de recherches

- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) : http://www2.ademe.fr
- Agence internationale à l'Energie : http://www.iea.org
- Centre d'informations sur le bois: http://www.houtinfobois.be
- Centre interfédéral d'informations sur le bois: http://www.bois.be
- Centre national de recherche scientifique (France) – dossiers eau et dégradation de l'eau: http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau
- Centre scientifique et technique de la construction (CSTC) http://www.cstc.be
- Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) : http://www.cstb.fr
- Centre belge de recherche routière - Mobilité: http://www.brrc.be
- Centre techniques des matériaux naturels de construction: http://www.ctmnc.fr

- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC): http://www.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml
- Institut National de Recherche en Agronomie (INRA): http://www.inra.fr
- Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS) : http://www.inrs.fr
- Institut National de l'Environnement industriel et des Risques (INERIS): http://www.ineris.fr
- Organisme mondial de la santé (OMS) : http://www.who.int
- Resource Center for Environmental Technologies (CRTE - Tudor): http://www.crte.lu
- Service Public Fédéral Belge: https://portal.health.fgov.be
- Service fédéral changements climatiques : http://www.climat.be
- Vlaams Instituut voor bio-ecologisch bouwen en wonen (VIBE) : http://www.vibe.be
- Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO): http://www.vito.be

Fédérations de fabricants de matériaux et sociétés de traitement des déchets

- Portail français de l'Industrie du verre: http://www.verreonline.fr
- Portail des producteurs belges de matériaux de construction: http://www.bmpmc.be
- Portail de la fédération belge des ciments : http://www.febelcem.be
- Portail de la fédération belge de la brique (FBB) : http://www.brique.be
- Portail de la fédération de l'industrie du béton (FEBE): http://www.febe.be
- Portail de la fédération belge du béton cellulaire: http://www.febecel.be
- Portail des Carrières de Pierre Bleue Belge: http://www. pierrebleuebelge.be
- Portail de l'association belge des producteurs d'articles en plastique et en caoutchouc : http://www.federplast.be
- Portail des producteurs européens de plastique: http://www.plasticseurope.org
- Portail de l'association des producteurs européen de laines minérales (EURIMA): http://www.eurima.org
- Portail de l'association des producteurs européens d'acier (EUROFER): http://www.eurofer.org
- Veolia environnement : http://www.veolia.com
- Société Coopérative pour le TRAitement des DEchets de COnstruction en Wallonie (TRADECO) : http://www.

tradecowall.be

- Société visant la promotion du recyclage et de la valorisation de déchets industriels solides en Wallonie : http://www.recywall.be

Administrations et organismes

- AIRCLIM, Air Pollution & Climate Secretariat: http://www.airclim.org
- Association pour la certification des matériaux isolants (ACERMI) : http://acermi.cstb.fr
- Bureau d'évaluation des risques des produits et agents chimiques (BERPC): www.berpc.fr/reach-info/
- Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques : www.unfccc.int
- Europa- synthèses de la législation dans l'Union européenne : http://europa.eu
- European Chemical Agency (ECHA) – Agence européenne des substances chimiques : http://echa.europa.eu
- Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement (IBGE) : http://www.ibgebim.be
- Institut belge de normalisation - belgische norme (NBN): http://www.nbn.be/FR/home
- NASA: http://www.nasa.gov et http://earthobservatory.nasa.gov
- NAZA et couche d'ozone: http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov
- Service Public Fédéral Belge: https://portal.health.fgov.be
- Union wallonne des Entreprises: http://www.uwe.be/uwe/mobilite-transport-logistique/chiffres-et-diagnostic/air/marchandises

Labels écologiques

- Ecolabel européen: http://www.ecolabel.be
- Label Natureplus : http://www.natureplus.org
- Label NF Environnement: http://www.marque-nf.com
- Label Der Blaue Engel : http://www.blauer-engel.de
- Label Milieukeur: http://www.milieukeur.nl
- Label Nordic Swan: http://www.svanen.nu/eng
- Label ÖkoPlus: http://www.oekoplus.de
- Label FSC (Forest Stewardship Council): http://www.fsc.org

- Label PEFC (Program for the Endorsement of Forest Certification Schemes): http://www.pefc.org
- Label GUT: http://www.gut-ev.de
- Infolabel - Guide des labels pour une consommation responsable: http://www.infolabel.be

Méthodes d'évaluation environnementale et certifications environnementales

- Certification Minergie : http://www.minergie.ch/fr

Bases de déclarations environnementales de produit (DEP)

- Base BRE (Building Research Establishment): http://www.bre.co.uk
- Base IBU (Institut Bauen und Umwelt): http://bau-umwelt.de
- Base INIES – fiches françaises de déclarations environnementales et sanitaires (FDES): http://www.inies.fr
- Base MRPI (Milieu Relevant Product Informatie) : http://www.mrpi.nl
- Base SIA (Société suisse des Ingénieurs et Architectes): http://www.sia.ch

Bases de données d'inventaire et outils d'évaluation

- Base de données ECOINVENT (Swiss Centre for Life Cycle Inventories): http://www.ecoinvent.ch
- Norme de classification NIBE (Nederland Instituut voor Biologische en Ecologie): http://www.nibe.org
- Base de données KBOB (Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der Offentlichen Bauherren): http://www.bbl.admin.ch/kbob
- Base de données ECOSOFT: http://www.ibo.at/de/oekokennzahlen.htm
- Outils Ecobau (Durabilité et construction publique): http://www.eco-bau.ch
- Logiciel ECO-BAT (logiciel suisse d'analyse de cycle de vie d'un bâtiment): http://www.ecobat.ch
- Catalogue d'éléments de construction : http://www.catalogueconstruction.ch

Divers

- Répertoire toxicologique des substances du CSST (Commission de la santé et de la sécurité au travail) : http://www.reptox.csst.qc.ca/RechercheProduit.asp
- Répertoire toxicologiques des substances de l'ESIS (European Chemical Substances Informations System): http://ecb.jrc.ec.europa.eu/esis

Annexes

TABLE DES MATIERES

Annexe 1 - Caractéristiques des matériaux de construction **293**

Le bois 294
La pierre naturelle 305
Les matériaux en terre crue 316
La terre cuite ou céramique 323
Les métaux 331
Les liants minérau, mortiers et produits dérivés 341
Le béton 350
Le verre 356
Les plastiques 365
Les matériaux bitumineux 371
Les matériaux isolants 376

Annexe 2 - Tableau des performances hygrothermiques des matériaux **391**

Annexe 1

Caractéristiques des matériaux de construction

2. Le bois

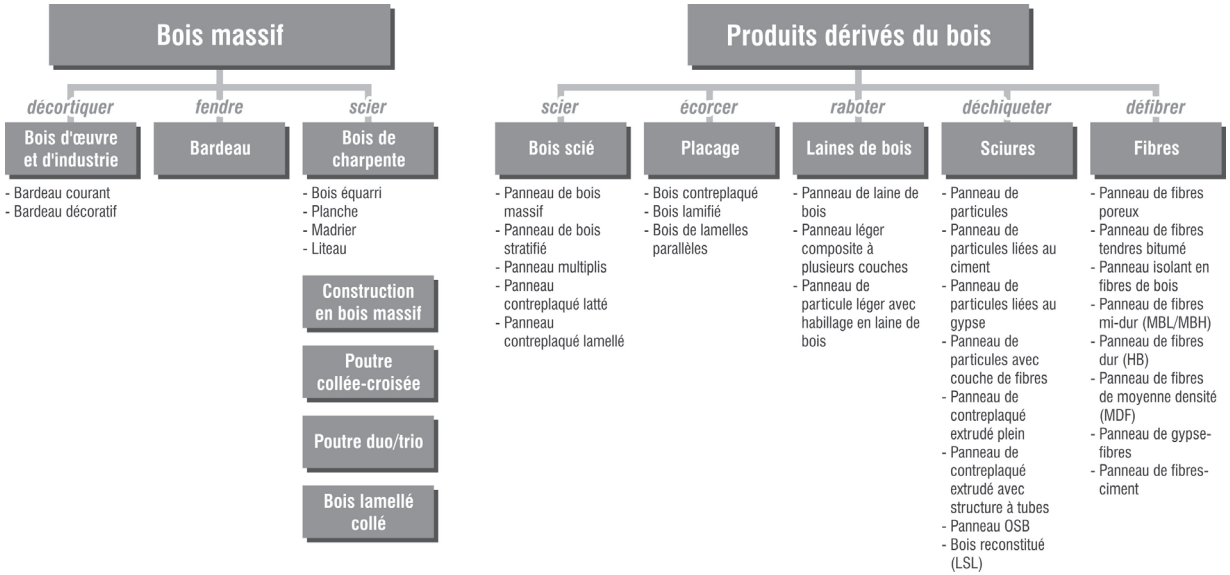


Illustration AN.1 : Descriptif des produits en bois ou à base de bois

« *Alors que la matière se révèle communément dans les profondeurs de la terre, arrachée au prix fort d'obscures extractions, concassée, pétrie, chauffée pour se présenter à nos yeux sous forme de semi-produits homogènes et ajustés à l'usage, le bois se singularise en se fabriquant sous nos yeux, dans la plus évidente familiarité.* » Source : [KULA 2009]

« *Le lien qui unit homme et arbre remonte à l'époque préhistorique, il passe par le magique, le mythique, le mental, il arrive jusque dans notre présent. Les arbres sont des archétypes de l'humanité* » J.Wiedermann



Illustration AN.2 : Différentes mises en œuvre du matériau bois

Le bois est un des premiers matériaux que l'homme a utilisés pour construire son habitat. Dans l'histoire de la construction, le bois apparaît comme le premier et, pendant longtemps, le principal matériau utilisé également pour les structures porteuses. Si au début de l'ère humaine le bois a été utilisé pour la facilité avec laquelle on pouvait le travailler et le combiner avec d'autres matériaux comme les peaux d'animaux, le bois est aujourd'hui choisi parmi une grande palette de matériaux grâce à une série de propriétés et caractéristiques qu'on peut résumer de manière suivante :

- le bois est une matière organique, végétale, renouvelable et disponible en abondance en Europe;
- le bois est un matériau de construction issu de la nature sans transformation importante;
- le bois est un matériau aux multiples essences différentes et chacune possède des caractéristiques propres, notamment en termes de teinte et de texture qui peuvent au fil du temps s'éclaircir ou s'assombrir…;
- le bois est un matériau contemporain, permettant de nombreuses prouesses technologiques et constructives;
- le bois est un matériau résistant : aux chocs, aux déformations et aux agents chimiques;
- le bois est un matériau isolant possédant une inertie élevée. C'est également un matériau hygroscopique, favorisant un climat intérieur agréable et sain;
- le bois est un matériau dont les moyens et techniques d'assemblage sont nombreux, sûrs et polyvalents

Si pendant quelques décennies, le bois a quelque peu été abandonné, l'introduction de produits dérivés et de nouvelles techniques d'assemblage sur le marché de la construction ont offert une seconde jeunesse au bois qui semble le mieux placé pour répondre aux préoccupations de développement durable dans la construction.

La matière « bois » est perçue comme une matière odorante, agréable, chaude et authentique. Elle est également intimement liée à notre inconscient : l'arbre enraciné dans la terre, dont les branches sont tendues vers le ciel, suscite chez chacun d'entre nous l'image de la force et de la vie. L'arbre est toujours perçu comme un abri : en été, on s'allonge à l'ombre de son feuillage, il nous réchauffe en hiver… Certaines régions ou certaines villes se révèlent également par leurs arbres : l'olivier en Méditerranée, le platane à Paris, le cèdre au Liban, l'érable au Canada…

1.1. La forêt et l'exploitation forestière

Les forêts recouvrent près d'un tiers de la planète. Si l'exploitation anarchique des forêts a conduit, dans l'histoire de l'homme, à de très graves et dangereux déséquilibres, la plupart des forêts sont aujourd'hui gérées de manière raisonnée au moyen de techniques de régulation appelées sylviculture.
Celles-ci visent à régénérer les espaces boisés qui existent et à en créer artificiellement de nouveaux, permettant ainsi d'obtenir des écosystèmes exploitables en état d'équilibre.

La forêt dans le monde

L'exploitation forestière est une véritable industrie: en 2000, l'emploi mondial dans le secteur forestier officiel était de 13 millions de personnes. Selon l'organisation suisse LIGNUM[1], on récolte chaque année plus de 3.5 milliards de mètres cubes de bois dans le monde. Près de la moitié sert à la production d'énergie, un quart est utilisé pour la fabrication de papier et carton et le dernier quart est utilisation par le secteur de la construction et de l'ameublement.
À l'échelle mondiale, on peut dénombrer 30 000 essences connues dont 500 sont commercialisées au niveau international.
Selon l'évaluation des surfaces forestières dans le monde de la FAO[2] (Food and Agriculture Organization), superficie forestière a augmenté, au niveau mondial, entre 2005 et 2010 de près de 82 millions d'hectares.
Les chiffres de cette évaluation mettent en évidence la prépondérance des deux grandes masses forestières que constituent la Russie et l'Amazonie et, dans une moindre mesure, de celles de l'Afrique tropicale (bassin du Congo et zones arborées des tropiques secs) et de l'Amérique du Nord. On y constate également le faible taux de couverture forestière de grands pays non tropicaux, particulièrement la Chine et les pays du Moyen-Orient, résultat combiné d'une occupation humaine dense et ancienne et d'une forte proportion de terres arides et semi-arides non boisées.
Huit pays possèdent chacun plus de cent millions d'ha de forêts et ensemble plus de 63 % des forêts du monde. Il s'agit de la Russie, du Brésil, du Canada, des États-Unis, de la Chine, du Congo, de l'Australie et de l'Indonésie.

L'exploitation forestière en Belgique

La forêt belge couvre 692 916 ha dont 544 800 ha en Région wallonne, 146 381 ha en Région flamande et 1735 ha en Région bruxelloise. Les forêts représentent plus de 20 % de la surface totale du territoire belge.
Depuis plus d'un siècle, les forêts belges augmentent en superficie : 435 000 ha en 1866, 618 000 ha en 1970 et 692 916 ha en 2000, soit près de 59 % d'accroissement en 140 ans[3].
Si actuellement la productivité moyenne annuelle est, toutes essences confondues, d'environ 7 m◊ par ha, elle n'atteignait au début du siècle dernier que 1,5 m³ par ha. Elle a pratiquement quintuplé tandis que la qua-

1 LIGNUM : www.lignum.ch

2 FAO: www.fao.org

3 source : http://www.houtinfobois.be

lité de nos bois s'est fortement améliorée.
Avec plus de 50 % de sa surface recouverte de forêts, la Province de Luxembourg arrive nettement en tête par rapport à ses consœurs. Suivent, par ordre d'importance, les Provinces de Namur, Liège, Hainaut, Anvers, Limbourg, Brabant (Wallon et Flamand), Flandre orientale et Flandre occidentale.
Les essences exploitées sont les suivantes:
- feuillus: chêne, hêtre et peuplier
- résineux: épicéa, mélèze, douglas et pin

1.2. Le bois en tant que matériau de construction

Il existe trois grandes familles d'essences de bois
- les feuillus : l'érable, le hêtre, le chêne, le merbau, le robinier, le châtaignier…
- les résineux : le douglas, l'épicéa, le pin sylvestre, le mélèze européen, le sapin blanc, le western red cedar…;
- les tropicaux : méranti, merbeau, afzélia, teck, movingué…

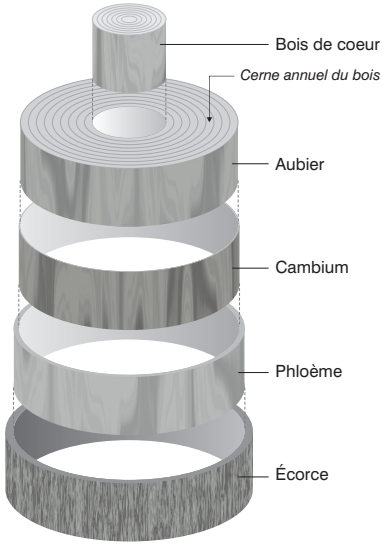


Illustration AN.3 : Structure d'un tronc

Ces arbres ont des structures et des propriétés différentes. Les résineux sont en général plus légers et sont souvent utilisés pour les structures. Les résineux dont le duramen est différencié de l'aubier (mélèze, cèdre, douglas) sont en général plus durables que ceux dont ces parties ne sont pas différenciées (épicéa). Les feuillus sont souvent des bois plus durs et plus lourds. Ils sont utilisés pour le mobilier et les escaliers. Les bois à duramen différencié sont en général plus durables que leurs homologues résineux. Ils peuvent alors être utilisés pour des châssis ou pour des usages où le risque de dégradation est important. Les feuillus légers sont utilisés pour les placages, les panneaux et certains produits dérivés. Les bois tropicaux, en général plus durables, sont utilisés pour les châssis de fenêtre, les revêtements de sol extérieurs et certains bois lamellés-collés.

Anatomie de l'arbre

Le bois est issu d'un organisme vivant, l'arbre, dont seul le tronc est utilisé pour la construction. Chaque arbre possède des propriétés spécifiques qui influent sur la qualité, l'apparence et le domaine d'utilisation.
Un tronc d'arbre est composé de plusieurs parties présentées ici de l'extérieur vers l'intérieur :
- l'écorce (cellules mortes), qui joue le rôle d'enveloppe de protection des tissus en formation ;
- le liber : zone de croissance de l'écorce ;
- le cambium : zone de croissance du bois du tronc ;
- l'aubier, partie vivante du bois, qui véhicule la sève, épaisse de quelques centimètres et particulièrement vulnérable aux attaques de parasites;
- le duramen ou « bois parfait », masse principale du tronc, qui sert de structure à l'arbre. Plus dense que l'aubier, sa durabilité naturelle varie selon les essences;
- la moelle, partie molle et spongieuse au centre du tronc qui sert à la formation initiale de la tige.

Seuls l'aubier et le duramen sont employés en construction. Le duramen est plus durable que l'aubier.
Le tronc croît en hauteur, en diamètre et développe des ramifications. La croissance en diamètre se traduit par la présence d'une succession de cernes annuels composés de couches étroites et denses, « bois final » créées en été où la croissance est ralentie et de couches plus larges, « bois initial », créées au printemps où la croissance est rapide.

Composition biologique et chimique

Le bois a un tissu poreux, hétérogène et anisotrope, formé de substances et de cavités cellulaires.
Ce tissu est principalement constitué de fibres. Ces fibres ou cellules, de forme allongée et majoritairement orientées selon l'axe du tronc, servent à transporter les substances nutritives et l'eau ainsi qu'à consolider la matière.
Les bois résineux, plus anciens que les bois feuillus, ont une composition simple : ils sont constitués d'un seul type de cellules appelées trachéides.
Les bois feuillus sont principalement constitués de deux types de cellules : les cellules conductrices qui se chargent du transport de la sève et les cellules ligneuses qui constituent l'ossature portante.
Les principaux éléments chimiques du bois sont la cellulose (40 à 50 %), l'hémicellulose (20 à 30 %), la lignine (20 à 30 %).
La cellulose est la substance naturelle la plus répandue. On la retrouve dans toutes les matières végétales. Elle assure la résistance à la traction du bois. En tant que matière à charge et mastic, l'hémicellulose améliore la résistance à la compression. La lignine ou « pâte à bois » naturelle confère aux parois des cellules la rigidité nécessaire et leur résistance à la compression. Contrairement à la cellulose, la lignine n'est pas une matière élastique.

Porosité, humidité et hygroscopie du bois

Le bois est un matériau poreux. Plus la surface des pores est grande, plus le bois est léger et moins il est dur. Grâce à cette structure poreuse, le bois est une matière qui peut absorber de très grandes quantités d'eau. Le taux d'humidité d'une pièce de bois représente la quantité d'eau contenue dans les parois cellulaires et dans les pores. Ce taux varie en fonction de la température et de l'humidité de l'air ambiant : il augmente lorsque l'humidité ambiante augmente et inversement. Dans le premier cas, on dit qu'il y a absorption, les molécules d'eau passant de l'air ambiant dans la matière cellulaire, dans le deuxième cas, on parle de désorption. L'absorption entraîne un gonflement volumique et la désorption un retrait volumique. Quatre états liés à l'humidité peuvent être décrits :

- état anhydre (H =0 %);
- état desséché à mi sec (0 % < H < 30 %) : c'est l'état le plus important pour le bois de construction;
- saturation des fibres (H = 30 %) : les pores sont partiellement remplis d'eau;
- saturation complète (H > 30 %) : les pores sont complètement remplis d'eau.

Il est à noter que c'est lorsque le taux d'humidité varie entre 22 % et 30 % et que le bois subit des alternances « sécheresse/ humidité » que le risque d'agression par des insectes ou des champignons (et la pourriture) est le plus important.

Ces variations de concentration d'humidité influencent le poids, les dimensions, la durabilité et les caractéristiques mécaniques du bois. Il est donc essentiel, en termes de construction, d'employer des bois ou des pièces de bois dont le taux d'humidité est adapté aux conditions d'utilisation et de mettre en œuvre des bois et des produits dérivés à un taux d'humidité proche du taux d'humidité d'équilibre.

Selon les normes européennes, le taux de référence dans le bâtiment est de 12 % pour l'ensemble des propriétés physiques et mécaniques.

Les taux suivants sont d'ailleurs recommandés à la mise en œuvre :

- environ 10 % pour les bois mis en œuvre dans un bâtiment chauffé;
- 14 à 16 % pour les bois situés à l'extérieur.

L'absorption d'eau ne se fait pas uniquement à l'état liquide. Grâce aux propriétés hygroscopiques du bois, des échanges de vapeur d'eau se font également entre l'air ambiant et la matière « bois »

Cette capacité à absorber la vapeur d'eau quand l'air ambiant est fort humide ou à la restituer quand l'air ambiant est trop sec contribue de manière significative à améliorer le climat intérieur.

Aspect du bois

Pour certaines essences de bois, il y a une différence de teinte entre l'aubier (plus clair) et le duramen. Pour d'autres essences, il n'y a aucune différence de teinte entre le centre et l'extérieur de la grume.

La texture du bois est une texture à « fils » et « à grains ». Le grain des résineux est déterminé par la régularité des cernes de croissance et varie donc selon la vitesse de croissance. Le grain des feuillus dépend de la dimension des pores.

Le fil du bois est donné par la direction des fibres. Il peut être droit ou présenté des irrégularités : fil ondulé, fil tors, bois ronceux ou madré.

Caractéristiques physiques

Toute pièce de bois utilisée dans la construction provient d'un organisme vivant dont la croissance est influencée par son environnement: aucune pièce n'est identique. Les qualités du matériau dépendent donc de l'essence de l'arbre, de son âge, de la qualité du sol, de l'altitude et de la latitude où il a poussé, des traitements qu'il a subis depuis son abattage.

Ces différentes imprécisions s'accordent mal avec les



Illustration AN.4: Bois de bardage - Auberge de Jeunesse de Vidy , Lausanne

exigences de performance et de régularité auxquelles nous ont habitués les produits industrialisés.
Ceci peut dès lors expliquer le succès de matériaux dérivés du bois tel que le lamellé collé, le bois lamifié ou les panneaux produits industriellement.
Les propriétés physiques particulières du bois offrent de multiples possibilités d'usage dans la construction et l'aménagement intérieur. Cependant sa mise en œuvre adéquate nécessite de la part du concepteur et de l'entrepreneur une connaissance approfondie de ses spécificités, des essences et des modes constructifs appropriés.

• L'anisotropie du bois

On qualifie d'anisotrope toute matière dont les qualités varient en fonction des directions.
Le bois est un matériau typiquement anisotrope dans son comportement mécanique, c.-à-d. qu'il présente une résistance différente selon qu'il est sollicité dans le sens de ses fibres ou au contraire perpendiculairement à celles-ci.
À l'inverse du bois, le verre ou le métal sont considérés comme des matières isotropes, c.-à-d. que leurs propriétés sont identiques dans toutes les directions.

• Masse volumique

La densité du bois est déterminée en fonction de la teneur en humidité (masse et modification du volume par gonflement ou retrait) et de la position dans le tronc (type de bois).
Selon les normes européennes, elle est exprimée à partir de sa masse volumique à un taux d'humidité de 12 %.
La masse volumique varie d'une essence à l'autre : pour les bois résineux utilisés dans la construction, la masse volumique moyenne se situe entre 450 et 600 kg/m³ ; pour les bois feuillus autour de 700kg/m³ et parfois 1000 kg/m³ pour certains feuillus tropicaux.
La masse volumique est une des principales caractéristiques du bois, car il en découle une série d'autres propriétés essentielles comme la rigidité, la dureté, la résistance mécanique…

• Dureté

La dureté caractérise la résistance du bois à la pénétration d'un élément métallique. Il existe plusieurs méthodes pour la définir
Elle varie selon les essences, mais on considère de manière générale que plus un bois est dense, plus il est dur.

Comportement statique

À la différence des maçonneries, destinées à être sollicitées essentiellement en compression, le bois est capable de reprendre de manière presque équivalente les efforts de compression et de traction.
Cependant, vu la structure cellulaire tubulaire du bois, il est important de rappeler que la direction dans laquelle s'appliquent ces différentes forces est déterminante: dans le sens des fibres, le bois peut reprendre des efforts de compression environ quatre fois plus importants que dans le sens transversal aux fibres.
De manière générale, le comportement statique du bois dépend de sa densité. C'est pour cette raison que les bois feuillus, comme le chêne, se prêtent particulièrement bien aux sollicitations en compression alors que les sollicitations en flexion seront favorablement reprises par un bois résineux.
Le bois de construction étant issu d'une matière naturelle et organique, il peut présenter des irrégularités qui influencent son comportement statique. Celui-ci n'est donc pas garanti d'avance.
Aussi le bois de structure fait-il l'objet d'un classement visuel et automatique ainsi que d'un marquage commercial suivant certains critères tels que le nombre et la taille des nœuds, les défauts de son fil, mais aussi sa masse volumique et son élasticité.
Les caractéristiques mécaniques d'un bois résineux courant (valeurs moyennes) sont présentées dans le tableau A3.01 ci-après:

Tableau AN.01: Caractéristiques mécaniques bois résineux[4]

Masse volumique	400 kg/m²
Module de Young	10.000N/mm²
Coefficient de Poisson	0.46 (compression)
Résistance	
à la traction	13N/mm²
à la compression	22N/mm²
Ductilité	
à la traction	non
à la compression	oui
Élancement λ max.	150
Dilatation thermique	4.10^{-6}/°C

Propriétés environnementales et sanitaires

• Le bois est une matière naturelle, indigène, renouvelable et biodégradable.

Les principales essences utilisées dans le secteur de la construction sont largement disponibles en Europe et l'utilisation de bois indigène a non seulement des répercussions sur la consommation d'énergie liée au transport (voir partie B,chapitre 4), mais également sur le développement et le maintien économiques d'une région.
Le bois est une matière vivante, qui se renouvelle naturellement ou à l'aide de l'homme grâce à la gestion des forêts. Le taux de renouvellement pour un bois de structure est de l'ordre de 30 ans.
Le bois brut, sans traitement, est une matière biodégradable : s'il n'est pas exploité par l'homme, le bois subit une dégradation biologique naturelle par des micro-organismes dans la forêt.

4 Source: [ZASTAVNI 2010]

• Le bois et la forêt: un puits naturel de carbone

Pendant leur croissance, les arbres produisent, grâce au phénomène de photosynthèse, de l'oxygène et de la matière organique à partir du gaz carbonique, de l'eau et du rayonnement solaire.

La fabrication d'une tonne de bois nécessite l'absorption de 1,6 tonne de gaz carbonique et produit 1,1 tonne d'oxygène[5].

Un hêtre de 25 m recycle près de 20 kg de CO_2 par jour pour libérer l'oxygène nécessaire à la respiration de 3 personnes. En un an, tout en produisant l'oxygène nécessaire à une famille de 4 personnes, un arbre moyen absorbe autant de CO_2 que ce qu'a rejeté une voiture qui a parcouru 20 000 km.

À cet égard, ils sont considérés comme un puits naturel de carbone. Cette notion de puits de carbone est expliquée dans la partie B de cette thèse, au chapitre 3.

En fin de vie, l'arbre non exploité par l'homme se décompose naturellement et cette décomposition dégage une grande quantité de gaz carbonique. On dit alors que le bilan CO_2 est neutre : la quantité de gaz carbonique que l'arbre a absorbée durant sa croissance est rejetée dans l'atmosphère lors de sa dégradation.

• Consommation d'énergie grise

Si le bois d'œuvre nécessite relativement peu d'énergie grise puisqu'il subit uniquement une transformation mécanique (découpe, ponçage...), ce n'est pas le cas des produits dérivés tels que les panneaux de fibres, de particules et les isolants. Ces matériaux requièrent, lors de la fabrication, une énergie grise importante du fait des transformations subies: broyage, défibrage, malaxage, séchage (haute température)...

Exemple:

L'énergie grise à la fabrication:

- d'un panneau MDF est de 39.6 MJ/kg
- d'un panneau OSB est de 45.8 MJ/kg

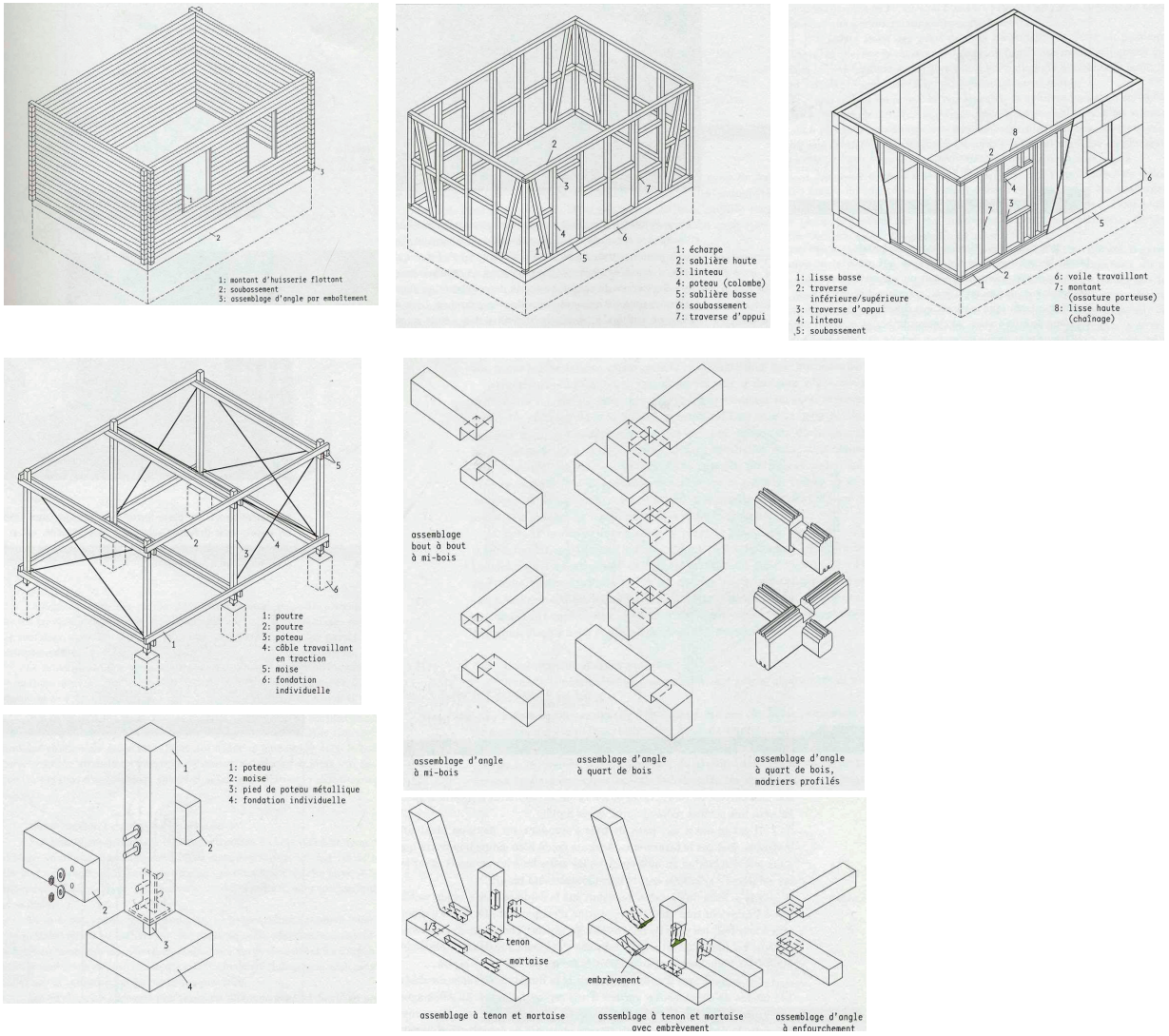


Illustration AN.5 : Bois, techniques constructives et éléments de fixation

5 Source: [GAUZIN-MÜLLER 1999]

- d'une plaque de plâtre est de 5.80 MJ.kg
- d'une plaque de fibroplâtre est de 5.279 MJ/kg

• Le bois est un matériau favorisant un climat intérieur sain (s'il n'est pas traité)

Le bois, matière odorante, chaude et douce au toucher, a une influence positive sur l'atmosphère intérieure grâce à ces propriétés chimiques et physiques :

• le bois, matière hygroscopique et isolante à forte inertie, régule l'hygrothermie du milieu ambiant;
• le bois non traité ne contient pas de substances toxiques. Le bois, en tant que matière organique, dégage de très faibles quantités de formaldéhydes, sans conséquence pour la santé humaine;
• le bois est électriquement neutre

• Assemblage

Le matériau bois est un matériau qui s'assemble principalement de manière mécanique, à l'aide de vis, de clous, de chevilles ou sans éléments par des assemblages de matière comme le «tenon/mortaise».

Ce type d'assemblage présente les avantages suivants:

- rapidité de montage sur chantier, surtout si l'ensemble des éléments est préfabriqué et découpé en atelier;
- facilement réversible: chaque pièce de bois peut être facilement désolidarisée des autres.

• Fin de vie et traitement

Le bois est une matière organique biodégradable. Cependant, pour de nombreux usages, le bois est traité, ce qui réduit sensiblement sa capacité à se décomposer naturellement.

Les déchets de bois sont des déchets de classe 2 qui se répartissent de manière suivante:

- classe A : déchets de bois non traité et non dangereux. Ces déchets sont issus de bois massif, de palettes, de planches et de poutres propres et non contaminées. Ces déchets sont valorisables dans l'industrie des panneaux dérivés et dans la production de sciures. Ils sont également introduits dans les fours de cimenterie comme combustible;
- classe B: déchets de bois traité non dangereux. Ces déchets de bois sont issus de panneaux (multiplex, fibres), de bois de mobilier, de châssis de portes et fenêtres... Pendant longtemps, ces déchets ont été mis en CET de classe 2; aujourd'hui, ils sont valorisables dans l'industrie des panneaux dérivés et dans la production de sciures. Ils sont également introduits dans les fours de cimenterie comme combustible;
- classe C: déchets de bois dangereux et imprégnés. Ces déchets sont issus de panneaux durs et tendres de fibres (MDF, OSB...). Ils sont soit incinérés soit utilisés comme source d'énergie ou comme combustible

1.3. Aspects techniques

Facilité de mise en œuvre

Le bois est un matériau facile à travailler et à assembler. Le travail du bois peut être réalisé de manière artisanale, à la main ou industrielle. Cette matière se prête parfaitement à la fois à la préfabrication en usine et à l'autoconstruction.

Il existe différents systèmes constructifs, mais le plus couramment utilisé aujourd'hui, le système à ossature permet à la fois une grande flexibilité au niveau de la distribution des espaces, une préfabrication en usine, une mise en œuvre « à sec », un temps de montage et des délais d'exécution relativement courts et surtout une adaptabilité (transformation, agrandissement…) dans le temps et en fonction des variations des besoins des occupants.

Il existe également de nombreuses méthodes d'assemblages, adaptées aux produits en bois et aux sollicitations : clouage, collage, chevilles, vis, boulons, plaques et sabots d'assemblage, broches… Les fixations mécaniques sont les plus fréquemment utilisées et permettent un démontage aisé à la fois des éléments de structure et des éléments de remplissage.

Dégradations du bois

Le bois en tant que matière naturelle organique peut subir des dégradations, soit par des micro-organismes et/ou des insectes, soit par combustion lors d'incendie. Le bois est un matériau inflammable et combustible. Certaines précautions s'imposent donc lors de sa mise en œuvre.

Les bois sont classés en fonction du risque potentiel de dégradation. C'est ce qu'on appelle les classes de risques:

Tableau AN.02 : classes de risques - utilisation du bois

Classe de risque	Utilisation
classe 1	bois sec exclusivement (ex.: escaliers, parquets dans des locaux secs, etc.)
classe 2	bois occasionnellement mouillés (ex.: bois de charpente
classe 3	bois extérieur (ex.: bardages, châssis, etc.)
classe 4	bois extérieur en contact avec le sol (ex.: pied de poteaux ou de bardage)
classe 5	bois extérieur en contact avec l'eau de mer (ex.: jetée)

Plus on sera confronté à une classe de risque importante, plus il s'agira de recourir à des essences de bois naturellement durables ou, à défaut, d'opter pour des traitements de préservation adéquats, éventuellement complétés de traitement de protection.

Les bois de construction sont également classés en fonction de leur durabilité dans le temps et en fonction de leur résistance aux agents de dégradation. C'est ce qu'on appelle les classes de durabilité.

Les propriétés de durabilité du bois varient entre l'aubier et le duramen. Aubier et duramen des essences de bois sont donc répartis en classes de durabilité entre V (périssable), IV(non-durable), III (moyennement durable), II (durable) et I (très durable) selon la norme NBN-EN 350:

Tableau AN.03 : Durabilité des essences de bois

Essence	Duramen	Aubier
Epicéa	IV	V
Pin sylvestre	III - IV	V
Douglas	III	V
Mélèze	III	V
Chêne européen	II - III	V
Châtaignier	II	V
Hêtre	V	V
Robinier	I - II	V
Méranti	II - IV	V
Teck	I - III	
Afzélia	I	

2.4. Produits de construction en bois

Avec l'industrialisation du bois et de ses traitements, de nombreux produits de construction, en bois massif ou à base de bois (dérivés) ont été développés. En voici quelques-uns brièvement décrits :

Éléments en bois massif

Dans les éléments de construction en bois massif, la structure du bois n'est peu voire pas modifiée. Selon le produit, les traitements ou les transformations subies par la matière sont essentiellement le sciage, le séchage, la sélection, et éventuellement assemblage par enture et/ou collage.
Les produits en bois massifs, utilisés dans les structures en tant qu'éléments portants ou de contreventement doivent faire l'objet d'une certification.

- Bois rond

Les troncs d'arbres, une fois ébranchés et écorcés, sont appelés « bois ronds ». Le bois rond est principalement utilisé comme élément porteur des systèmes à ossature, pour les constructions en bois massif et pour l'aménagement paysager des espaces extérieurs.
Le traitement de surface va du maintien de la forme d'origine du tronc au calibrage d'un diamètre régulier avec un lissage de la surface.

- Bois de construction (résineux et feuillus)

Le bois de construction est obtenu par débit ou profilage d'un tronc d'arbre en section rectangulaire. Selon le type de section et l'épaisseur du bois, on distingue en section carrée : poutres, chevrons, gîtes et en section plate : madriers, bastaings, planches, voliges et lattes.

- Poutres collée-croisées

Leur fabrication consiste en l'assemblage par collage au moyen d'une colle polyuréthane de quatre segments de bois résineux semblables à des quartiers de bois. Ce type de poutre convient pour les mêmes usages que le bois massif de construction.

- Poutres duo et trio

Les poutres en bois contre-collé, également appelées poutres duo ou trio, sont obtenues par collage sur la surface plane de deux ou trois pièces de bois équarris.
Après séchage des bois, on procède à une sélection visuelle avant collage (pour la résistance), à un rabotage sur les quatre faces du bois, de la pose de la colle et en fin du collage. Les poutres ainsi créées sont rabotées et poncées.
Ce type de poutre est une alternative aux éléments en bois massif et/ou aux poutres collées-croisées.

- Bois lamellé-collé

Le bois lamellé-collé est obtenu par le collage d'au minimum trois lamelles de bois massif (résineux) aux fibres parallèles. Il est fabriqué selon le même procédé que les



Illustration AN.06: Bois de structure



Illustration AN.07: Panneaux de fibres: OSB - Multiplex

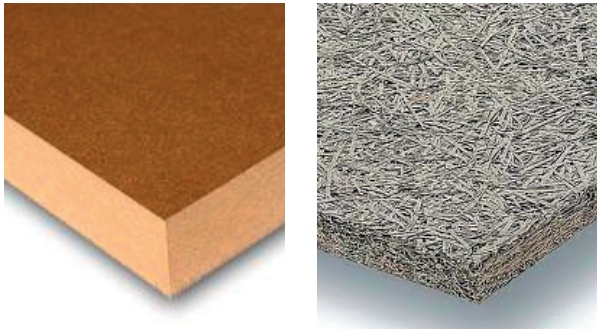


Illustration AN.08: Panneaux de fibres: MDF - Aggloméré



Illustration AN.09: Maison à ossature bois: panneaux et bois de structure traité



Illustration AN.10: Réalisation de cloisons intérieures en panneaux OSB



Illustration AN.11: Mélange de bois brut, de bois de structure et panneau OSB

poutres duo ou trio.
Le bois lamellé-collé est particulièrement adapté pour les éléments de construction fortement sollicités et/ou de grande portée.

Produits dérivés du bois

Depuis plus de 50 ans, les produits dérivés du bois sont utilisés dans le secteur de la construction sous forme de panneaux de bois aggloméré ou de fibres de bois.
Les produits dérivés du bois sont constitués de particules de bois déchiqueté, pressées avec des colles ou des liants organiques ou minéraux pour obtenir des plaques. L'industrie de ce type de matériaux utilise principalement du bois en grume, mais également des déchets de l'industrie du bois, des déchets de construction (idéalement non traités) comme matière première pour fabriquer les copeaux, les fibres ou les particules.
L'homogénéité obtenue par les procédés de fabrication permet de conserver l'ensemble des propriétés du matériau « bois » tout en équilibrant largement l'anisotropie et en diminuant les risques de retrait ou de gonflement.
On distingue cinq familles de panneaux dérivés du bois: les panneaux en bois massif reconstitué (multiplis et lamellés-collés), les panneaux de contre-plaqué, les panneaux à lamelles orientées (OSB), les panneaux à particules et les panneaux de fibres (MDF).

• Panneaux multiplis (trois ou cinq plis)

Les panneaux multiplis sont constitués de trois ou cinq plaques de bois résineux (de 4 à 50 mm) collées de manière croisée.
La résistance de ce type de panneaux est très variable et varie selon l'épaisseur des couches, du type et de la qualité du bois utilisé.
Ce type de panneau est adapté pour la réalisation de parements porteurs ou de contreventement.

• Bois lamifié

Les panneaux en bois lamifié sont obtenus par pressage et collage de fines plaques de bois résineux (environ 3 mm d'épaisseur). Ces panneaux dérivés de bois sont très performants. Les plaques sont soit collées dans le sens des fibres du bois (elles ont toute la même direction) soit certaines couches ont une direction perpendiculaire.

• Contreplaqué de construction

Les plaques de contreplaqué de construction sont obtenues par collage de plusieurs couches de plaques de bois. À partir de cinq couches et pour des épaisseurs dépassant les 12 mm, on parle de bois multiplex.
Ces panneaux ont une résistance importante et de ce fait conviennent parfaitement pour la réalisation d'éléments porteurs.
Si l'on remplace le bois résineux par du hêtre, on obtient un panneau résistant et stable qui est adapté à la réalisation d'aménagements intérieurs ou mobiliers.

• Panneaux de particules

Les panneaux de particules sont composés de copeaux et de particules de bois encollés et pressés à haute température. Le processus de fabrication influence la position des copeaux dans le bois et la stabilité des panneaux :
Pressage à plat : on distingue trois types de panneaux
- panneaux «monocouche»: on y retrouve des particules grosses et fines en proportion égale dans toute l'épaisseur du panneau;
- panneaux «trois-couches»: les particules les plus grosses se trouvent dans la couche centrale tandis que des particules fines forment les deux couches extérieures;
- panneaux «multicouches»: les dimensions des particules varient de façon continue depuis les plus grosses dans la couche centrale jusqu'aux plus fines à l'extérieur du panneau.

Pressage par extrusion : les particules sont disposées perpendiculairement au panneau. On distingue les panneaux extrudés pleins et les panneaux extrudés tubulaires. Les premiers sont utilisés pour la réalisation de

vantaux de porte ou de cloisons de séparation. Ils présentent une bonne résistance à la traction perpendiculaire, mais moins bonne à la flexion.
Les panneaux de particules ont un large domaine d'utilisation : panneaux de contreventement, revêtement de sol, revêtement de plafonds et murs, ameublement…
On distingue les panneaux selon le liant utilisé : panneaux de particules liés par une résine artificielle[6] ou naturelle, panneaux liés par un liant minéral…

• Panneau OSB

Les panneaux OSB (Oriented Strand Board) viennent des États-Unis et du Canada. Ces panneaux sont composés de copeaux ou lamelles de bois résineux, encollées avec des résines de synthèse. Ces copeaux forment un matelas de trois couches croisées successivement et sont ensuite pressées de manière continue.
Le procédé de fabrication de ces panneaux leur confère une grande cohésion, une grande stabilité et une résistance mécanique élevée. Leur résistance à l'humidité réduit les variations dimensionnelles et permet un usage extérieur
Ils sont parfaitement adaptés pour la réalisation de parements de contreventement ou de reprise de charge, mais également comme panneaux de plancher pouvant supporter des charges importantes.
Ils sont faciles à usiner en atelier et faciles à travailler sur chantier (découpe et assemblage).

• Panneaux de fibres de bois (MDF)

Dans le domaine de l'ameublement et de l'agencement des espaces, le MDF (Medium Density Fireboard) a connu au cours de ces vingt dernières années un développement important par sa facilité à être usiné.
Ce panneau de fibres de bois collées et pressées à chaud possède deux faces lisses et une structure homogène.

On distingue plusieurs types de panneau MDF: le panneau standard, utilisé pour tous les usages en milieu sec, le panneau dit «hydrofuge», résistant à l'humidité (MDF vert), le panneau ignifugé et le panneau revêtu, mélaminé ou avec plaquage de bois.

• produits dérivés, colles et émission de formaldéhyde

L'utilisation de colles est une étape indispensable dans la fabrication des produits dérivés du bois. De très nombreuses substances chimiques qui composent les différentes colles ont des implications sanitaires, notamment des risques liés aux émissions de formaldéhyde.
Cinq catégories de résines et/ou colles peuvent être distinguées :
- les thermodurcissables : urée-formol, phénol-formol…;
- les thermoplastiques : colles néoprène, polyamides…;
- les colles en émulsion : vinyliques…;
- les colles thermofusibles à base de cire ou paraffine;
- les colles naturelles : caséines…

Parmi les catégories de résines citées ci-dessus, les résines thermodurcissables sont les plus couramment employées. Leur constituant de base est le formaldéhyde et de ce fait, ces résines contenues dans les produits dérivés du bois peuvent émettre du formaldéhyde dans l'air ambiant.
Les produits dérivés du bois sont les premiers produits de construction pour lesquels il y a eu en Europe des normes à respecter en termes d'émission.
L'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) recommande depuis 1995 des concentrations intérieures inférieures à 0,1 mg/m³ pendant 30 minutes pour les personnes normales et inférieures à 0,01 pour les personnes présentant une hypersensibilité respiratoire[7].
Depuis 2002, la norme européenne E1 impose des teneurs inférieures ou égales à 8 mg de formaldéhyde pour 100 g de matériau, ce qui correspond à des émissions maximales de 0,124 mg/m³ d'air.
La plupart des grands fabricants proposent aujourd'hui des produits de classe E1, et même avec des teneurs plus faibles.
Depuis 2003, le marquage CE est effectif pour les panneaux de bois. Il rend obligatoire l'information sur la classe de dégagement de formaldéhyde

Protection et traitement du bois contre les attaques biologiques

À la différence des matériaux minéraux, le bois en tant que matériau organique est exposé aux attaques biologiques d'origine végétale (champignons) ou animale (insectes) susceptibles de provoquer d'une part une détérioration de l'aspect extérieur et d'autre part une diminution de la capacité portante du bois. Ces attaques peuvent également entraîner la destruction complète du matériau.
Aussi la protection de ce matériau revêt-elle une importance primordiale dans la construction en bois.
Les champignons se développent lorsque le taux d'humidité du bois d'œuvre est compris entre 22 et 30 %, le plus souvent dans le cas d'une mauvaise aération et absence de lumière ou encore dans des milieux alcalins.
Les champignons retirent la cellulose et la lignine du bois, causant ainsi sa décomposition.
On distingue les champignons de pourriture et les champignons lignicoles.
Les champignons de pourriture tels que la mérule, le coniophore ou le polyphore des caves sont des organismes pouvant détruire tout ou partie des constituants élémentaires du bois ou altérer ses caractéristiques physiques et mécaniques.
Les champignons lignicoles tels que le champignon du bleuissement et le stereum sanguinolentum sont responsables des changements de coloration du bois et attaquent généralement le bois fraîchement coupé.
Tous les bois sont susceptibles d'être attaqués par les insectes. Les insectes peuvent infester le bois et se

6 Résine artificielle: résine phénolique, résine uréique et/ou résine de mélanine

7 Source: [DEOUX 2006]

nourrir de l'aubier plus tendre et plus riche en protéines. Les principaux insectes qui attaquent le bois sont le capricorne qui s'attaque principalement aux résineux, le lyctus qui n'attaque que les feuillus, les petites vrillettes qui attaquent l'aubier des résineux et feuillus d'Europe et d'Amérique du Nord, les grosses vrillettes qui attaquent les résineux et les feuillus déjà infestés par un champignon et les termites.

En termes de protection, on fait la distinction entre les mesures curatives, visant à traiter un bois déjà atteint et les mesures préventives destinées à empêcher les attaques biologiques.
Nous nous attacherons ici aux mesures préventives, lors de la conception. Celles-ci peuvent se subdiviser en trois catégories: la sélection adaptée des essences de bois, la protection constructive et la protection chimique

- Sélection des essences de bois
- Protection constructive

Ces mesures de protection sont principalement du ressort du concepteur. Elles consistent à limiter l'humidité du bois, essentiellement par des mesures et des moyens constructifs liés à l'architecture du bâtiment : débord de toiture, protection des pieds de structure, système d'assemblage…
Trois règles simples peuvent être appliquées:
- tenir le bois à l'écart de l'humidité;
- assurer l'écoulement de l'eau au-delà des éléments en bois;
- ventiler les éléments exposés à l'humidité et à la pluie par une lame d'air.

- Protection chimique

On ne devrait recourir aux protections chimiques que lorsque les autres mesures préventives se révèlent insuffisantes ou inapplicables.
Les moyens utilisés sont des produits d'imprégnation à base de solvants ou d'huile.
Les moyens de protection chimique dépendent de la fonction statique de l'élément à traiter. Les mesures à prendre diffèrent selon que l'élément est un élément porteur, un élément non porteur à faible stabilité dimensionnelle ou à stabilité dimensionnelle élevée.
La protection chimique du bois se fait par l'emploi d'agents biocides.
Le mot biocide (étymologiquement : bio + cide = « qui tue la vie ») désigne une large famille de substances chimiques qui regroupe les pesticides, les antiparasitaires et les antibiotiques.
Les biocides et leur mise sur le marché européen sont soumis à réglementation, et notamment à la directive du Parlement européen et du Conseil n° 98/8/CE du 16 février 1998
Cette directive prévoit une classification ou une caractérisation des produits selon leur impact sur la santé humaine :
- le *produit biocide à faible risque* est « un produit biocide qui ne contient comme substances actives qu'une ou plusieurs des substances énumérées à l'annexe I A et qui ne contient aucune substance préoccupante. Dans les conditions d'utilisation, ce produit biocide ne présente qu'un faible risque pour les êtres humains, les animaux et l'environnement »;
- le *produit biocide dit « préoccupant* » est « toute substance, autre que la substance active, intrinsèquement capable de provoquer un effet néfaste pour l'homme, les animaux ou l'environnement, et qui est contenue ou produite dans un produit biocide à une concentration suffisante pour provoquer un tel effet. »
Les substances acceptées par l'Union européenne sont reprises dans l'annexe I ou IA.



Illustration AN.12 : Bardage: bois courbé - Bâtiment Provelo - Bruxelles

2. La pierre naturelle

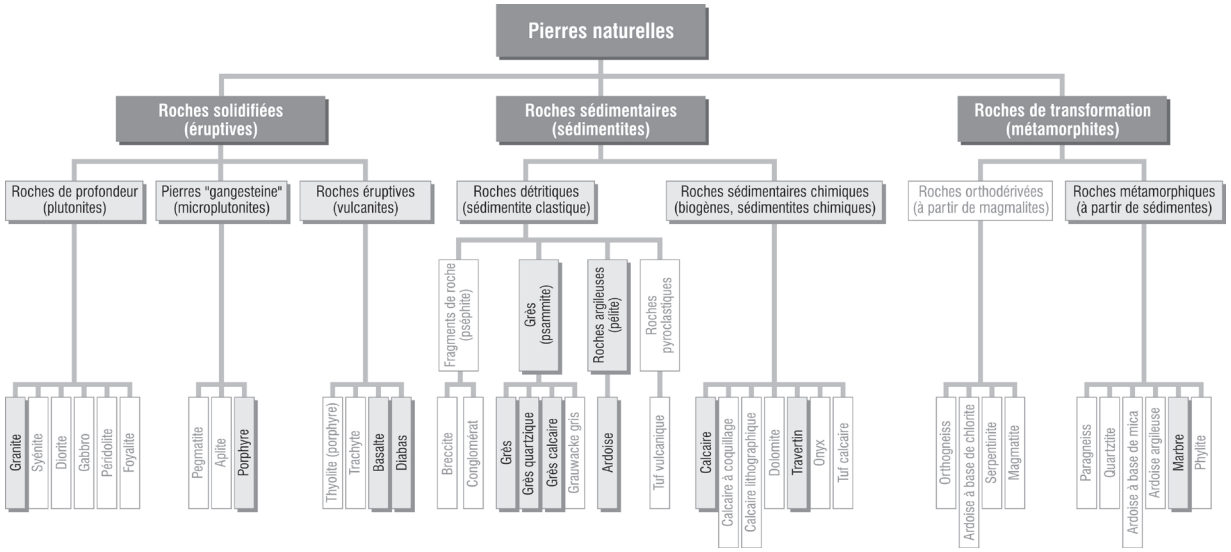


Illustration AN.13: Descriptif des différentes roches et pierres naturelles



Illustration AN.14 : Mise en œuvre de pierres naturelles

«Gravé dans la pierre, notre passé surgit parfois au détour d'un bâtiment habité de murmures des tailleurs de pierre.Matériau de la mémoire - du temps des cathédrales et des folles édifications vers les cieux, support fidèle des mégalomanies architecturales, la pierre dure, promet la prospérité...»
Source: [KULA 2009]

Avec l'argile et le bois, la pierre naturelle compte parmi les premiers matériaux de construction.
La pierre naturelle est issue de roches, matières inorganiques et non renouvelables dont la présence ou la quantité disponible sur la croûte terrestre varie fortement selon le type.
Chaque sorte de pierre possède son caractère propre défini par sa couleur ou teinte, sa porosité, sa veinure… Ce caractère peut être renforcé ou atténué par le traitement de surface (polissage, sablage, meulage…), mais également par l'altération sous l'effet du climat.
Au toucher, la pierre naturelle absorbe la chaleur du corps ; elle est perçue comme une matière froide, dure, solide et authentique.
La pierre symbolise la force, la stabilité, la puissance et la tradition. La pierre est également associée à un lieu ou une région.

2.1. Le secteur de la pierre naturelle en Belgique[1]

L'extraction des matériaux du sous-sol a depuis longtemps représenté un aspect important de l'activité de la Wallonie dont la richesse passée a été fondée sur les mines de houille et les mines de minerais.
L'extraction de pierres ornementales reste l'une des grandes activités économiques de la Wallonie.
Du sous-sol wallon sont extraits:

- les calcaires et les craies qui alimentent les industries du ciment et de la chaux;
- les calcaires et les schistes qui fournissent la grande majorité des pierres de taille et des pierres ornementales;
- les dolomies crues ou cuites pour l'industrie sidérurgique, chimique ainsi que la verrerie;
- le porphyre sous forme de concassés pour divers usages;
- les sables, le silex, les grès
- les argiles pour la fabrication des produits en terre cuite

Les pierres calcaires belges

On dénombre plusieurs pierres calcaires en Belgique:

- la pierre bleue de Belgique, aussi appelée petit granit, est la pierre belge la plus connue. Extraite dans une dizaine de carrières en Wallonie, elle se caractérise par la présence de petits fossiles appelés 'crinoïdes'. Grâce à ses différentes finitions possibles, la pierre bleue se pose en intérieur comme en extérieur;
- les calcaires de Meuse dont la vallée a toujours été une zone de prédilection pour l'extraction de la pierre calcaire. Deux carrières de calcaire de Meuse sont encore en activité: la carrière de Vinalmont et celle de Longpré;
- la pierre de Tournai, qui fut, au Moyen-Âge, une des premières pierres calcaires a être exploitée comme pierre de taille et de sculpture;
- les marbres noirs de Dinant et Golzinne;
- les calcaires gréseux de Gobertange et Fontenoille, pierres calcaires à teintes claires.

Les pierres siliceuses belges

Grâce notamment à ses qualités antidérapantes, le grès du Condroz est souvent utilisé pour réaliser des pavages et des revêtements de sol.
Le grès schisteux est une pierre typique des Ardennes et de la région de Malmédy. Ses aspects esthétiques sont très variables, de même que sa palette de couleurs, qui va du gris au brun en passant par le bleu gris ou le rouille. Ses possibilités sont donc nombreuses. Les schistes, enfin, conviennent très bien pour la maçonnerie de moellons ainsi que pour l'aménagement des jardins. Mais on les retrouve aussi sous forme de pavements et d'applications intérieures diverses.

2.2. Origine et groupes de roches

D'après les connaissances scientifiques actuelles sur



Illustration AN.15: Mise en oeuvre de moellons en pierre



Illustration AN.16: Revêtement de sol en pierre - Malmö
Photo: C.Massart

1 Source: [CNUDDE 1990]

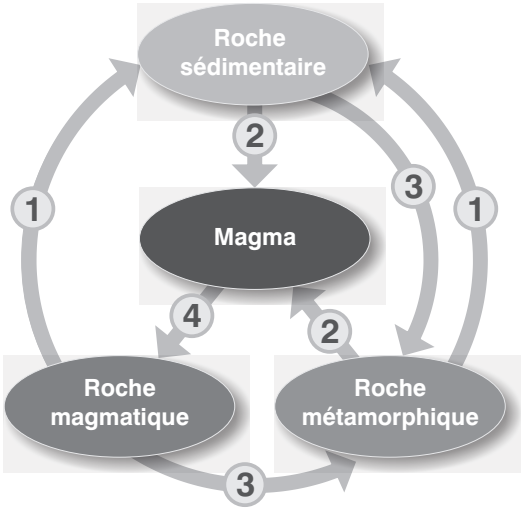


Illustration AN.17 : Schéma de formation des roches

la formation de la Terre, celle-ci se serait formée, il y a environ 4,5 milliards d'années, à partir d'une nébuleuse solaire, masse de poussières et de gaz en forme de disque. De l'état gazeux, cette masse est passée à l'état de fusion puis, en refroidissant, une première couche s'est formée à 1000° - 1500 °C à la surface de la Terre sous forme d'une croûte solide. Les roches sont nées de la cristallisation de ce magma liquide. Elles se composent d'un mélange de plusieurs minéraux, essentiellement des silicates (97 % de la croûte terrestre).

C'est ici qu'il faut faire la distinction entre le terme «roche » et le terme « pierre naturelle ». Le terme « roche» désigne tout matériau constitutif de l'écorce terrestre entrant dans la composition du sous-sol et formé par un assemblage de minéraux.

Le terme «roche» s'oppose à ce qui est végétal ou animal. Le terme « pierre naturelle » désigne un morceau de roche extrait du sol ou du sous-sol, ayant subi une ou des transformations (taille, finition…) pour un usage défini.

On peut classer les pierres naturelles suivant leur dénomination scientifique ou leur dénomination commerciale.

La dénomination scientifique est décrite dans les normes européennes NBN EN 12 407 et NBN EN 12 670. Ces normes présentent l'inconvénient qu'elles ne sont pratiquement compréhensibles que pour les géologues et les pétrographes, mais la dénomination scientifique donne directement une indication des propriétés et de la composition de la pierre naturelle.

À côté de son nom scientifique,une pierre naturelle possède également une dénomination commerciale. Cette dernière n'a parfois rien à voir avec les propriétés et la composition de la pierre.

La norme européenne NBN EN 12 440 détermine les noms commerciaux officiels et les noms scientifiques de près de 2.400 pierres naturelles européennes, les noms commerciaux faisant clairement référence à la région d'extraction. Les dénominations commerciales des pierres naturelles non européennes ne sont pas normalisées.

La classification scientifique distingue trois groupes de pierres naturelles: les roches magmatiques, les roches sédimentaires et les roches métamorphiques.

Roches magmatiques (ou ignées)

Les roches magmatiques ou roches ignées sont le fruit de la solidification d'une roche liquide (la lave) à l'intérieur ou à la surface de la croûte terrestre. Selon l'endroit où elles se solidifient, on distingue trois sortes de roches:

- les roches volcaniques effusives;
- les roches semi-intrusives;
- les roches intrusives ou plutoniques.

La classification des roches magmatiques est basée sur différents critères, comme leur mode de formation qui détermine la texture et leur composition minéralogique et/ou chimique qui détermine la présence de cristaux.

Généralement ces pierres naturelles sont dures, résistantes aux acides, au gel et à l'usure, etc.

Les roches volcaniques effusives se sont solidifiées à la surface terrestre, par exemple après une éruption volcanique. Il en résulte des pierres naturelles qui ne contiennent presque pas de minéraux visibles (texture microgrenue). L'aspect et la composition des roches volcaniques effusives sont généralement uniformes. C'est à ce groupe qu'appartiennent, par exemple, les basaltes.

Les roches intrusives ou plutoniques se sont refroidies progressivement et se sont formées à une pression constante élevée dans la profondeur de la croûte terrestre. Il en résulte des roches grenues, contenant des cristaux nettement observables. L'aspect et la composition des roches plutoniques sont réguliers, mais les pierres peuvent différer fortement les unes des autres. Les granites en sont des exemples.

Les roches porphyriques ou semi-intrusives, enfin, se sont formées par solidification dans des failles de la croûte terrestre. Le processus endogène s'est déroulé plus rapidement que pour les roches plutoniques. Il en résulte des roches plus ou moins grenues, d'aspect et composition réguliers, mais les pierres peuvent présenter un aspect très différent. Comme exemples, on peut ici citer la diabase et le porphyre.

Roches sédimentaires

Les roches sédimentaires se sont formées par sédimentation ou dépôt de matériaux entraînés par les eaux à la surface de la Terre. Ce sont des roches exogènes, c'est-à-dire qui se forment à la surface de la Terre,à partir de l'altération météorique de roches magmatiques, métamorphiques ou sédimentaires préexistantes.

Les dépôts sédimentaires, meubles à l'origine, se sont souvent consolidés par cimentation des grains sous

l'influence de divers facteurs.
La caractéristique principale des roches sédimentaires est de se déposer en général sous forme de couches parallèles dont l'épaisseur et la composition peuvent varier.
La stratification est mise en évidence par les différences de couleur, de composition, de granulométrie et de texture. Parmi les roches sédimentaires, on distingue :
• les roches détritiques;
• les roches physico-chimiques ou biogènes.
Les roches détritiques résultent de l'accumulation de détritus de roches arrachés à la surface de la Terre. Ce sont, par exemple, les grès et certains calcaires.
Les roches physico-chimiques ou biogènes sont formées essentiellement par dépôt de minuscules particules d'eau saturée. Les calcaires, comme le travertin, sont formés, par exemple, par précipitation du calcaire dissous dans une eau saturée de ce minéral.

Roches métamorphiques

Les roches métamorphiques se forment par la transformation de roches sédimentaires, d'autres roches métamorphiques ou de roches magmatiques selon un processus endogène qui consiste à modifier les propriétés d'une roche existante dans sa structure, dans sa texture ou dans sa composition lorsque celle-ci est soumise à des conditions physico-chimiques (forte pression, température élevée ou influence chimique) différentes de celles de sa formation initiale.
Il en résulte un réajustement physico-chimique des éléments, qui entraîne parfois une variation importante de leur composition minéralogique (apparition de nouveaux minéraux) et de leur aspect (texture et structure particulières). Comme exemples de roches métamorphiques,
on peut citer le gneiss (transformation d'un granite), le quartzite (transformation d'un grès) et le marbre (transformation d'un calcaire).

Les roches de transformation (ou métamorphites). Ces roches peuvent êtres classées en deux sous-groupes selon la roche d'origine : les roches orthodérivées qui se forment à partir de roches magnatites et les roches pararoches qui se forment à partir de roches sédimentaires.

Généralement, la dénomination commerciale n'est plus basée sur la formation, la texture et la minéralogie, mais on classifie les pierres naturelles en quelques grands groupes tels que les marbres, les granites,... qui n'ont parfois rien à voir avec l'appellation scientifique marbre ou granite. De ce fait, la relation directe entre le nom et les propriétés de la pierre a souvent disparu de la dénomination commerciale.

2.3. La pierre naturelle en tant que matériau de construction

La diversité des gisements et des dénominations de pierre naturelle est impressionnante : le marché international couvre plus de 5000 variétés de pierres ; en Europe centrale, on dénombre plus de 500 variétés. Comme chaque pierre naturelle possède des particularités et des spécificités propres, les possibilités d'emploi ou d'usage sont presque illimitées.

Caractéristiques et propriétés des pierres naturelles

Il existe, au niveau tant national qu'international, différents essais normalisés destinés à tester des propriétés spécifiques de la pierre naturelle. Voici les normes principales et les plus appliquées:
- NBN EN 1925: coefficient d'absorption d'eau par capillarité;
- NBN EN 1926: résistance à la compression;
- NBN EN 1936: masses volumiques réelles et apparentes et porosités ouvertes et totales;
- NBN EN 12 371: résistance au gel;
- NBN EN 12 372: résistance à la flexion sous charge centrée;
- NBN EN 14 231: résistance à la glissance;
- NBN EN 14 066: résistance au vieillissement;
- NBN EN 14 157: résistance à l'usure;
- NBN EN 1341: dalles de pierre naturelle pour pavage extérieur (exigences et méthodes d'essai);
- NBN EN 1342: pavés de pierre naturelle pour pavage extérieur (exigences et méthodes d'essai);
- NBN EN 1343: bordures de pierre naturelle pour pavage extérieur (exigences et méthodes d'essai);

La pierre naturelle constitue un matériau qui, judicieusement choisi, peut avoir des usages multiples. Étant donné que ceux-ci impliquent des sollicitations différentes, on distingue généralement les domaines d'utilisation suivants : revêtement de sol extérieur, revêtement de sol intérieur, élément en contact avec le sol, revêtement massif ou mince de façade, revêtement de mur intérieur, maçonnerie massive…
Un ensemble d'essais sont nécessaires pour évaluer l'aptitude d'une pierre à être employée durablement dans chacun des usages potentiels. En termes d'essai, on distingue :
• les essais de « caractérisation » qui permettent de déterminer les caractéristiques intrinsèques du matériau, indépendamment de sa transformation en produit fini et de l'environnement dans lequel il sera mis en œuvre;
• les essais de « la performance en usage » qui évaluent les performances du produit fini une fois mis en œuvre ;
• les essais de « durabilité » qui visent à analyser le comportement de la pierre dans le temps et permettent dès lors d'évaluer la stabilité des caractéristiques intrinsèques et des performances initiales au fil du temps.

Le tableau A3.04 ci-contre reprend les différents usages des pierres et les essais caractéristiques liés à ces usages.

Les essais de caractérisation sont les suivants :

• Analyse pétrographique

L'analyse pétrographique permet de déterminer la composition minéralogique de la pierre naturelle ainsi que son appartenance à une famille géologique. L'analyse pétrographique permet également d'obtenir des informations très utiles concernant les possibles altérations d'une pierre après sa mise en œuvre (microfissuration, formation de minéraux expansifs, oxydation de minéraux métalliques...).

• Masse volumique apparente

Caractéristique habituellement mesurée pour les pierres, la masse volumique apparente reflète le degré de compacité du matériau et permet d'évaluer la masse pour un volume donné. Elle s'exprime en kg/m^3 et varie approximativement de 1500 à 3000 kg/m^3.

• Porosité ouverte

La porosité ouverte est déterminée par la proportion de vides (ou de pores) dans la pierre, reliés entre eux et donc accessibles à l'eau. Généralement exprimée par un pourcentage en volume (vol %), elle représente le volume des pores ouverts par rapport au volume total de la pierre. Elle varie d'une valeur presque nulle (pour des granits très compacts, par exemple) à des valeurs proches de 50 % (pour des calcaires très tendres).

• Absorption d'eau

L'absorption d'eau reflète la capacité d'une pierre à capter de l'eau dans son réseau de pores par effet de capillarité. Cette caractéristique est à considérer pour les usages où les éléments en pierre sont susceptibles d'entrer en contact avec l'eau. C'est bien sûr le cas de toutes les applications extérieures, mais également pour des usages intérieurs tels que des revêtements du sol et des murs de salles de bain, aux plans de travail de cuisine ou tout simplement aux dallages entretenus à l'eau.

L'absorption d'eau peut être déterminée de deux façons différentes : par capillarité ou par immersion sous pres-

Tableau AN.04 : Les différents usages du matériau pierre et les essais spécifiques à l'usage

Usage	Applications	Essais de caractérisation	Essai de performance à l'usage	Essai de durabilité
Pavage et revêtements de sol extérieurs à usage privatif ou collectif intense ou normal	Pavés , bordures et dalles de trottoir	- analyse pétrographique - masse volumique apparente - porosité ouverte - absorption d'eau - résistance à la compression - résistance à la flexion - module d'élasticité dynamique - vitesse de propagation du son - coefficient de dilatation thermique	- sensibilité au tachage - résistance aux chocs mécaniques - résistance au glissement	- résistance au gel - résistance à l'usure - résistance au vieillissement sous l'action du dioxyde de soufre
Éléments en contact avec le sol	Soubassements, socles		/	- résistance au gel - résistance au vieillissement sous l'action du dioxyde de soufre
Parties en élévation non verticale	Couvre-murs, corniches, seuils		/	- résistance au gel - résistance au vieillissement sous l'action du dioxyde de soufre
Murs de façade massifs (non ventilés)	Moellons et blocs de maçonnerie		/	- résistance au gel - résistance au vieillissement sous l'action du dioxyde de soufre
Revêtements minces de façades (ventilés)	Plaques agrafées		- résistance aux ancrages	- résistance au gel - résistance aux chocs thermiques - résistance au vieillissement sous l'action du dioxyde de soufre
Revêtements de sol intérieurs à usage privatif ou collectif intense ou normal	Dalles, plaques modulaires		- sensibilité aux taches - résistance aux chocs mécaniques - résistance au glissement	- résistance à l'usure
Revêtements de mur	Plaques modulaires		/	/
Maçonneries massives intérieures	Moellons ou blocs		/	/
Tablettes	Tablette de fenêtre, tablette décorative (cuisine, salle de bain)		- sensibilité aux taches	/

sion atmosphérique.

• Résistance à la compression

La résistance à la compression permet de déterminer le niveau de sollicitation admissible en compression pour une pierre dans un ouvrage, compte tenu de coefficients de sécurité adaptés. La connaissance de cette caractéristique est indispensable pour des applications structurelles où la pierre sera utilisée dans des éléments porteurs, ce qui n'est pas le cas de la plupart des usages courants de la pierre ornementale.

• Résistance à la flexion

La résistance à la flexion permet de déterminer le niveau de sollicitation admissible en flexion pour une pierre dans un ouvrage, compte tenu de coefficients de sécurité adaptés. La connaissance de cette caractéristique est indispensable pour des applications structurelles où la pierre sera sollicitée en flexion, ce qui n'est pas le cas de la plupart des applications courantes de la pierre ornementale.

• Module d'élasticité dynamique

Le module d'élasticité d'un matériau caractérise l'état de contrainte engendré au sein de celui-ci en fonction de la charge appliquée. Il peut être calculé soit par des mesures de déformation lors d'un essai de mise en charge (dans ce cas, il s'agit d'un module d'élasticité statique), soit par la mesure de la réponse du matériau à des excitations vibratoires. Dans ce cas, le module d'élasticité est qualifié de « dynamique » et est calculé sur la base de la fréquence de résonance, ce qui présente l'avantage d'être une mesure non destructive.

• Vitesse de propagation du son.

La vitesse de propagation du son dans une pierre naturelle dépend de la compacité du matériau, mais aussi de sa teneur en eau, de sa minéralogie, de son état de fissuration, de la présence de certains sels...

• Coefficient de dilatation thermique

Comme tout matériau, la pierre naturelle est sujette à des variations dimensionnelles sous l'effet de la température.

Le coefficient de dilatation thermique caractérise cette déformation et s'exprime en millimètres par mètre et par degré Kelvin (mm/mK). Selon le type de pierre, il peut varier de 1.10-3 à 16.10-3 mm/mK.

Ces variations dimensionnelles sont à prendre en considération lorsque les éléments en pierre sont susceptibles d'être soumis à de grands écarts de température : revêtements de façade et dallages extérieurs, encadrements de feux ouverts...

Les essais déterminant la performance à l'usage sont les suivants :

• Résistance aux ancrages

Cet essai concerne uniquement les revêtements minces de façade « agrafés ». Il permet de déterminer la force qui, appliquée perpendiculairement au goujon, provoquera la rupture de la pierre par éclatement. Cette force dépend bien évidemment de la nature de la pierre, mais aussi de l'épaisseur de la plaque et de la position du goujon dans celle-ci.

• Énergie de rupture

Cet essai permet de déterminer l'amplitude de l'impact qu'un élément en pierre peut supporter avant rupture. Il s'agit d'une caractéristique importante pour les applications telles que les revêtements de sol, mais aussi les premiers niveaux des revêtements de façade.

• Sensibilité aux taches

On distingue le tachage dit interne, dû à la réaction de certains constituants de la pierre (éventuellement avec le produit de pose), du tachage externe, provoqué par un contact avec un produit potentiellement tachant pour la pierre.

• Résistance au glissement

La résistance au glissement des matériaux de revête-



Illustration AN.18: Variété de pierres: pierre bleue belge, , marbre rouge, granit, marbre blanc...

ment du sol représente une caractéristique essentielle pour la sécurité en usage : de nombreuses chutes provoquées par un sol trop glissant constituent en effet une des causes principales d'accidents de travail.
La glissance d'un sol en usage dépend non seulement des caractéristiques initiales de la surface des matériaux, mais aussi de la façon dont le matériau évolue dans le temps (usure, patine...) et est entretenu.
Les essais de durabilité sont les suivants :

• Résistance au gel (gélivité)

La résistance au gel constitue certainement la caractéristique de durabilité essentielle pour les ouvrages extérieurs. En effet, une mauvaise sélection de la pierre à cet égard entraîne une altération rapide et, le plus souvent, le remplacement des éléments affectés.

• Résistance à l'usure

Cette caractéristique doit être testée uniquement pour les revêtements de sol. Elle permet de déterminer le comportement d'une pierre naturelle vis-à-vis de l'abrasion mécanique provoquée par le frottement de fines particules. Un revêtement de sol incorrectement choisi quant à sa résistance à l'usure verra son état de surface évoluer rapidement aux endroits de passage les plus sollicités : perte de brillance, modification de la couleur, perte d'épaisseur...

• Résistance aux chocs thermique

L'essai de résistance aux chocs thermiques reproduit les tensions résultant des changements brusques de température qu'une pierre peut subir lorsqu'elle est soumise à un environnement extérieur fortement ensoleillé et exposé aux pluies. Certaines applications intérieures, comme les plans de travail des cuisines, contact avec des surfaces très chaudes, peuvent également subir de brusques variations de température.

Propriétés environnementales et sanitaires

Les propriétés environnementales de la pierre naturelle sont les suivantes:

- la pierre naturelle est une matière naturelle inorganique, présente selon la variété en quantités plus ou moins importantes, voir quasi illimitée dans certains cas;
- la pierre naturelle est un matériau local ou régional. Pour exemple, aujourd'hui, rien qu'en Wallonie, on dénombre environ 40 carrières de pierres ornementales en activité. Leur production couvre une quinzaine de types de roches de textures et de natures différentes;
- la pierre naturelle est un matériau peu ou pas transformé qui subit juste une découpe et un traitement de surface après son extraction. Son extraction et son façonnage sont des processus peu consommateurs d'énergie et peu polluants;
- la pierre naturelle est un matériau de grande longévité (> 100 ans), qui peut être réutilisé et/ou recyclé plusieurs fois. La pierre naturelle peut, en outre, être valorisée tout au long de son cycle de vie depuis l'extraction jusqu'à la déconstruction du bâtiment dans lequel elle a été mise en œuvre;
- une fois mise en œuvre, la pierre naturelle est un matériau qui ne demande pas d'entretien (ou peu).

La pierre naturelle est un matériau favorisant un climat intérieur sain pour les raisons suivantes:

- la pierre naturelle est un matériau inorganique et inerte, elle n'émet pas de substances toxiques pour l'environnement et l'être humain;
- la pierre en tant que matériau massif et inerte a une influence positive sur l'atmosphère intérieure. La pierre naturelle est un matériau massif et dense à grande inertie. Son usage en tant que revêtement de sol intérieur permet de réguler la température ambiante en été comme en hiver et d'ainsi améliorer le confort thermique.

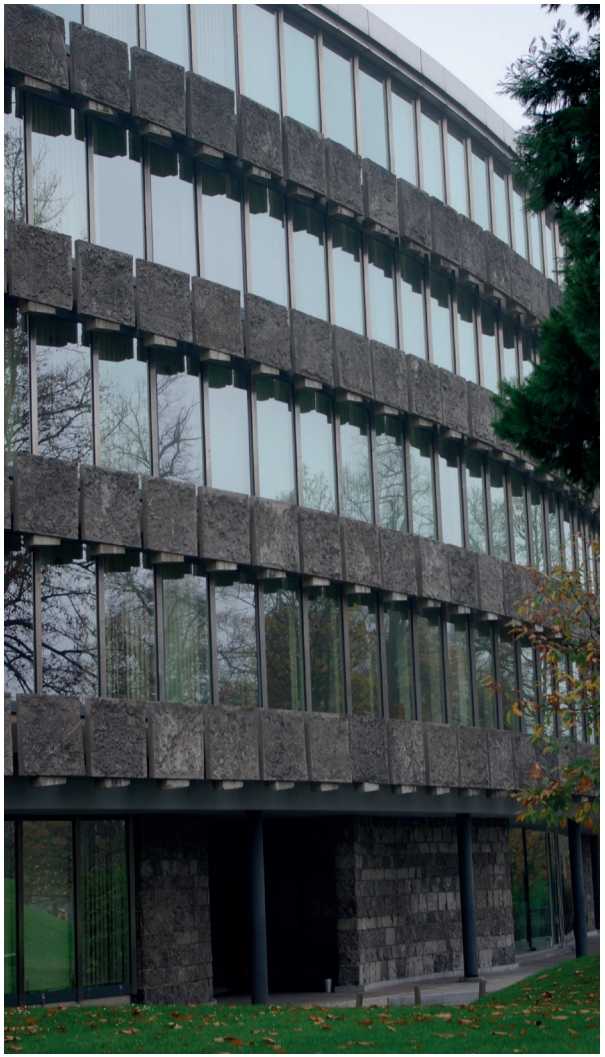


Illustration AN.19: Pierre bleue belge - Bâtiment Glaverbel à Bruxelles, Architectes: Braem, Jacqmain, Guilissen et Mulpas

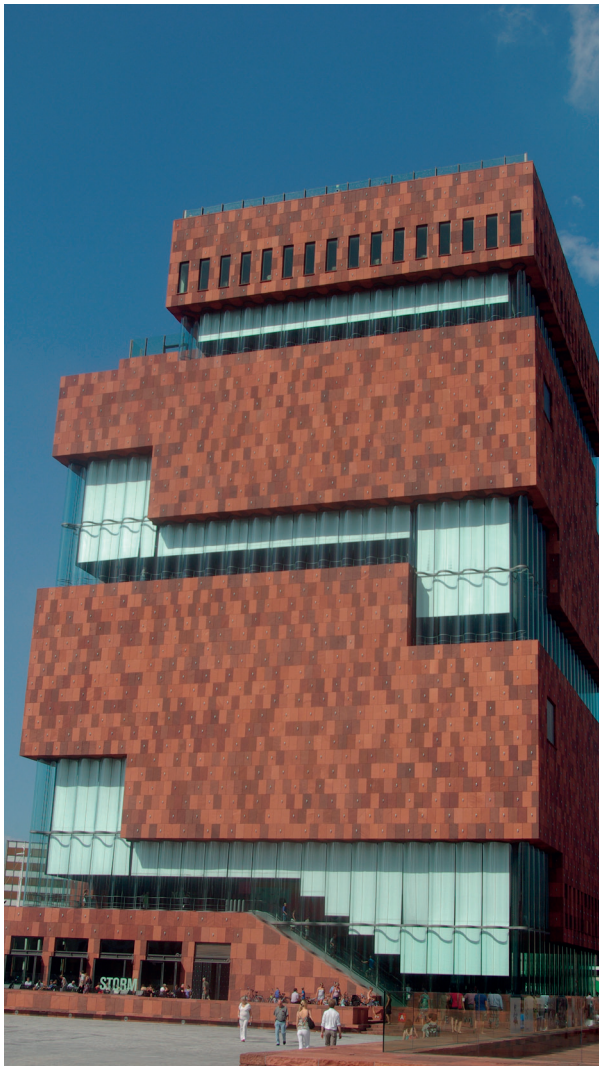


Illustration AN.20: Pierre de sable rouge clivée, Museum aan de Stroom, Anvers, Architectes : Neutelings-Riedijk

2.4. Variétés de roches et particularités constructives de celles-ci

Si, aujourd'hui, il est loisible d'obtenir sur chantier des pierres naturelles extraites à l'autre du bout du monde (Chine, Brésil, Scandinavie, Inde, Vietnam, etc.), il faut cependant rappeler que la pierre naturelle est un matériau local ou régional, qui établit un lien étroit et significatif avec la région d'extraction. Ainsi notre patrimoine wallon est caractérisé par l'utilisation importante de pierre bleue belge, de pierres calcaires, de schistes et d'ardoises naturelles provenant de carrières locales.
Des villes comme Londres ou Paris sont également marquées par l'utilisation d'une pierre régionale.
Ce lien étroit entre la matière et le lieu est à prendre en considération tant d'un point de vue technique qu'environnemental. Les pierres provenant du sous-sol de nos régions correspondent parfaitement au climat de celles-ci et peuvent pour la plupart être utilisées en extérieur comme en intérieur.
L'utilisation de pierres naturelles locales permet également d'encourager une économie locale tout en respectant la valeur ajoutée par l'homme et son travail, de préserver les droits sociaux des travailleurs (ce qui n'est pas toujours le cas dans certains pays), de préserver les ressources naturelles, de respecter l'environnement immédiat (permis d'environnement strict) et de limiter l'impact environnemental du transport.

Granit

Le granit est une roche appartenant aux roches plutoniques (roches éruptives ou magmatiques). Le granit est considéré comme la pierre naturelle de construction la plus résistante utilisée dans le bâtiment : résiste aux intempéries, au gel et à la pollution atmosphérique.
Le granit se compose essentiellement de feldspath (détermine la couleur), de quartz (responsable de la forte dureté minérale) et de mica. Ses possibilités de mise en œuvre sont nombreuses et il possède un large spectre de coloris : rouge, rose, jaune, gris…

Grès

Les grès font partie des roches sédimentaires et se composent principalement de particules ou grains de quartz et d'un liant de cimentation. Les grès présentent souvent une texture rubanée à gros grains et existent sous de nombreux coloris : rouge, jaune, brun, vert…
C'est le liant (quartz, calcite, argile…) qui va déterminer en premier lieu la dureté, la capillarité et le comportement au gel. Le grès est une pierre réputée pour sa facilité à être travaillée et a été largement utilisé dans les constructions historiques et patrimoine ancien. Le grès a une résistance plus faible que le granit, notamment à l'abrasion (se prête moins facilement au polissage). Son fort taux d'absorption d'eau induit une résistance limitée au gel, aux intempéries et à la pollution atmosphérique.

Calcaire

Le calcaire est une roche sédimentaire qui s'est formée à l'origine dans l'eau, comme le montrent les fossiles contenus dans la roche, et au cours des différentes périodes géologiques. Le calcaire se compose essentiellement de carbonate de calcium. Il se présente sous des teintes jaunâtre, brune, grise, rouge ou blanche. Sa texture contient souvent des fossiles. Le calcaire est sensible aux agressions chimiques

Ardoise ou schiste argileux

Le schiste argileux ou ardoise est une roche métamorphique qui possède une structure feuilletée parallèle. C'est une roche à grain très fin et dense, présentant un faible taux d'absorption d'humidité et de bonnes propriétés de clivage. L'ardoise se présente sous des teintes allant de gris sombre à noir.
La facilité avec laquelle on peut fendre cette pierre a permis depuis des siècles la fabrication de plaques minces de 5 à 7 mm et l'utilisation d'ardoises pour des habillages de façades, des couvertures de toitures et des revêtements de sol.

Marbre

Le marbre est une roche métamorphique qui se forme

par la métamorphose de roches sédimentaires calcaires. Le marbre « pur » est blanc, cristallin et ne contient pas de fossiles. Cependant, on dénombre énormément de teintes et de surfaces différentes allant du rouge, rouge/brun, gris/bleu, vert au gris sombre et noir.
Sous la lumière, en faible épaisseur, les surfaces cristallines scintillent et laissent passer la lumière.
Le marbre est utilisé essentiellement dans la construction sous forme de revêtement de sol et de façades. Il est également souvent utilisé comme pierre d'ornementation et en sculpture.

2.5. L'exploitation des pierres naturelles

L'exploitation de la pierre comprend différentes phases: l'extraction, la taille ou le façonnage et la finition. L'exploitation des pierres naturelles se fait essentiellement dans des carrières à ciel ouvert ; seules quelques variétés de marbres, d'ardoises et de pierres calcaires sont extraites de mines.
Au début de toute nouvelle exploitation de nouveaux gisements, on analyse la viabilité économique et les propriétés physiques de la roche, notamment par des percements en profondeur ou des mesures par ultrasons.
L'objectif de l'exploitation est l'extraction de blocs «bruts» presque orthogonaux avec le moins de déchets possible. Les couches supérieures aux couches de roches utilisables sont également exploitées par d'autres entreprises, en particulier les cimentiers qui récupèrent les gravats.
Après avoir été découverts, les blocs sont séparés à l'aide d'explosifs, par clivage (coins), par sciage (havage, découpe au fil) ou par des procédés thermiques. Les blocs extraits pèsent souvent de 10 à 20 tonnes (10 m^3). Leur transport requiert des moyens hydrauliques, des grues, bulldozers, pelleteuses et camions de tonnage exceptionnel.
Toutes les pierres naturelles se taillent, se façonnent et les processus de production d'un moellon, d'un pavé, d'une pierre de taille ou d'une ardoise font appel à différents travaux de taille et de finition. Traditionnellement la taille recouvre non seulement un travail destiné à structurer la pierre en lui donnant sa forme et ses dimensions définitives, mais aussi les différents aspects de surface que ce travail confère à la pierre .
Le façonnage consiste en l'équarrissage, au clivage et/ou au sciage puis au profilage de la pierre. L'équarrissage a lieu sur le site d'extraction.
Le clivage mécanique réalisé à la cliveuse hydraulique permet la refente de tranches de pierres d'une épaisseur allant de 5 cm à 20 cm. L'aspect obtenu est l'aspect naturel de la pierre ; surface à gros éclats avec des bosses et des creux répartis irrégulièrement. Le processus de clivage est utilisé pour la production de moellons notamment.
Par sciage, les blocs sont transformés en produits semi-finis appelés tranches. Le sciage dépend du matériel disponible sur le site ou en atelier. On utilise des châssis à lames coupant simultanément le bloc en tranches et/ou des disques à tronçonner.
Les châssis composés de lames diamantées scient les blocs en tranches fines de 2 à 10 cm. Le grand disque diamanté scie les blocs en tranches épaisses de plus de 10 cm. Les tranches sont ensuite mesurées, classées et triées. Ce triage classifie la production en différents choix.
Les tranches sont débitées sur une chaîne automatisée. Elles sont d'abord sciées en bandes et ensuite perpendiculairement pour obtenir du dallage. Les produits obtenus subissent un traitement de surface selon différentes finitions

2.6. Traitement de surface de la pierre naturelle

Outre les propriétés des différentes variétés de pierre naturelle proprement dites, les traitements de surface influencent aussi fortement l'aspect de la pierre. La couleur de la surface peut varier d'après la finition choi-



Illustration AN.21: Carrière de Pierre bleue belge



Illustration AN.22: Carrière de Pierre bleue belge



Illustration AN.23: Rebuts de carrière de Pierre bleue belge

sie. En général, le polissage rendra les couleurs plus intenses et plus foncées, tandis que le flammage aura un effet adoucissant sur la palette des couleurs. Le choix d'un traitement de surface dépend dans une large mesure de la nature du matériau et de l'utilisation visée. Voici ci-dessous quelques traitements de finition dont les descriptions ont été reprises du vade-mecum de la fédération Febenat[2] :

- Pierre brute : laissées à leur état naturel, les surfaces d'une pierre peuvent, avant tout, ne pas subir de finition particulière.
- Pierre polie: la surface est hautement brillante. Les veines, les taches blanches, la nature et la structure des fossiles sont visibles. Les couleurs, elles aussi, sont renforcées.
- Pierre adoucie : la surface mate et lisse se caractérise par un léger reflet. Il n'y a presque pas de rainures visibles.
- Pierre meulée : la surface est lisse avec des rayures circulaires.
- Pierre sciée : la surface présente des traits de sciage, de petites rides, des rayures. Selon la technique de sciage utilisée, les traces peuvent être parallèles ou circulaires.
- Pierre flammée: un choc thermique provoque l'écartement de grains superficiels, ce qui résulte en une texture rugueuse. Ce sont surtout les pierres naturelles dures qui sont flammées.
- Pierre martelée: un marteau mécanique laisse de petits trous en surface. L'aspect varie selon la taille du marteau et le nombre de pointes sur le marteau.
- Pierre sablée: les grains de sable confèrent à la pierre un aspect rugueux, mais fin.
- Pierre clivée: par clivage manuel ou mécanique, on obtient un moellon et l'aspect originel de la pierre se dévoile. La surface se caractérise par des écailles, des cavités et des bosses disséminées irrégulièrement.
- Pierre givrée: cette finition s'effectue à l'aide de 5 ciseaux tournants sur eux-mêmes et sur la tranche. La surface rugueuse ressemble aux fleurs de givre.
- Pierre bouchardée: une 'multifraise' donne au bouchardage mécanique un profil plat typique. Les rainures sont toujours parallèles et la distance entre les rainures reste également inchangée.
- Pierre bouchardée à l'ancienne: de courtes rayures interrompues, parcourant généralement les tranches dans le sens diagonal, créent une surface rugueuse et décorative.
- Pierre polie au tambour: les carreaux sciés sur mesure sont placés dans un tambour, de telle sorte que leurs bords prennent un aspect vieilli.
- Pierre brossée: la surface originelle (flammée, sablée, adoucie, meulée,etc.) est adoucie à l'aide de brosses abrasives, ce qui met mieux en valeur les couleurs de la pierre naturelle.
- Pierre piquée: travaillée au burin pointu
- Pierre rainurée: traits taillés à la goupille, le plus souvent sur des surfaces clivées
- Pierre sclypée: rainures machinales avec des écarts rugueux. En cas de bandes plus larges, on parlera de finition ciselée.

2.7. Produits de construction en pierre naturelle

La pierre naturelle est majoritairement utilisée dans le secteur de la construction.
Des différents types de pierres, selon l'usage prévu, on fabrique :

- des moellons à maçonner ;
- des plaques de parement pour les façades, le plus souvent suspendues ;
- des revêtements de toitures (ardoises) ,
- des éléments de façade taillés : tablettes de fenêtre, couvre-murs, encadrements de baie, bandeaux hori-

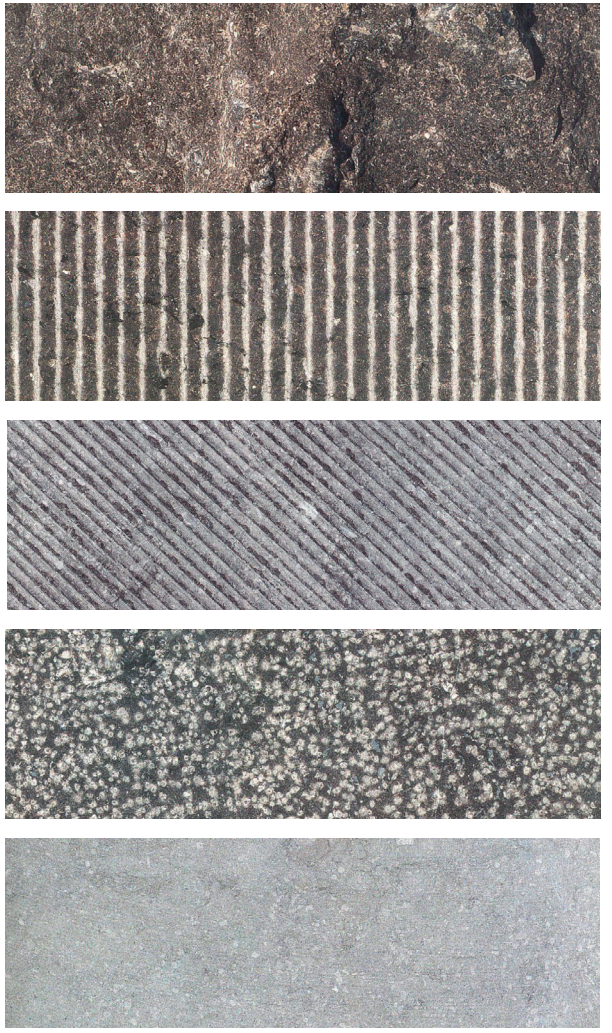


Illustration AN.24: Finitions de la Pierre bleue belge

2 FEBENAT :Fédération des grossistes belges en pierre naturelle www.febenat.be

zontaux dans les façades ;
- des éléments de revêtement et mobilier urbain;
- des revêtements de sols intérieurs
- des éléments architecturaux pour la restauration de bâtiments anciens ;
- des éléments décoratifs ou mobiliers (cuisine, salle de bain…)

Les pierres sont également utilisées en tant que granulats plus ou moins fins – pour composer des bétons, des mortiers, des pierres reconstituées…
On retrouve également des granulats très fins (poudre fine) en charges dans des plastiques et des roches volcaniques sous forme d'isolant thermique en laine de roche.
D'autres pierres, comme les marbres, sont utilisées pour la sculpture et l'ornementation (cheminées, colonnes,etc.).

2.8. Mise en œuvre et aspects techniques

Mise en œuvre des pierres naturelles en maçonnerie

Les pierres naturelles, schistes, grès ou autres peuvent être mises en œuvre sous forme de maçonnerie.
On peut employer des moellons tout-venant ou équarris une face, ou clivés.
Plus les moellons sont bruts, plus la maçonnerie est épaisse (40 cm) et difficile à mettre en œuvre.
Pour les faces où les moellons sont appareillés, il faut dessiner toutes les pierres et les faire tailler à mesure et les numéroter.
La pose se fait au mortier avec des calages de coins en bois.

Mise en œuvre en parement ou en revêtement de sol

La pierre naturelle préparée sous forme de dalles peut servir de revêtement de façade ou de revêtement de sol (extérieur ou intérieur selon le type de pierre).
En revêtement de façade, les pierres en plaques de 2 à 4 cm sont accrochées avec des fixations en acier inoxydable.
Les revêtements de sols intérieurs sont réalisés à partir de pavés, de carreaux ou de dalles. Ils sont en général placés sur un lit de sable sur chape de propreté.



Illustration AN.25: Aménagement extérieur en pierre bleue belge
Architecte: Archi4you



Illustration AN.26: Mur de façade en moellons

3. Les matériaux en terre crue

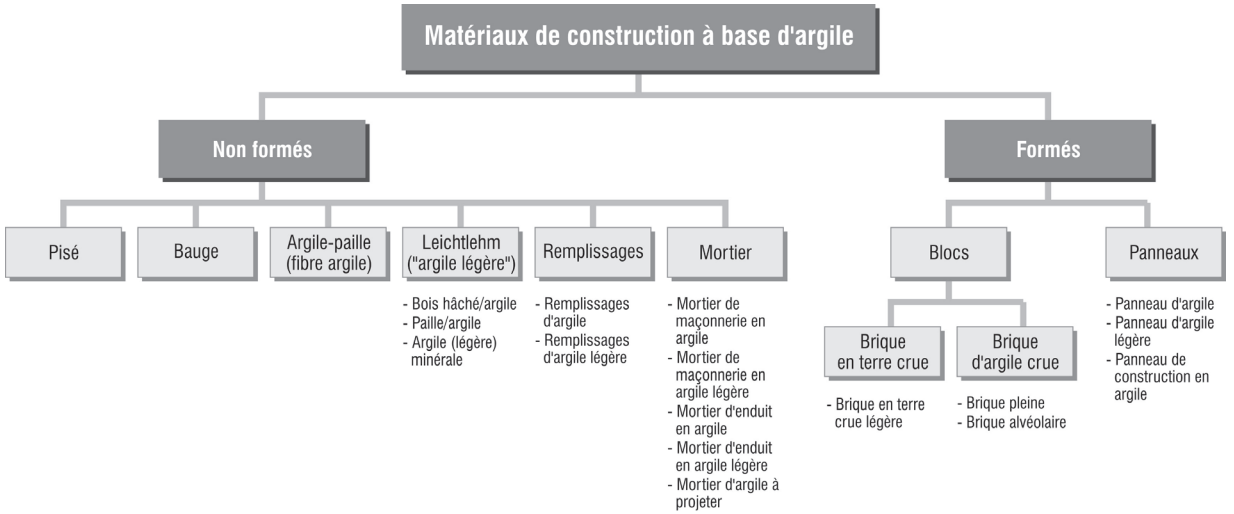


Illustration AN.27: Descriptif des différents produits/matériaux en terre crue



Illustration AN.28: Mises en œuvre et produits en terre crue

Les premières civilisations, telles que les civilisations du Nil en Égypte et de Mésopotamie, se développèrent dans les grandes vallées fluviales où la terre glaise et l'argile étaient des matériaux de construction abondants et facilement disponibles. C'est dans ces régions que sont apparues, il y a environ 5000 ans, les premières villes construites en terre.

La construction en terre est également utilisée en Europe où elle est liée à l'apparition de l'ère industrielle : avec la déforestation massive, le bois devenant rare et très cher, on commença à construire en terre. Dans les villes, la terre glaise était principalement utilisée pour le remplissage et les enduits des maisons à colombage.

La construction en terre est présente sur l'ensemble du globe : Afrique, Amérique, Europe, Asie et Moyen-Orient… Selon le département de l'Énergie américain, la moitié de la population mondiale vit dans un habitat en terre crue (carte). De plus, 15 % des œuvres architecturales inscrites au patrimoine mondial de l'Unesco sont construites en terre. L'utilisation de la terre en tant que matériau de construction repose de nos jours sur diverses motivations:

- dans les régions pauvres où l'argile est abondante et disponible, elle est donc considérée comme un matériau local, abordable et facile à utiliser;
- en Europe centrale, on réutilise l'argile pour les principaux avantages qu'elle procure dans l'habitat : une ambiance intérieure de qualité (hygrométrie) et un air intérieur de qualité (sans émissions toxiques).

Après la 2e Guerre mondiale, la reconstruction de l'Europe qui devait s'effectuer rapidement l'a presque complètement abandonnée au profit de matériaux nécessitant moins de main-d'œuvre. Il y a seulement une vingtaine d'années que les scientifiques, architectes et professionnels du bâtiment tentent de la réhabiliter. En effet, ils ont découvert notamment grâce au progrès de la physique de la matière granulaire que la terre crue possédait des propriétés extrêmement intéressantes pour une construction respectueuse de l'environnement.

Après sa redécouverte en Europe, l'engouement pour ce matériau et ses propriétés a suscité, ces dernières années, de nombreuses innovations dans le développement de produits et dans l'intégration de ceux-ci dans l'industrie de la construction moderne. Cette tendance se remarque non seulement dans le nombre de projets réalisés, mais également dans l'augmentation continuelle de produits de construction en argile « préfabriqués »

3.1. Terre crue et argile, quelle différence?

Il ne faut pas confondre terre crue et argile.

À la surface du sol, fraction solide de la sphère terrestre; la terre est un matériau meuble, d'épaisseur variable, sur lequel poussent les végétaux et qui supporte les êtres vivants et leurs ouvrages. La terre résulte de la transformation de la roche mère sous l'influence de divers processus physiques, chimiques et biologiques liés aux conditions bioclimatiques et à la vie animale et végétale. Ces processus sont l'altération de la roche mère, l'altération de la roche par les matières organiques et la migration verticale des éléments solubles.

La terre est un milieu poreux constitué de plusieurs éléments :

- les constituants gazeux : principalement de l'air
- les constituants liquides : principalement de l'eau
- les constituants solides : la matière minérale et la matière organique

Les constituants solides sont insolubles dans l'eau. Ils sont composés :

- de constituants organiques provenant des organismes végétaux ou animaux du sol : végétaux et animaux vivants (bactéries, champignons, algues, vers, insectes…), des déjections animales ainsi que des végétaux et animaux morts, mais pas encore décomposés, des matières organiques en décomposition et de l'humus.
- de constituants minéraux ou constituants mécaniques provenant de la désagrégation de la roche mère : fragments de roches (pierres, graviers), soit des minéraux constituants des roches (sables, limons)

Les proportions respectives et la répartition de ces constituants (gazeux, liquides et solides) caractérisent la structure et la texture de la terre et lui confèrent ses propriétés.

La terre est une matière structurée. La structure de la terre va influencer la circulation d'eau et d'air ainsi que ses propriétés physiques.

Les constituants de la terre sont disposés ou liaisonnés selon trois principaux types de structures : particulaire, fragmentaire, continue. Ces trois types se différencient par le type de liaison réalisée par l'argile : faible liaison, liaison par paquets, éléments pris dans la masse argileuse.

L'argile est un des constituants solides de la terre, au même titre que les graviers, les sables… Cependant, les caractéristiques physiques et chimiques des argiles sont différentes de celles des autres constituants de la terre.

Les éléments principaux de l'argile sont principalement composés de silice (SiO_2), d'alumine ($Al2O_3$) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3).

Les trois principaux groupes d'argiles sont les kaolinites, les illites et les montmorillonites provenant de la décomposition des roches contenant du feldspath (granit, porphyre…)

Leur surface spécifique est infiniment plus grande que celle des particules grossières de forme sphérique ou anguleuse. Elles ont une structure ionique telle qu'elles interagissent fortement avec les molécules polaires de l'eau. Elles sont cohésives et forment une masse cohérente à une humidité convenable.

Elles contribuent de manière importante aux propriétés de la terre : elles lui apportent sa plasticité en conditions

très humides, grâce aux couches d'eau qui adhèrent aux couches d'argiles et qui lient les particules entre elles.
Les argiles forment une matrice liante qui enrobe et lie les granulats entre eux.

3.2. Terre et terre glaise en tant que matériau de construction

Les cristaux plats des minéraux argileux présentent une structure folliculaire qui est capable de stocker l'eau par capillarité et de la faire resurgir.
C'est ainsi que l'argile est également considéré comme un liant minéral, notamment dans certains mortiers et enduits ainsi que dans la « glaise », qui est réellement le matériau « terre »
La glaise est une matière naturelle qui se compose principalement d'argile, de sables et de fines (sables très fins). Des granulats de plus gros calibre comme les graviers ou des particules de roches ainsi que des composants organiques peuvent y être également mélangés. En fonction des composants, on parle de glaise sableuse, fine ou argileuse.
La glaise provient de la décomposition de roches primaires. Des réactions mécaniques et chimiques agissent sur celles-ci et les transforment. Selon son origine, différentes dénominations existent : glaise de montagne, glaise de décomposition, marnes, glaise alluvionnaire ou encore loess.
La glaise présente une grande diversité d'aspects, de couleurs et de textures selon les granulats qui la composent. Le spectre de couleur peut aller du blanc au noir en passant par le beige, l'ocre jaune et rouge, le brun, le gris et même des teintes bleues ou vertes.

Propriétés physiques

Les propriétés peuvent être très variables d'une terre à une autre puisqu'elles dépendent de la nature du mélange complexe entre les différents constituants.
Les propriétés physiques d'une terre sont nombreuses et permettent de préciser si celle-ci peut être utilisée en construction.
On peut notamment citer :

- la masse volumique : de 2500 kg/m³ à 3000 kg/m³ selon le type de terre;
- l'ameublissement : aptitude d'une terre à être facilement brisée. Les terres à fraction sableuse dominante se brisent facilement contrairement aux terres très argileuses;
- la stabilité structurale : c'est la solidité de la structure de la terre qui précise sa résistance aux agents de dégradation;
- l'adhérence qui est l'aptitude d'une terre, pour un certain degré d'humidité, à adhérer aux objets, notamment aux outils. Celle-ci augmente avec l'humidité jusqu'à un maximum puis diminue;
- la teneur en eau : c'est la quantité d'eau contenue dans la terre, soit à l'état naturel, soit après manipulation et séchage. Elle s'exprime en % par rapport à lamasse volumique et définit les différents états hydriques de la terre;
- la porosité ou indice des vides : c'est le volume des vides contenus dans la terre exprimé en % du volume total;
- le pouvoir absorbant : c'est la propriété que possèdent l'humus, l'argile et le complexe argilohumique de retenir à leur surface des ions électropositifs, mais également électronégatifs provenant de la terre;
- le potentiel capillaire qui mesure la force de succion de l'eau par la terre et qui s'exprime en g/cm³. Plus le sol est humide, plus la succion est élevée et moins l'eau est retenue dans la terre. Plus la terre est sèche, plus la succion augmente.

Cependant, l'étude exhaustive des propriétés d'une terre n'est pas toujours nécessaire. Il convient le plus souvent de connaître quelques propriétés fondamentales qui sont la granularité, la plasticité, la compressibi-



Illustration AN.29: Vue aérienne de Ghadamès, Libye
Source: [FONTAINE, 2009]



Illustration AN.30: Fabrication de briques de terre crue
Source: [FONTAINE, 2009]

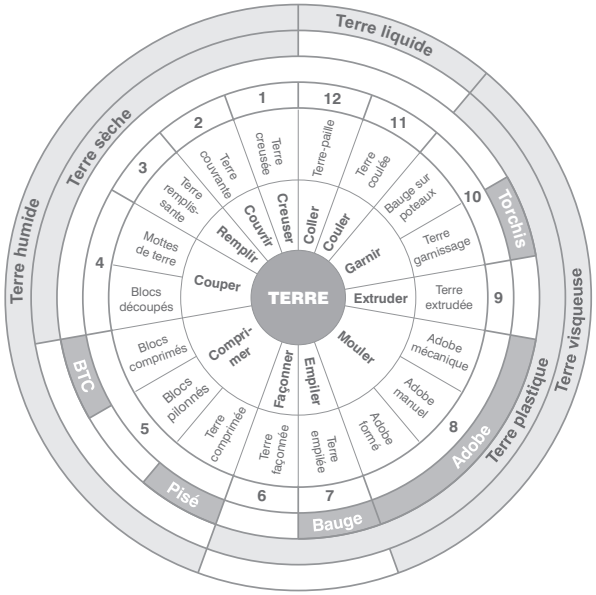


Illustration AN.31: Matériaux et techniques en terre crue

lité et la cohésion.

• Granularité

La granularité représente la teneur centésimale en fractions des grains différents contenus dans la terre et mesurés en pourcentages. La texture d'une terre se mesure par analyse granulométrique pour les fractions de grains grossiers : graviers, cailloux, sables et limons et par sédimentométrie pour les fines argileuses.

• Plasticité

La plasticité définit la propriété de la terre à subir des déformations sans réaction élastique importante caractérisée par une fissuration ou une pulvérisation. La plasticité d'une terre ainsi que les limites entre les différents états de consistance sont déterminées par les mesures des limites d'Atterberg.

• Compressibilité

La compressibilité d'une terre définit son aptitude à se laisser comprimer jusqu'à un maximum pour une énergie de compactage et un taux d'humidité donnés.

Lorsque le volume de terre est soumis à l'action d'une force, le matériau est comprimé et l'indice des vides décroît. Plus la densité d'une terre peut être augmentée, plus sa porosité est bloquée et moins l'eau peut y pénétrer.

Cette propriété est mesurée par l'essai Proctor.

• Cohésion/ Viscosité

La cohésion d'une terre exprime la capacité de ses particules à se maintenir ensemble lorsqu'on exerce une contrainte de traction sur le matériau.

La cohésion d'une terre dépend des caractéristiques de cimentation (collage) du « mortier » qui lient les grains inertes entre eux. Cette propriété est donc influencée par la quantité et la qualité des argiles présentes dans la terre.

La cohésion se mesure par l'essai de traction à l'état humide.

Propriétés environnementales et sanitaires

Les propriétés environnementales de la terre crue sont les suivantes:

- la terre crue, comme l'argile, est une ressource locale, naturelle et non renouvelable. Cependant, elle est très abondante et disponible dans pratiquement toutes les régions du globe. L'argile peut être considérée comme une ressource inépuisable puisqu'elle se renouvelle par l'action des cours d'eau, mais très lentement;
- la terre crue est réutilisable de manière indéfinie et peut être remise dans la nature sans causer de problème de pollution;
- la terre crue est une matière première peu transformée, voir pas transformée du tout: elle peut être travaillée telle quelle ou en rajoutant de l'eau;
- les procédés d'extraction, de fabrication et de mise en œuvre ne nécessitent que très peu d'énergie et sont peu polluants (GWP, AP, POCP).

La terre crue est un matériau qui améliore sensiblement le confort intérieur. La terre est un matériau massif et dense qui possède une grande inertie thermique. Sa capacité à stocker la chaleur permet de compenser les variations de température dans l'habitat.

En outre, sa capacité à absorber la vapeur d'eau et la restituer selon les besoins permet d'améliorer le climat intérieur et la qualité de l'air.

La terre crue est également un matériau sans odeur, non toxique et d'une mise en œuvre facile et agréable ne nécessitant pas de protection (mains et visage).

4.2. Matériaux et techniques de construction en terre

Les techniques de construction en terre, illustrées par la figure A3.35 ci-contre, sont très variées.

Cette palette de possibilités constructives découle en partie des états hydriques du matériau lors de sa mise en œuvre :

- Terre sèche (teneur en eau < 5 %)
- Terre humide (teneur en eau : 5 – 20 %)
- Terre plastique (teneur en eau : 15 – 30 %)
- Terre visqueuse (teneur en eau : 15 – 35 %)
- Terre liquide (teneur en eau : > 35 %)

La classification des matériaux ou des techniques constructives à base d'argile se fait selon la densité, les additifs et la mise en œuvre ou l'usage.
Il existe également diverses possibilités d'amélioration des propriétés intrinsèques du matériau « terre ».
L'adjonction de compléments organiques comme la paille et les fibres cellulosiques ou de minéraux comme la chaux optimise les propriétés de la glaise : solidité, la dislocation ou encore l'isolation thermique.

Pisé (1700 à 2200 kg/m³)

Le pisé ou « béton d'argile » est utilisé pour la mise en œuvre de murs massifs d'une épaisseur moyenne variant entre 40 et 60 cm : la terre humide est disposée par couche de 10 à 15 cm dans des coffrages et ensuite compactée. Le mur est décoffré directement après que la terre ait été damée. La terre reste apparente, le mur ne nécessitant pas d'enduit.
Cette stratification est visible ensuite sur la surface du mur qui présente une texture unique et une couleur spécifique appréciée par les architectes soucieux de développer des constructions contemporaines en terre.
Le pisé est la seule technique qui permette de mettre en œuvre des terres contenant des graviers et des cailloux.
Cette technique est relativement sophistiquée et longue à mettre en œuvre, ce qui fait du pisé un matériau haut de gamme dans les pays industrialisés.

Adobe ou brique de terre crue (1400 à 2000kg/m³)

Le terme « adobe » vient de l'égyptien « Tobe » signifiant brique. Il a donné naissance au mot arabe « Ottob» devenu « adobe » en espagnol et « toub » en français.

L'adobe est une technique qui consiste à fabriquer des briques de terre crue, façonnées à la main ou moulées à l'état plastique, puis séchées à l'air libre. L'état plastique du matériau permet un façonnage ou un moulage aisé, mais offre également la possibilité d'un démoulage immédiat sans risque d'affaissement.
Les sols constitués de sable, de limon et d'argile sont les plus aptes à la fabrication de l'adobe. En voici les proportions : sable (55 à 75 %), limon (10 à 28 %), argile (15 à 18 %) et matières organiques (inférieures à 3 %).
Dans la fabrication traditionnelle, les briques sont le plus souvent préparées dans des moules rectangulaires en bois. D'autres modes de production, mécanisés voire industriels ont été mis en place dans les pays développés dans le but de diminuer les coûts de main-d'œuvre et d'augmenter la productivité.
Cette technique de construction en terre est synonyme d'une grande rapidité et de simplicité. De plus, elle offre la possibilité de construire un édifice en n'utilisant pratiquement qu'un seul matériau.
L'adobe est également une technique extrêmement économique, notamment dans les pays en développement où les briques et la construction sont réalisées quasi sans outils.

Bauge (1500 à 1800 kg/m³)

La bauge est une technique utilisée pour la mise en œuvre de murs massifs monolithiques: un mur en bauge est construit en empilant des boules de terre malléable telle une pâte à modeler.
La terre est d'abord amendée de fibres végétales (principalement de la paille, pour éviter la fissuration) puis le mélange est malaxé à l'état plastique. Des boules sont ensuite façonnées et posées sur le mur où elles sont travaillées afin de se fondre dans la structure monolithique du mur. Le mur est ensuite battu pour refermer les fissures éventuelles puis les faces irrégulières sont coupées à l'aide d'un outil tranchant.

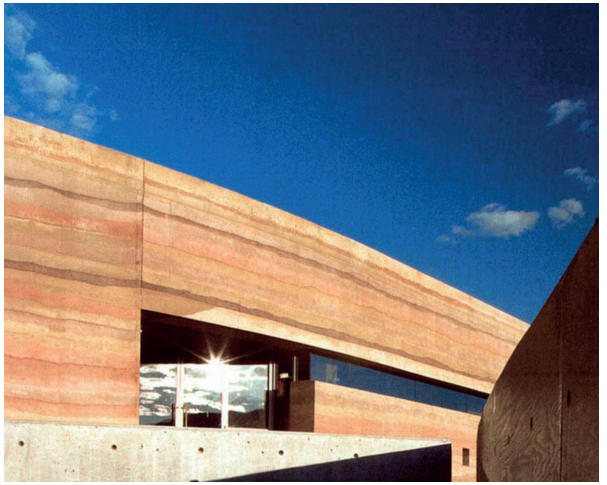


Illustration AN.32: Desert Interpretative Center, Canada
Architecte: Cabinet Hotson Bakker Boniface Haden
Source: [FONTAINE, 2009]



Illustration AN.33: Chapelle de la réconciliation, Berlin
Architecte: Martin Rauch
Source: [FONTAINE, 2009]

La terre étant mise en œuvre à la main, elle ne doit pas contenir de cailloux ou graviers.
Dans la plupart des régions du monde, la construction en bauge est entièrement façonnée à la main. En Europe centrale, on empile à la fourche des paquets de terre plastique.

Torchis ou argile paillée (1200 à 1700 kg/m³)

L'argile paillée est un mélange de glaise et de fibres végétales, le plus souvent de paille. Ce mélange de la consistance d'une bouillie est employé pour le remplissage des colombages ou est transformé en moellons ou plaques de terre après pressage dans des moules.
Actuellement, des produits finis préfabriqués sont apparus sur le marché de la construction.

Terre légère (400 à 1200 kg/m³)

Selon le type d'adjuvant utilisé, on fait la distinction entre terres légères organiques et terres légères minérales. Ce matériau convient parfaitement pour des parois et divers remplissages, mais il ne peut supporter d'autres charges que son poids propre.
Il est coffré à l'état humide ou conditionné sous forme de moellons ou de plaques.

Mortier de maçonnerie

De nombreux fabricants proposent aujourd'hui des mortiers de terre qui, par adjonction de pigments, offrent un large spectre de couleurs et de teintes.
À l'inverse d'autres mortiers, le mortier de terre ne se délie pas. Le temps de mise en œuvre peut être rallongé en ajoutant de l'eau.
Pour les enduits, les mortiers peuvent être mélangés à des fibres qui serviront d'armatures et empêcheront l'apparition de fissures dans la couche d'enduit.

Enduits en terre

Les enduits en terre sont l'application la plus simple du matériau terre. Le matériau présente l'avantage de durcir plus lentement que les autres enduits, il est donc plus facile à travailler.
Les enduits en terre ont également l'avantage de présenter – en fonction de l'origine du matériau – une palette étendue de couleurs et de textures.

Parpaings ou briques de terre

Il existe différents types de parpaings ou briques de terre :

- parpaings de terre et terre légère : ces moellons sont utilisés principalement en tant qu'éléments de remplissage, de revêtements de planchers et de parois. Ils peuvent également remplir des fonctions porteuses (solidité suffisante);
- briques de terre crue;
- briques crues : ce sont des briques hautement densifiées (compressées), destinées à la cuisson, mais qui sont employées crues. Elles sont principalement utilisées en tant qu'éléments non porteurs, à l'abri du gel et des intempéries.

Dalles de terre

Le terme « dalle de terre » désigne tous les matériaux de construction en terre de moins de 5 cm d'épaisseur. On les emploie en tant qu'éléments de maçonnerie non portante.

Les techniques de construction évoquées ci-dessus présentent une grande souplesse d'emploi et permettent ainsi la construction d'une grande variété de composants et de systèmes constructifs comme des fondations, des soubassements, des murs et piliers, des pavements et planchers, des toitures, des voûtes et coupoles, des éléments de mobilier…
Plus encore, ces différentes techniques, par une matière première universellement disponible, leur simplicité, leur rentabilité économique et leur faible impact environnemental peuvent être considérées comme des technologies d'avenir.

3.3. Extraction, préparation et production des produits en terre

Quels que soient les modes de production des produits en terre, qu'ils soient manuels ou mécanisés, les modes opératoires suivent plus ou moins des étapes identiques. Ceci est vrai pour les phases d'extraction, de transport, de séchage préliminaire, de stockage de la matière brute ainsi que pour le broyage et le criblage, le dosage et le malaxage, le séchage et le stockage des produits finis.
Les différentes étapes sont les suivantes :

- l'approvisionnement de la matière: cette phase comprend l'extraction de la terre d'une carrière et le séchage de celle-ci par épandage en couches minces, en petits tas aérés ou en cyclone à air chaud;
- le stockage de la matière brute: une certaine quantité de terre est stockée ou préparée sur l'aire de production;
- la préparation de la terre: selon l'origine de la terre et son utilisation future, il existe plusieurs opérations pour préparer la terre et ainsi améliorer ses propriétés: le criblage lorsque la terre est constituée de gros cailloux qui doivent être écartés, le broyage pour désagréger les concrétions d'argiles qui se sont formées dans la terre et le tamisage pour éliminer les éléments indésirables;
  La terre ainsi préparée est à nouveau stockée.
- la phase de production suppose également un certain nombre d'opérations selon le type de produit, telles que:
  - dosage à sec : on dose la quantité de terre (en poids ou en volume) en vue de son mélange avec l'eau et/ou le stabilisant;
  - mélange sec : mélange à sec avec un stabilisant (chaux ou ciment);
  - mélange humide : ajout d'eau par aspersion après

un mélange sec ou directement avec un stabilisant liquide;
- réaction : temps nécessaire;
- trituration : la terre est malaxée avant sa mise en œuvre ou sa mise en forme;
- moulage : la terre malaxée subit sa mise en forme définitive par différents procédés.

• mise en condition de séchage: une fois mis en forme, les produits en terre doivent être séchés. Pour ce faire, ils subissent différentes opérations :
- la cure : mise en condition pour les premiers temps de séchage;
- l'aspersion : opération nécessaire pour permettre une bonne hydratation du stabilisant;
- le séchage.

Les produits, une fois séchés peuvent être stockés en vue de leur emploi sur chantier.

3.4. Conception des ouvrages

Sans additif, l'argile et la terre crue sont très sensibles à l'eau.

Par forte humidification, la terre perd sa solidité et sous l'action des intempéries, elle se dégrade plus ou moins rapidement.

C'est pourquoi il est important de protéger les surfaces exposées aux intempéries contre l'érosion. Cette protection peut être réalisée au moyen de débordement de toiture notamment.



Illustration AN.34: Ecole primaire à Gando, Burkina Faso
Architecte : Diébédo Francis Kéré
Source: [FONTAINE, 2009]

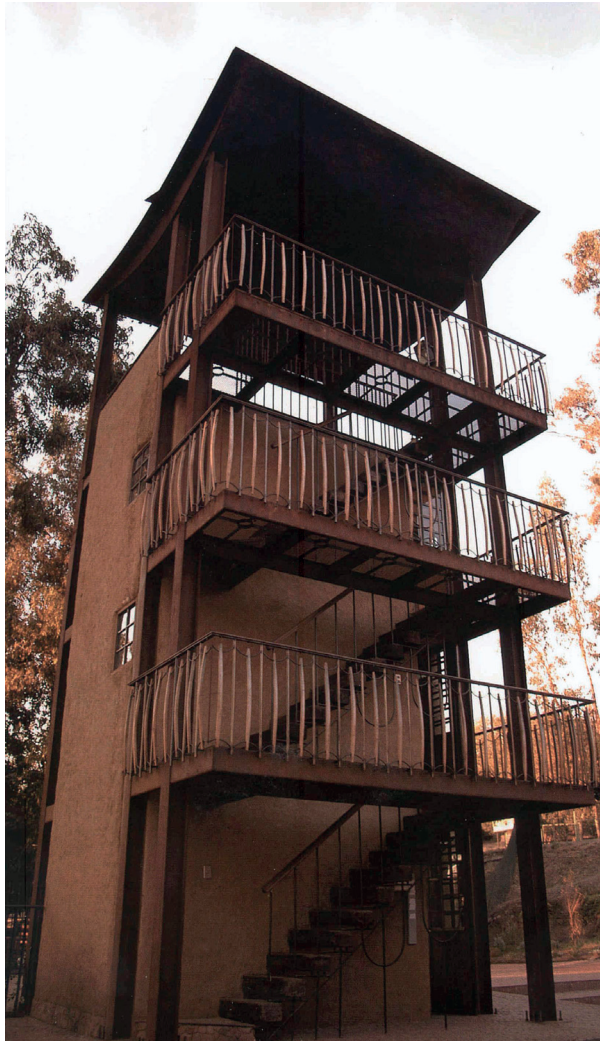


Illustration AN.35: Immeuble de 3 étages, Chili
Architecte: Marcelo Cortes
Source: [FONTAINE, 2009]

4. La terre cuite ou céramique

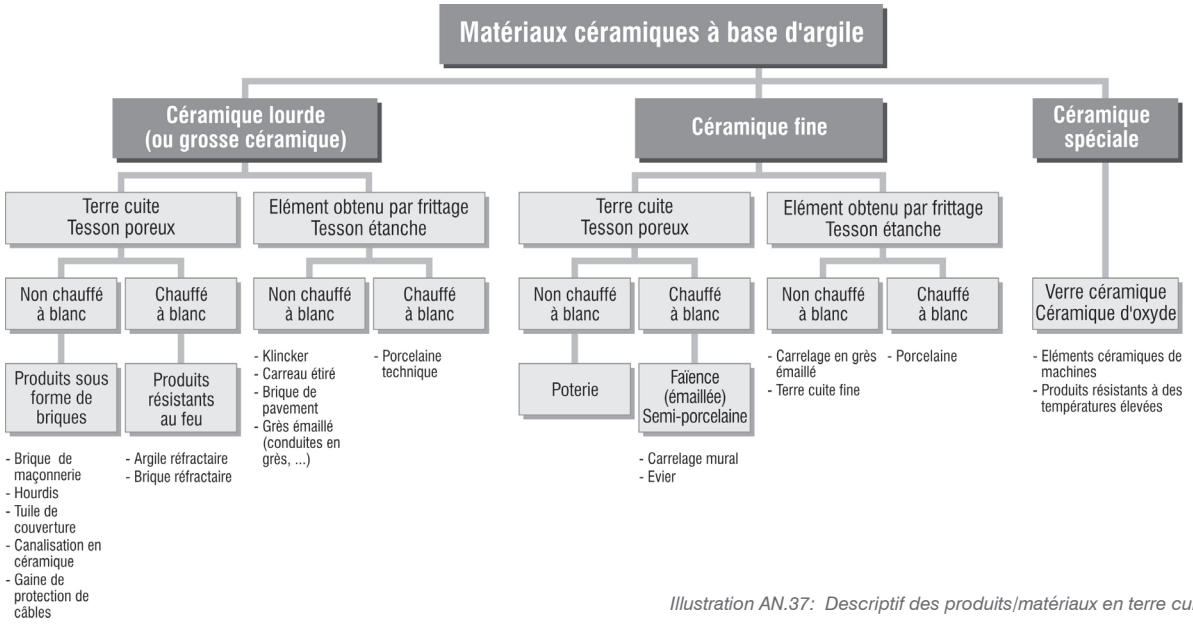


Illustration AN.37: Descriptif des produits/matériaux en terre cuite



Illustration AN.38: Mises en œuvre de briques de parement

Le terme « terre cuite » vient du mot grec « keramos ».
La terre cuite fut d'abord utilisée principalement pour la réalisation de plats et récipients utilisés pour la conservation d'aliments ou pour des usages religieux.
Alors que l'argile et la glaise « crues » furent utilisées pour la construction de bâtiments et de villes par l'ensemble des premières civilisations, il faut attendre 4000 ans av. J.-C. pour voir apparaître, notamment en Égypte, en Inde, en Chine et en Mésopotamie, l'édification de murs en terre «cuite », qui en raison de sa résistance à l'eau et son imperméabilité, présente une meilleure durabilité que la terre «crue ».
La brique se plie à la réalisation de multiples techniques et formes architecturales comme les murs appareillés, les murs à remplissage, la construction de voûtes et d'arcs,…Cette palette d'usage est rendue possible grâce à ses propriétés intrinsèques telles que leur forte résistance à la pression et à l'abrasion, leur durabilité et leur étanchéité à l'eau.

La transmission du savoir-faire dans la fabrication et l'emploi de ce matériau se fera par les grandes routes commerciales et les expéditions guerrières.
Bien que plusieurs fois délaissée ou abandonnée au profit d'autres matériaux, la terre cuite a démontré ses qualités tout au long de l'histoire.
Avec la chute de l'Empire romain, le savoir technologique se perdit. Son nouvel essor et usage sera lié à la première évolution des techniques au Moyen-Age et aux concentrations urbaines du XIIIe siècle ; le risque accru d'incendie ayant certainement contribué au choix de la terre cuite ou de la pierre au détriment du bois.
Au 19e siècle, l'utilisation de la terre cuite croît de manière exponentielle. Avec la révolution industrielle, la brique devient le matériau principal utilisé pour la construction des fabriques et des faubourgs monotones des grandes villes industrielles où sont logés les travailleurs.
Depuis, en Europe centrale et notamment en Belgique et en Allemagne, la terre cuite, sous forme de briques et de tuiles a été et est toujours fortement utilisée dans le bâtiment.

4.1. Terre cuite et céramique en tant que matériau de construction

Les matériaux de construction en terre cuite sont nombreux et variés : briques, blocs, tuiles, briques réfractaires, tuyaux d'égouttage en grès, tuyaux de drainage, briques de revêtement ou clinkers…
Ces différents produits se répartissent en céramique «grossière ou céramique « fine » selon le grain, les cristaux et la taille des pores du tesson.
Leurs propriétés, telles que la dureté, la densité, la porosité et l'absorption d'eau dépendent essentiellement de la température de cuisson, de la durée de cuisson et du mélange de matières premières.
La température de cuisson étant un élément déterminant, on peut grouper les matériaux en terre cuite comme suit :

- briques et blocs :	900 à 1000 °C
- clinkers :	1100 à 1300 °C
- porcelaine ou kaolin	1300 à 1450 °C
- produits réfractaires :	1300 à 1800 °C
- céramiques à oxydes :	1500 à 2100 °C
- céramiques spéciales :	jusqu'à 2500 °C

4.2. Les étapes de fabrication

Extraction

L'argile ou la terre glaise est extraite dans des argilières.
L'exploitation se fait par couches.
L'argile est la matière première naturelle à la base des produits en terre cuite. Il faut entendre « argile » au sens large et considérer également les terres limoneuses et schisteuses, matières premières de même composition minéralogique que l'argile.
Ces matières premières sont locales et régionales : l'argile est ainsi omniprésente dans le sous-sol belge. Elles peuvent également être considérées comme des ressources naturelles non renouvelables, mais présentes en quantité quasi inépuisable tant les réserves dans le sol sont importantes.
Chaque produit de terre cuite nécessite une matière première appropriée.
Par exemple, les blocs treillis sont produits principalement à partir d'argiles grasses, extraites et utilisées dans la région du Rupel, le Waasland, la Campine et la région de Courtrai. Autre exemple, les briques de parement moulées main et étirées sont fabriquées à partir de divers argiles et limons.
La couleur du matériau en terre cuite va dépendre des oxydes métalliques contenus dans l'argile et de l'apport d'oxygène lors de la cuisson. L'oxyde de fer va donner au produit une couleur rouge et à une température de cuisson plus élevée une teinte bleu vert. Le manganèse donne une teinte brune, le graphite une teinte grise et le calcaire une teinte jaune.

Remarques :
Certains fabricants, soucieux de limiter l'apport de matières premières incorporent dans le mélange de matières premières des argiles provenant des terres de déblais des travaux d'infrastructure. C'est une opportunité supplémentaire pour limiter l'extraction d'argile en carrière et trouver une utilité à ces terres de déblais.
La plupart des argilières se situent à proximité du site de production ou de fabrication des produits, ce qui limite fortement le transport des matières premières.

Préparation de l'argile

La préparation comprend deux opérations principales: le broyage et le malaxage d'une part, le dosage et le mélange d'autre part.
L'argile est d'abord broyée, malaxée et humidifiée pour rendre la masse d'argile homogène et lui conférer la

plasticité nécessaire au moulage des produits (briques, blocs, tuiles…).
L'argile est déshydratée et stockée dans un lieu humide et sombre appelé « tourbière », pour l'élimination des composants organiques par l'action de bactéries.
La qualité constante du produit fini est un critère prioritaire. Elle ne peut être obtenue qu'à partir d'une matière première dont la composition ne varie pas. Par conséquent, le mélange de différentes argiles est un paramètre important.
Si nécessaire, des argiles de différentes provenances sont ensuite mélangées entre elles, puis avec certains adjuvants. On peut ainsi obtenir différentes qualités:

- une argile très grasse sera rendue plus maigre par l'adjonction de sable ou de schiste pulvérisé;
- de la sciure de bois produira un tesson caverneux à porosité plus grande;
- l'adjonction d'oxyde de manganèse permet de varier la coloration, etc.

Le maintien de la teneur en eau de l'argile à un niveau optimal et constant fait également partie des travaux de préparation de la matière première.

Façonnage, mise en forme et moulage

Pour les prochaines étapes de fabrication, nous présenterons ci-dessous les étapes qui sont liées à la fabrication de briques.
On distingue divers types de façonnage : les briques « moulées main », les briques pressées et les briques étirées.
La brique moulée à la main est une brique obtenue en introduisant une quantité de pâte d'argile préalablement sablée dans un moule : le mouleur (aujourd'hui une machine) prend une certaine quantité d'argile, la jette dans un moule en bois préalablement sablé ou mouillé, presse convenablement la terre pour remplir le moule, arase l'excédent et retourne l'appareil pour démouler la brique. On obtient ainsi une brique d'aspect typiquement nervuré.
Certaines briques sont encore réellement moulées à la main pour certains formats particuliers non compatibles avec la machine ou en cas d'utilisation d'argiles spéciales.
La brique pressée est la brique obtenue en pressant mécaniquement la pâte argileuse dans les moules : on introduit dans les moules de l'argile relativement sèche que l'on comprime vigoureusement pour lui donner la cohésion voulue. On obtient ainsi une brique de forme géométrique nette et angulaire et bien marquée et présentant une surface grenue.
La brique étirée est fabriquée au moyen d'une étireuse (la masse d'argile est extrudée sous forme d'une carotte continue à section rectangulaire). Elle est pleine ou perforée. Au moins trois des six faces (une panneresse et deux boutisses) sont fabriquées de telle sorte qu'elles puissent rester apparentes (lisse, écorcée, rugueuse, sablée ou non).

Séchage

Avant de passer à la cuisson, les briques crues doivent perdre une bonne part de l'eau qu'elles contiennent encore. Le risque serait en effet de les voir se fendre ou éclater sous la dilatation de la vapeur dans la masse; et d'autre part la stabilité dimensionnelle du produit n'est obtenue qu'au terme du retrait consécutif à la dessiccation .
Le séchage s'opère entre deux et quatre jours, dans des chambres ou des tunnels. On utilise l'air chaud de la zone de refroidissement du four de cuisson.

Cuisson

C'est la dernière opération que doit subir le « bloc » d'argile façonné et séché pour devenir à proprement parler un produit en «terre cuite».
La cuisson est une phase extrêmement importante qui doit se dérouler très progressivement : on augmente graduellement la température jusqu'à l'obtention de la température de cuisson et on diminue ensuite progressivement la température jusqu'au refroidissement complet.
Ainsi, pour chaque type de composition de la matière première, il existe ainsi une « courbe de cuisson » qui lui est propre.
Dans un four tunnel, la fournée est chargée sur des wagonnets qui parcourent un tunnel rectiligne et passent successivement par les zones de préchauffage, de cuisson et de refroidissement.

Lors de la cuisson, on peut jouer sur l'atmosphère qui règne à l'intérieur du four. Par exemple, l'interruption de l'apport en oxygène dans un four dans lequel cuit de l'argile contenant du fer engendre une réduction de l'oxyde de fer et donne aux produits une teinte bleu-gris.

La cuisson des produits en terre cuite est un processus qui nécessite une consommation d'énergie thermique importante pour porter la température du four au-delà de 1000 °C.
Les fabricants, conscients de cette consommation améliorent de manière constante l'efficacité énergétique notamment par l'installation de séchoirs et de fours de plus en plus performants et par la récupération de l'air chaud venant de la zone de refroidissement d'un four tunnel pour le séchage de l'argile.
On a également assisté à un changement dans l'emploi du combustible. Alors que l'on utilisait essentiellement du pétrole au début des années 70, le combustible le plus utilisé est désormais le gaz naturel, source énergétique moins polluante.

Traitement de surface

Certains matériaux en terre cuite, comme les tuiles et les revêtements muraux, peuvent subir un traitement de surface.
L'engobage est l'adjonction d'une fine couche d'argile, souvent colorée, par trempage ou aspersion au pistolet avant la cuisson. En plus de la coloration, l'engobage «fritté » (cuisson au-delà de 1200 °C) produit une sur-

face plus dense.
Les glasures densifient la surface du matériau au moyen d'un revêtement.

Fin de vie et recyclage

Les produits en terre cuite ont une durée de vie importante s'ils sont mis en œuvre dans les règles de l'art (> 100 ans).
Les tuiles et les briques peuvent, le cas échéant, être réutilisées. Les briques, avant réutilisation, nécessitent cependant un nettoyage pour enlever les restes adhérents de mortier et/ou d'enduit.
Cette réutilisation est à encourager, car de ce fait, on profite de la grande durabilité de ce matériau et on économise des matières premières ainsi que de l'énergie primaire.
Dans la grande majorité des cas, les produits en terre cuite, qui sont des déchets inertes de classe 3, sont concassés puis valorisés en tant que remblai dans les travaux publics et routiers.

4.3. Propriétés environnementales et sanitaires des produits en terre cuite

Les propriétés environnementales de la terre cuite sont les suivantes:

- Consommation de ressources naturelles locales non renouvelables, mais présentes en très grande quantité. L'argile est la matière première naturelle à la base des produits en terre cuite. Les argiles sont des matières premières locales et régionales, elles sont omniprésentes dans le sous-sol belge. Ce sont des ressources naturelles non renouvelables, mais présentes en quantité quasi inépuisable tant les réserves dans le sol sont importantes.
- Consommation importante d'énergie grise à la fabrication. Les produits en terre cuite nécessitant une température de cuisson relativement élevée (de 900 °C à 1200 °C) et un temps de cuisson relativement long (de 12 à 48h), le procédé de fabrication implique une consommation importante d'énergie grise. Cependant, les fabricants, conscients de cette faiblesse, ont pris ces dernières des mesures pour réduire de manière significative cette consommation : fours tunnels performants au gaz naturel, suivi rigoureux des cycles de cuisson par voie informatique, récupération de chaleur venant du four tunnel vers le séchoir… Le combustible le plus utilisé est désormais le gaz naturel, source énergétique moins polluante que le fuel initialement utilisé.
- Utilisation d'eau en cycle fermé dans le processus de fabrication. Pour la production de briques «moulées main», les moules sont humidifiés et sablés avant d'être remplis d'argile. Après la mise en forme des briques, les moules sont rincés avec de l'eau et réutilisés. Cette eau de rinçage est réutilisée en circuit fermé, ce qui permet de limiter la consommation d'eau.
- la terre cuite est un matériau de grande longévité (>100 ans). Les matériaux en terre cuite ont une durée de vie relativement longue. En outre, ces matériaux ne demandent aucun entretien spécifique, une fois mis en œuvre.

Du point de vue sanitaire, la terre cuite est un matériau inerte et massif. La terre cuite est un matériau inerte, c.-à-d. qu'elle ne se décompose pas, ne brûle pas et ne produit aucune réaction physique ou chimique et qu'elle n'émet aucune substance toxique pour l'être humain (COV…).
La terre est un matériau massif et dense qui possède une grande inertie thermique. Sa capacité à stocker la chaleur permet de compenser les variations de température dans l'habitat et d'ainsi améliorer sensiblement le confort intérieur tant en hiver qu'en été.

4.4. La brique de terre cuite

La brique de terre cuite

La norme EN 771-1 définit la brique comme un matériau de maçonnerie fait d'argile ou d'autre matière argileuse, avec ajout ou non de sable, combustible ou autre adjuvant, porté à une température suffisamment élevée pour former une liaison céramique.
La brique de terre cuite est l'un des plus anciens matériaux artificiels[3] de la construction. Les briques de terre cuite d'il y a 4000 ans présentaient déjà des dimensions et une forme proches de celles de la brique standard actuelle. Depuis, forme, traitement et matériau n'ont cessé d'être affinés et améliorés, si bien que l'on dispose aujourd'hui d'une multitude de briques différentes, hautement spécialisées et ayant chacune des caractéristiques propres: : briques de parement, briques SB, briques ordinaires, briques de pavement, linteaux, briques de planchers…
La brique est un parallélipipède rectangle dont les faces sont définies par l'illustration A3.44 ci-après.
On peut classer les briques de différentes façons : selon leur application, selon leur forme ou encore selon le procédé de fabrication (étirée, moulée main, pressée) et selon le poids du tesson de la brique.

La norme EN 771-1 distingue les briques «Low-density LD» et les briques «High-density» et subdivise celles-ci en deux catégories selon une limite de tolérance définie pour le respect de la résistance à la compression (qualité de briques).

- les briques LD (<1000 kg/m³) possèdent une faible masse volumique sèche et donc de bonnes propriétés d'isolation thermique. Ces propriétés sont obtenues par l'ajout de billes de polystyrène ou sciure de bois, qui se consument lors de la cuisson et laissent

3 artificiel : créé et façonné par l'homme

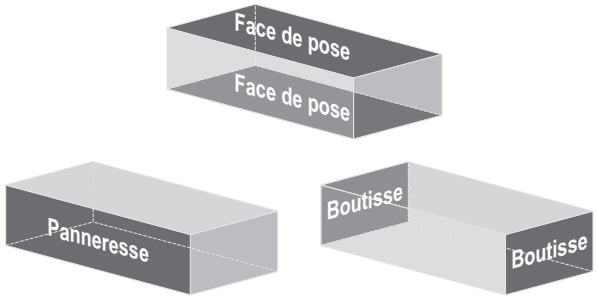


Illustration AN.38: Faces de l'élément brique

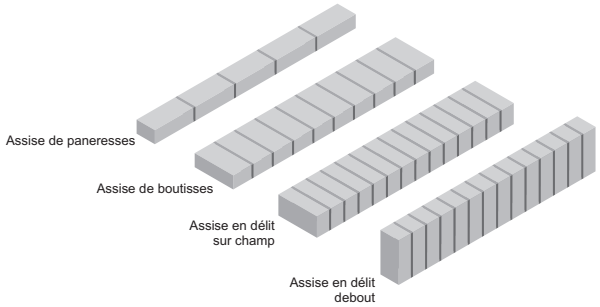


Illustration AN.39: Différents types d'assise de briques

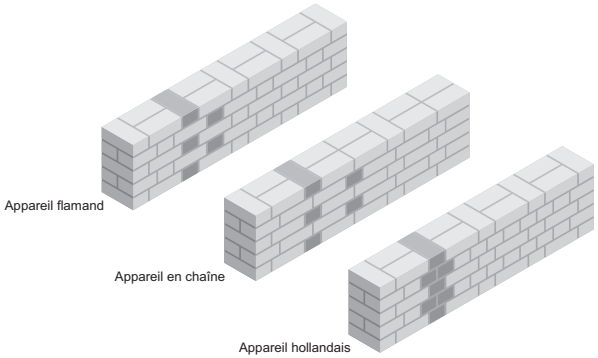


Illustration AN.40: Appareils décoratifs

des bulles d'air dans le matériau. Ce type de brique ne peut être employé que pour des maçonneries dans lesquelles l'eau ne peut pas pénétrer: principalement pour la construction de la paroi intérieure d'un double mur ou pour la construction de parois simples enduites.

- les briques HD (>1000 kg/m³) possèdent une masse volumique élevée et de bonnes propriétés d'isolation phonique. Ce type de brique est utilisé à la fois pour les ouvrages protégés que non protégés. Ce type de brique comprend des briques résistantes, adaptées à la construction d'ouvrages extérieurs et des briques lourdes, adaptées à la construction de cloisons intérieures.

Types de brique

Parmi les deux catégories de brique citées plus haut, on peut également faire la distinction entre :

- les briques pleines: briques HD offrant une perforation verticale (15 % de la face de pose ou 20 % du volume de la brique);
- les briques perforées : briques LD ou HD offrant une perforation verticale (entre 15 % et 50 % de la face de pose);
- les briques isolantes: briques LD répondant à des exigences accrues en termes de protection thermique et dotées d'un type de perforation spécifique;
- briques de doublage (pleines ou perforées): briques qui, en plus des exigences de perforation, sont résistantes au gel;
- clinkers : briques HD cuites jusqu'au frittage[4]. Ils n'absorbent que de très faibles quantités d'eau et résistent au gel;
- clinkers céramiques: clinkers particulièrement résistants et durables. Ils sont résistants à la compression et ont une masse volumique de minimum 1400 kg/m³.

Les classes de résistance à la compression ainsi que les classes de masse volumique des différents types de briques cités ci-dessus sont reprises dans le tableau A3.05 ci-après.

4.5. Maçonnerie de briques de terre cuite

Bien que les briques de terre cuite se retrouvent dans la construction de voûtes, d'arches ou en revêtement de sol, on les met en œuvre la plupart du temps, manuellement, sous forme de maçonnerie.

La maçonnerie est surtout utilisée dans la construction de murs, qu'il s'agisse de parois porteuses ou de séparation, de parements de protection ou d'habillage et/ou de remplissage.

La maçonnerie peut être définie comme un empilage régulier de petits éléments de construction rejointoyés ou liés à l'aide d'un mortier. Pour la réalisation d'une maçonnerie, il faut donc connaître les principales propriétés de ces deux matériaux.

Le mortier assure la pleine assise des briques, compense les inégalités tolérées, garantit la cohésion de l'assemblage et peut, de par sa mise en œuvre et sa couleur, influencer de manière significative l'aspect esthétique d'une maçonnerie.

Le mortier est appliqué sous forme de «joint» tant horizontalement entre les lits ou assises de briques, que verticalement entre les briques.

Les joints horizontaux permettent de répartir les charges en les transmettant d'assise en assise. Ils travaillent en compression uniquement.

En termes de maçonnerie, on distingue la maçonnerie traditionnelle, la maçonnerie à joints minces et la maçonnerie collée:

- la maçonnerie traditionnelle est caractérisée par une épaisseur de joint de l'ordre de 10 à 12 mm selon l'usage. Les joints sont réalisés au moyen d'un mor-

4 Le frittage est la consolidation par action de la chaleur d'un agglomérat granulaire plus ou moins compact, avec ou sans fusion d'un ou de plusieurs de ses constituants

Tableau AN.05 : Classes de résistance et de masse volumique des différents types de brique de terre cuite

Catégorie de brique	Types de brique	Classe de résistance (N/mm^2)	Classe de masse volumique (kg/dm^3)
Briques LD	Briques perforées	4 - 12	0,6 - 1,0
	Briques isolantes	/	/
Briques HD	Briques pleines	12 - 28	1,6 - 2,2
	Briques perforées	4 - 28	1,2 - 1,6
	Briques de doublage pleines	8 - 28	1,6 - 2,2
	Briques de doublage perforées	28	1,6 - 2,2
	Clinkers pleins	26 - 60	1,6 - 2,2
	Clinkers perforés	26 - 60	1,6 - 2,2
	Clinkers céramiques pleins	60	1,6 - 2,2
	Clinkers céramiques perforés	60	1,6 - 2,2

Source : [HEGGER 2007]

tier classique qui se compose d'un granulat (la plupart du temps du sable) et d'un liant (ciment, chaux ou mélange des deux). Les joints peuvent également être colorés. Il est possible de réaliser des joints d'une couleur identique à celle de la brique utilisée. À l'inverse, il est également possible de décliner le ton des joints pour mettre en exergue le jeu de la maçonnerie et son appareillage. Dans le cas de l'emploi d'une seule et unique couleur (briques et joints), l'effet obtenu est un effet de masse.

- la maçonnerie à joints minces est caractérisée par une épaisseur de joints allant de 4 à 7 mm (généralement 5 mm).
- la maçonnerie collée est caractérisée par la liaison des briques au moyen d'une fine couche de mortier-colle. Le joint est très fin et quasiment invisible. Ce n'est pas l'épaisseur du joint qui détermine l'adhérence, mais bien la nature du mortier-colle. Une maçonnerie collée de parement donne l'effet d'une maçonnerie où les briques ont été simplement «empilées». Les briques sont prédominantes sur les joints. Pour ce type de maçonnerie, on utilise un «mortier-colle» qui est un mortier spécial dans lequel entre aussi dans la composition des composants organiques qui assurent une bonne adhérence. Le mortier colle n'est pas mis en œuvre au moyen d'une truelle comme dans le cas de la maçonnerie traditionnelle ou à joints minces , mais bien d'une pompe destinée spécialement à cet effet.

Dans un ouvrage en maçonnerie, les différentes rangées de briques sont appelées assises, rangs ou encore lits. Selon la position des briques, on établit la distinction suivante (voir illustrations A3.44 et A3.45):

- assise de panneresses: les briques sont posées parallèlement à l'axe du mur;
- assise de boutisse: les briques sont posées perpendiculairement à l'axe du mur;
- assise en délit sur chant: les briques sont posées sur la tranche, perpendiculairement à l'axe du mur;
- assise en délit debout: les briques sont posées sur la petite face, à la manière d'une assise sur chant verticale.

Les deux dernières assises sont utilisées principalement pour la construction et la mise en œuvre de linteaux, d'appuis et/ou de corniches.

Pour construire, à partir de briques de terre cuite et de mortier, une maçonnerie de qualité, il convient d'observer lors de la pose des briques, les règles d'appareillage. On distingue quatre appareillages de base, selon l'ordre dans lequel les assises de briques sont empilées et du décalage qu'elles présentent les unes par rapport aux autres:

- appareil en panneresse : toute la maçonnerie se compose d'assises de panneresses, décalées d'une demi-brique. Ce type d'appareil offre une grande résistance à la compression et à la traction, mais ne peut être employé que pour des murs d'une demi-brique d'épaisseur;
- appareil en boutisse: toute la maçonnerie se compose d'assises de boutisses décalées d'un quart de brique. Cet appareil n'est envisageable que pour les murs d'une brique d'épaisseur. Il présente également une capacité porteuse réduite;
- appareil vertical: dans cet appareil, les assises de panneresses et de boutisses sont alternées de manière régulière, avec un chevauchement d'un quart de brique;
- appareil croisé: l'appareil croisé commence par une alternance d'un rang de panneresses et d'un rang de boutisses. Les joints montants des assises de panneresses sont décalés d'une demi-brique.

En outre, il existe des appareils dits «décoratifs» comme l'appareil flamand, l'appareil en chaîne ou l'appareil hollandais. Ces appareils n'ont qu'une importance historique ou régionale.

Précautions de mise en œuvre

Les briques issues de différents lots de production présentent presque toujours de légères différences de teintes.
Afin que ces variations de teintes n'occasionnent pas de «taches de couleur» sur la maçonnerie, il faut mélanger les briques de différentes palettes. Il s'agit de prendre simultanément des briques d'au moins quatre palettes différentes. Dès lors, toutes les briques nécessaires au chantier doivent avoir été livrées dès le début des travaux.
La maçonnerie fraîche est la plus vulnérable durant et juste après l'exécution. Pour optimaliser tant la stabilité que la qualité esthétique du travail, il faut alors mettre en place une série de mesures de précaution simples, notamment au niveau de la préparation du mortier et de la mise en charge de la maçonnerie (délais de 16 à 24 h selon la charge).

Problème d'efflorescence

Il faut également protéger les travaux de maçonnerie des intempéries afin d'éviter ou de limiter les problèmes d'efflorescence.
Les efflorescences sont des cristallisations de sels qui peuvent se présenter sous forme de voile blanc, de pellicule ou de croûte. L'eau se déplaçant par capillarité dans les pores de la maçonnerie, elle transporte des sels solubles. Ceux-ci se déposent en surface de la maçonnerie où ils cristallisent suite à l'évaporation de l'eau. L'apparition de ces sels sur la maçonnerie est notamment due à l'humidité ascensionnelle, mais peut aussi s'expliquer par une réaction entre briques et mortier dans des conditions climatiques propices à la formation d'efflorescences (pluie et forte humidité). Le risque est plus important pour les maçonneries fraîches, car le système de pores du mortier frais est encore insuffisamment développé pour éviter que l'eau ne passe dans les capillarités de la brique.

Traitements de la maçonnerie

Les maçonneries de parement peuvent subir différents traitements, soit de protection, soit de finition.
Les parements extérieurs en briques peuvent être traités contre les intempéries et les salissures au moyen d'un hydrofuge et contre les graffitis par un produit antigraphiti.

- Traitement hydrofuge des parements extérieurs

Les briques claires sont plus sujettes aux salissures. Un hydrofuge peut donc être conseillé. Ce traitement est appliqué une fois que le parement en briques et le mortier sont complètement solidarisés. Un parement hydrofugé absorbe moins d'eau qu'un parement non traité ce qui diminue la pénétration d'eau de pluie. La pénétration des salissures est moins profonde après un traitement hydrofuge et les poussières sont évacuées plus rapidement par l'eau de pluie.
Les parements intérieurs ou extérieurs peuvent également être enduits d'une couche de finition. Ils peuvent être chaulés, enduits ou peints.

- Chaulage

Dans le passé, c'était souvent une fine couche de plâtre qui garantissait l'imperméabilité d'un mur; elle se composait de chaux aérienne, de sable et d'un liant hydraulique. Avec l'arrivée du mur creux, ceci est devenu superflu vu que ce mode de construction garantit l'étanchéité à l'eau. Cependant, cette technique peut encore s'utiliser pour créer un certain effet esthétique.

- Enduisage (intérieur)

La maçonnerie de briques est généralement enduite dans les pièces habitées.
Cet enduisage présente quelques avantages ou renforce certaines propriétés de la brique comme la suppression des irrégularités, l'amélioration de l'étanchéité à l'air de la maçonnerie ou l'optimisation de la résistance au feu.

- Peinture

Il est loisible de peindre la maçonnerie de parement. Cependant, dans le cas de parement extérieur, on sera attentif à utiliser des briques qui ont une résistance élevée au gel. En effet, la couche de peinture va rendre plus difficile l'évaporation de l'humidité de la maçonnerie. La brique doit alors supporter une humidité plus importante.

4.6. Les tuiles de terre cuite

Les tuiles sont des produits en terre cuite, plans, bruts ou vernissés, utilisées dans la construction en tant qu'élément de protection (contre les intempéries) en toiture.
Fixées individuellement et mécaniquement sur un lattage en bois, elles se recouvrent mutuellement de manière à écouler les eaux de pluie sans que celles-ci ne puissent infiltrer la toiture.
On distingue les tuiles selon leur mode de fabrication, leur forme et leurs dimensions. En voici quelques modèles :

- tuiles étirées : ces tuiles, de géométrie simple, sont de deux sortes:
  - tuiles sans emboîtement, tuiles plates, planes ou creuses;
  - tuiles à emboîtement avec un profil spécifique sur un côté
- tuiles pressées: ces tuiles sont fabriquées à l'aide de presses. Elles sont de forme conique et/ou avec des rainures de tête, de pied et latérale. On peut citer la tuile canal (sans rainure) ainsi que les tuiles étirées à recouvrement, les tuiles à double emboîtement et les pannes plates à recouvrement (avec rainures)

Le choix du type de tuile, la manière de les poser et la pente de toiture sont étroitement liés.
La couleur naturelle des tuiles est le rouge. La tuile peut

également se présenter sous différentes couleurs et textures si celle-ci est teintée dans la masse, vaporisée, engobée ou vernissée.
Les tuiles répondent à diverses exigences. Elles doivent être indéformables, étanches à l'eau, résistantes au gel et supporter une charge minimale.

4.7. Les tuyaux en grès

Les tuyaux en grès sont utilisés dans les réseaux d'assainissement. Posés sous terre, ils sont étanches et présentent une très grande durabilité (>100 ans), une résistance aux agents chimiques, une grande solidité mécanique et une grande dureté.
Ils sont fabriqués à partir d'eau, d'argile et de chamotte. C'est celle-ci qui est responsable de la stabilité d'état et de forme.
Le manchon pour la liaison des éléments individuels est mis en forme durant le procédé de fabrication.

4.8. Nouveaux revêtements de façade en terre cuite

Depuis une bonne quinzaine d'années apparaissent de nouvelles manières de traiter la terre cuite en façade, autres que par maçonnerie. Cette tendance est portée par des produits innovants en terre cuite tels que

- des panneaux de parement maçonné préfabriqués ;
- de panneaux préfabriqués habillés de carreaux de terre cuite ;
- de systèmes de carreaux de terre cuite à suspendre sur une ossature extérieure ;
- de produits dérivés comme les lamelles et pare-soleil en terre cuite.

Ces nouveaux revêtements de façade sont portés et mis en évidence par certains architectes de renom, comme notamment Renzo Piano.

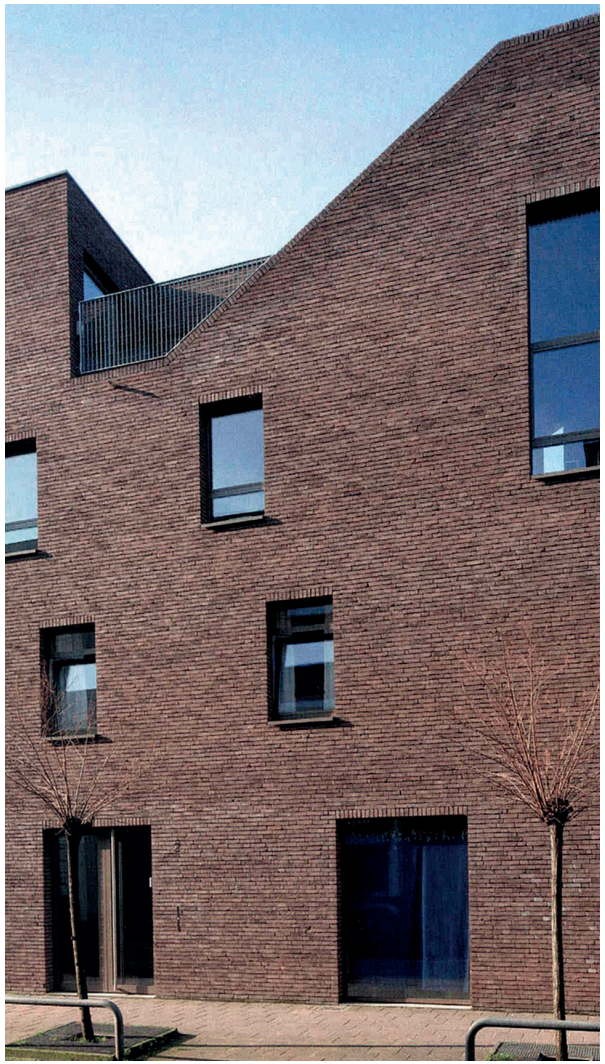


Illustration AN.41: Habitation à Anvers
Architecte: Cuypers & architecten



Illustration AN.42: Habitation individuelle à Tervuren - Architecte: DMOA



Illustration AN.43:Habitation individuelle - Architecte: Benoit De Jonghe

5. Les métaux

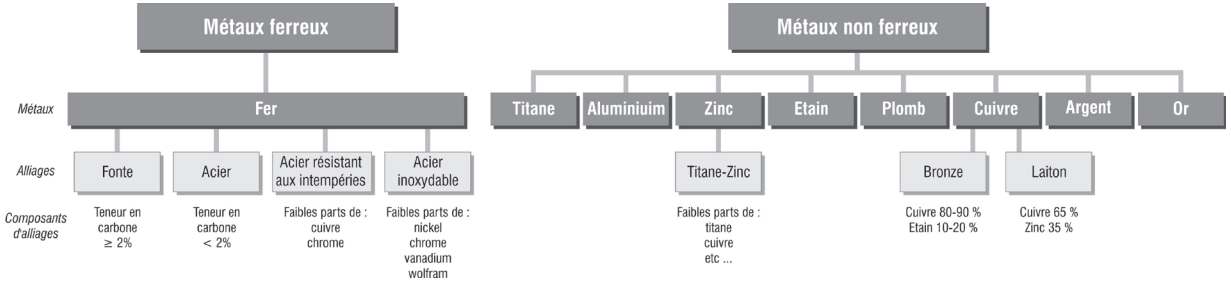


Illustration AN.44 : Descriptif des différents métaux

« Le fer est à la fois le meilleur et le pire outil dans la vie. Avec lui, nous retournons la terre, nous plantons des arbres, nous taillons les haies et coupons des grappes de la vigne ; avec lui nous construisons des maisons et cassons des pierres. Nous en avons besoin pour bien de choses utiles. Mais aussi pour la guerre, le vol et le meurtre… Car en faisons voler le fer au-dessus de nos têtes, nous avons donné des ailes à la mort. »
Pline (1er siècle apr. J.-C.)

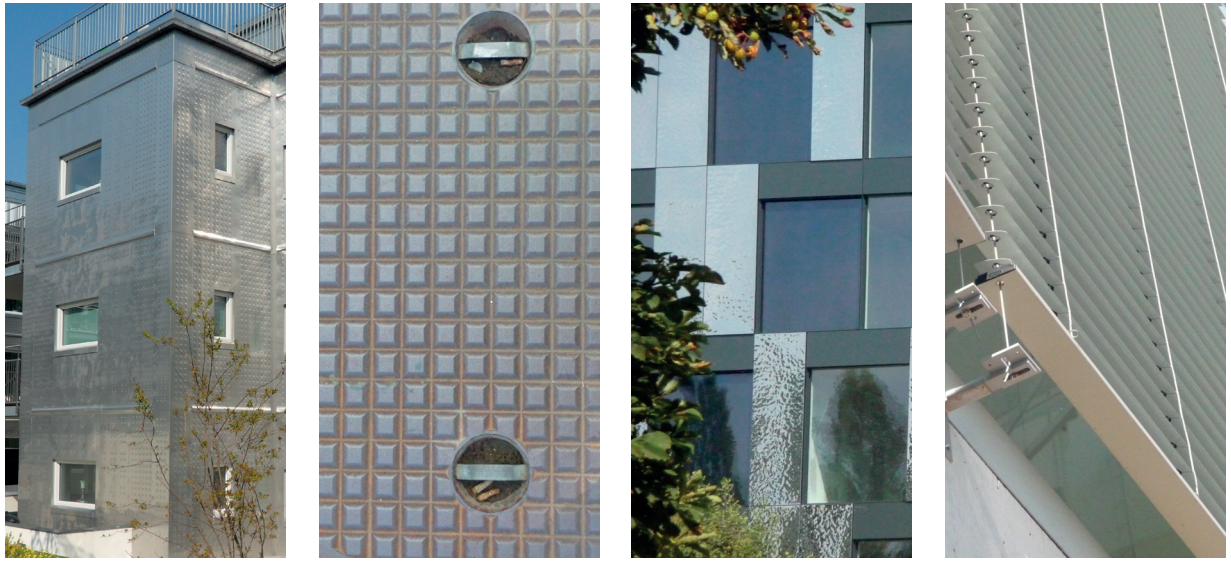


Illustration AN.45 : Éléments et mise en œuvre de produits métalliques

La découverte et l'utilisation des métaux ont marqué le développement historique et culturel de l'Homme et cela avant l'ère chrétienne.
C'est pourquoi les différentes époques sont déterminées d'après l'usage de certains métaux : âge du bronze, âge du fer, révolution industrielle…
Jusqu'à l'époque néolithique (environ 6000 av. J.-C.), les métaux étaient principalement utilisés à l'état pur et en petite quantité, notamment pour la bijouterie.
Vers 4300 av J.-C., débute en Europe l'Âge du cuivre. C'est au cours de cette période que se développent et se diffusent les techniques d'extraction du minerai et du métal, de la fonte de celui-ci et de son utilisation pour la confection d'outils.
Une ère nouvelle voit le jour lorsque vers 3500 av JC, en Égypte, on découvre le bronze, alliage de cuivre et d'étain, métal plus résistant que le cuivre. Le bronze sera alors largement utilisé, notamment pour la confection d'objets quotidiens, d'armes, de bijoux et d'outils.
L'évolution des techniques entraîne la création de nouveaux métiers et va ainsi renforcer les relations commerciales.
À partir de 1200 av JC, le fer, de par sa large disponibilité, prend la place du bronze. Cependant, malgré son abondance, le fer est difficile à travailler. Dans un bas fourneau, on obtenait à partir du minerai de fer et du charbon de bois, une masse de fer et de scories. Un forgeage laborieux permettait de séparer les scories du fer et donnait à la masse métallique ainsi obtenue la forme désirée.
Il faut attendre le 14e siècle pour que se diffuse la technique permettant d'atteindre de hautes températures (environ 1500 °C) dans des hauts-fourneaux hors-sol et à l'aide de soufflets. Cette technique permettant d'obtenir du fer liquide en grande quantité n'évoluera pratiquement pas jusqu'à la révolution industrielle au 19e siècle.
L'importance considérable de la consommation de bois a d'ailleurs conduit à une déforestation dès le 14e siècle en Europe. La production d'un kilo de fer nécessitait un apport en énergie équivalent à environ 125 kg de bois.
En 1709, Abraham Darby est parvenu à allumer un haut fourneau avec du coke[5]. Dès la fin du 18e siècle, le coke a remplacé le charbon de bois, ce qui a eu pour conséquence de déplacer l'extraction du métal dans les régions d'exploitation du charbon.
En 1784, les fours à pudler, inventés par Henry Cort, permettent de réduire la teneur en carbone du fer.
Parallèlement à l'amélioration constante des fours et de la métallurgie, l'essor de la machine à vapeur et du chemin de fer contribuent grandement au développement de cette industrie puisque les techniques de production améliorées y trouvent une utilisation réelle et concrète.
La machine à vapeur devient un outil important dans les hauts-fourneaux, les forges et les laminoirs. Le chemin de fer se rend indispensable pour le transport des matières premières et des produits semi-finis.
C'est grâce au procédé Bessemer que les techniques du fer franchissent une nouvelle étape: l'invention du convertisseur permet la production d'acier directement à partir de la fonte brute, en insufflant de l'oxygène.

5.1. Le métal

Le terme « métal » vient du grec « metallon » qui signifie mine. On désigne par métal les éléments chimiques dont les atomes sont liés entre eux par une structure cristalline avec des électrons libres.
Cette liaison métallique particulière confère aux métaux les propriétés physiques suivantes : haute densité, haute résistance, grande capacité de déformation, point de fusion élevé et bonnes conductivités thermique et électrique.
Leur forte conductivité thermique fait que les métaux apparaissent comme une matière froide et dure bien que le rayonnement solaire absorbé par une surface métallique provoque un réchauffement important de celle-ci.
Les métaux sont formables ou déformables et leur surface est souvent brillante excepté lorsqu'ils sont oxydés.
Une des particularités des métaux est la déformation plastique sous l'effet de fortes sollicitations

Gisement

Bien que la plupart des éléments chimiques soient des métaux, ceux-ci représentent à peine 15 % de la croûte terrestre.
Les métaux peuvent donc être considérés comme une ressource non renouvelable dont la quantité du stock varie fortement selon le type de métal.
Seuls les métaux précieux comme l'or et l'argent se trouvent à l'état « natif » c.-à-d. à l'état pur dans la nature.
Les métaux utilisés dans le bâtiment comme le fer, l'acier, l'aluminium, le cuivre et le zinc sont des minerais (sulfures, carbonates ou silicates). Par l'action de l'homme, ceux-ci sont transformés en oxydes par différents procédés de préparation, avant de pouvoir être fondus dans les hauts-fourneaux.

Distinction

En fonction de leur densité, on fait la distinction entre les métaux lourds ($\rho > 4500$ kg/m³) et les métaux légers ($\rho < 4500$kg/m³).
On distingue les métaux ferreux (fer, acier, fonte) des métaux non ferreux (cuivre, zinc, plomb, aluminium).
Les métaux peuvent également être classés en fonction de leur composition. On distingue les métaux purs constitués d'atomes d'un seul élément chimique et les alliages qui sont des mélanges de plusieurs éléments métalliques et non métalliques comme le phosphore ou le silicium.

Structure chimique d'un métal

Les métaux sont des éléments caractérisés par une structure cristalline et granulaire.

5 Coke: combustible provenant de la carbonisation ou de la distillation de la houille.

La structure d'un métal est caractérisée par des liaisons métalliques permettant la cohésion de ses atomes. Les atomes mettent en commun un ou plusieurs électrons et constituent ainsi un assemblage d'ions positifs entouré d'un nuage d'électrons libres. Les liaisons électrostatiques qui s'opèrent au sein du matériau sont fortes et l'empilement ionique est ordonné, régulier et périodique. C'est ce qui définit une structure ou réseau cristallin.
Au sein des métaux, on répertorie différents modèles cristallins avec chacun des géométries différentes.
À l'échelle du micron ou du millimètre, chaque réseau cristallin prend la forme d'un « grain ».

5.2. Propriétés des métaux

Les propriétés des métaux sont tout d'abord déterminées par la constitution des réseaux cristallins et ensuite de l'agencement des ces réseaux entre eux (ou la répartition et les joints des grains). Cette structure spécifique conditionnera également leur façonnage et mise en œuvre.

Éclat « métallique »

Une de caractéristiques principales des métaux est leur aspect ou éclat « métallique ». Une fois polis, ces matériaux réfléchissent la lumière et peuvent même dans le cas d'un miroir (couche métallique déposée sur du verre) renvoyer une image parfaite.
Les métaux sont également à l'origine d'effets colorés et/ou réfléchissants que l'on retrouve dans certaines peintures ou autres matériaux de construction ou décoration.
Un matériau ou une matière dite « métallisée » contient soit du métal dans sa masse, soit en couche superficielle.

Isotropie

Les métaux sont considérés comme des matériaux isotropes, c.-à-d. qu'ils ont le même comportement dans les trois directions de l'espace.

Dureté

Les métaux sont classés parmi les matériaux de construction les plus durs. Un matériau est considéré comme « dur » lorsqu'il résiste à la pénétration et à l'abrasion.
C'est d'ailleurs la raison pour laquelle ils sont utilisés pour la fabrication d'outils et d'armes depuis des millénaires.

Résilience

Les métaux sont dits « résilients ». Cette caractéristique désigne la résistance aux chocs c.-à-d. la capacité à absorber une énergie mécanique en peu de temps à une température donnée.
Un matériau de faible résilience est dit « fragile ».
À titre d'exemple plus un acier est froid, plus il est fragile. Par contre plus on monte en température, plus l'acier sera à même d'être travaillé.

Élasticité

L'élasticité est l'aptitude d'un matériau à reprendre sa forme initiale après avoir été sollicité. L'acier et les alliages métalliques sont en général considérés comme parfaitement élastiques jusqu'à un certain point appelé « limite élastique ».

Plasticité et ductilité

La plasticité désigne l'aptitude d'un matériau à subir, sans rupture, une déformation permanente et irréversible.
La ductilité est l'aptitude à l'étirement sans rupture.
Les métaux possèdent ces deux qualités permettant ainsi des mises en œuvre de la matière à froid comme le pliage ou le profilage.

Conduction de l'électricité

Les métaux sont en général de bons conducteurs d'électricité, en particulier le cuivre, l'argent, l'aluminium et l'or.
Cette propriété s'explique par la nature des liaisons métalliques qui permettent la circulation d'électrons libres au sein du réseau cristallin, ceux-ci conduisant l'électricité à travers le matériau.

Conduction de la chaleur et dilatation

Pour des raisons similaires à la conduction d'électricité, les métaux sont en général de bons conducteurs de chaleur. Cette caractéristique s'accompagne souvent d'un phénomène de dilatation : lorsqu'on élève la température d'un métal, celui-ci se dilate. Cette dilatation est en général réversible; on parle alors de retrait.
Cette caractéristique est à prendre en compte de manière impérative dans la conception des pièces métalliques et des assemblages, en particulier pour le moulage ou la soudure où la dilatation et le retrait peuvent entraîner des déformations ou des ruptures.

Corrosion

Tous les métaux sont sujets à la corrosion, à des degrés divers, de manière plus ou moins visible et en fonction des conditions climatiques auxquelles ils sont exposés.
La corrosion la plus commune désigne l'altération d'un matériau par réaction chimique. C'est une réaction de dégradation liée au contact avec l'oxygène ou l'eau (humidité) : le métal retourne à son état d'oxyde naturel. Les exemples les plus connus sont les altérations chimiques des métaux à l'air ou dans l'eau, telles la rouille du fer et de l'acier ou la formation de vert-de-gris sur le cuivre et ses alliages.
Les métaux les plus vulnérables à cette corrosion sont la fonte et l'acier. D'autres métaux supportent mieux la corrosion en créant une couche de protection empêchant la progression de la corrosion, c'est notamment le cas du cuivre, du zinc, de l'aluminium et du plomb. D'autres métaux comme l'or, le chrome et le titane ré-



Illustration AN.46: Oxydation du cuivre - Bâtiment KBC - Anvers

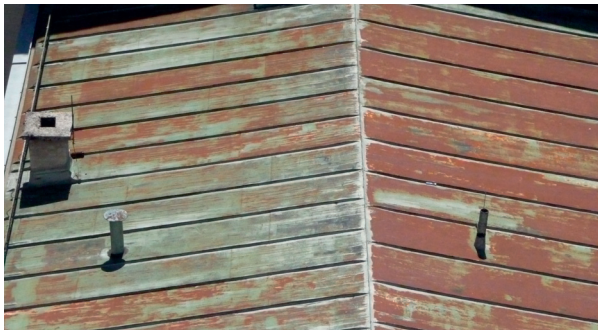


Illustration AN.47: Oxydation d'une toiture métallique - Munich



Illustration AN.48: Acier Cor-ten - boulangerie à Clabecq
Architecte: bureau Calimucho

sistent exceptionnellement bien à la corrosion.
Une corrosion électrochimique ou par galvanisation peut se produire par effet de « pile » lorsque différents métaux entrent en contact : les rôles d'anode et de cathode se répartissent et certains électrons migrent d'un métal à l'autre, fragilisant ainsi un des deux.
L'association de certains métaux entre eux nécessite donc une attention particulière à la conception.
Ce type de corrosion est également utilisé comme système de protection de certains métaux. C'est notamment le cas de la galvanisation : traitement au zinc de l'acier.

Comportements au feu

Les métaux ne sont pas inflammables, mais ils perdent cependant leur stabilité à haute température.
Pour exemple, la température limite de l'acier se situe, selon la section du profilé, entre 500° et 600 °C.
À titre préventif, les structures et éléments porteurs en acier doivent être soumis à des mesures de protection « incendies » telles que l'enrobage, le remplissage, le revêtement par des matériaux ininflammables ou l'installation de systèmes d'extinction.

Alliages

Les métaux sont rarement utilisés purs. Les alliages sont des combinaisons d'un métal avec un ou plusieurs autres éléments chimiques.
Un métal pur a des caractéristiques mécaniques relativement faibles. Le fait d'ajouter d'autres éléments permet d'augmenter les caractéristiques mécaniques. Ces ajouts permettent également de modifier les caractéristiques chimiques des métaux, en particulier leur comportement à la corrosion, ou d'améliorer d'autres caractéristiques comme leur facilité de mise en œuvre.
Le métal principal, la plus importante partie du mélange, est appelé « métal de base » ou « base ». Les éléments ajoutés volontairement sont appelés « éléments d'alliage» et les éléments non désirés sont appelés impuretés.
Les éléments d'alliages sont le plus souvent des métaux, mais peuvent également être d'autres éléments chimiques: le carbone dans l'acier ou la fonte, le silicium dans l'aluminium, etc.
Généralement, quand l'élément d'alliage n'est pas un métal, sa proportion reste faible. Ainsi, la concentration de carbone est inférieure à 2 % en masse pour l'acier et inférieure à 7 % en masse pour la fonte, alors qu'il est possible de faire un alliage cuivre-zinc (laiton) avec 50 % de chacun des éléments.
Les alliages se déclinent en de nombreuses nuances qui sont constamment perfectionnées.
Quelques alliages connus :

- le bronze, mélange d'étain et de cuivre, est l'un des premiers alliages que l'homme a travaillés;
- la fonte et l'acier, alliages de fer et de carbone;
- le laiton, alliage de cuivre et de zinc;
- l'acier inoxydable, alliage de fer et de carbone auquel on ajoute du chrome et selon les besoins du nickel, du molybdène…

5.3. Propriétés environnementales et sanitaires

Consommation importante d'énergie

Bien que les métaux présentent de nombreuses propriétés intéressantes pour le secteur de la construction et les autres secteurs industriels, leur bilan environnemental est relativement conséquent. La fabrication d'acier, d'aluminium, de cuivre... à partir de matières premières est à la fois très énergivore et très polluante.
Cependant la métallurgie est, avec la verrerie, le premier secteur industriel à avoir développé le recyclage des matériaux.
Les métaux ont un potentiel de recyclage élevé. Ils peuvent, sans perte de qualité pour le produit fini ou semi-fini, être intégralement réintroduits dans le processus

de fabrication. Cela permet non seulement de diminuer de manière notable la consommation d'énergie nécessaire à la fonte (ou refonte), mais également de limiter sensiblement l'extraction de matières premières.
Le taux de recyclage des déchets métalliques se situe aujourd'hui autour des 90 % à presque 100 % pour l'acier. C'est donc une filière non négligeable en termes de production.

Consommation de ressources non renouvelables et présentes en quantité limitée

Bien que la plupart des éléments chimiques soient des métaux, ceux-ci représentent à peine 15 % de la croûte terrestre.
Les métaux et les minerais nécessaires à leur fabrication sont des ressources non renouvelables présentes en quantité limitée.
Certains métaux comme le cuivre, bien que présents en quantité relativement importante sur la croûte terrestre, ne peuvent être extraits que pour une petite partie du stock, étant donné les technologies actuelles d'extraction. Diverses estimations des réserves de cuivre disponibles pour l'extraction vont de 25 à 60 ans.

Exploitation, extraction et impact sur le paysage

L'exploitation et l'extraction des métaux et/ou minerais se fait soit dans des mines à ciel ouvert, soit dans des mines souterraines.
L'exploitation de certaines de ces mines entraîne une modification conséquente de l'environnement immédiat et des paysages et peut provoquer des pollutions importantes : poussières, bruits, mais également pollution des eaux de surface ou souterraines et pollution des sols.

Aspect santé - métaux lourds

Suivant les paramètres répertoriés par la directive européenne» Produits de Construction, les métaux utilisés à l'intérieur des bâtiments n'émettent pas de COV, de particules ou de fibres; ils ne favorisent pas le développement de micro-organismes; ils n'émettent pas de radioactivité.
Par contre, ils peuvent influer sur l'environnement électromagnétique, en particulier à proximité de sources de champs électromagnétiques comme les lignes électriques ou les transformateurs.
Le plomb, le cadmium, le mercure et l'arsenic appartiennent à la catégorie des métaux lourds selon leur densité élevée. Ces métaux ont la particularité d'être toxiques, même à de faibles concentrations. Leur caractère persistant signifie qu'ils ne se dégraderont pas, ni dans l'environnement ni dans le corps humain.
Le plomb peut occasionner une diminution du développement physique et des performances intellectuelles chez les enfants, et un accroissement de la tension artérielle et de la fréquence des maladies cardio-vasculaires chez les adultes.
Le méthyle de mercure peut entraîner des perturbations du développement normal du cerveau des enfants et, à doses plus élevées, des modifications neurologiques chez les adultes.
Le cadmium est surtout dangereux pour les reins.
Les risques pour la santé sont cependant limités étant donné les mesures environnementales qui ont été prises (essence sans plomb, collecte des piles usagées, peintures sans métaux lourds...).

5.4. La fonte, le fer et l'acier dans la construction et l'architecture

Il y a souvent, dans le langage courant, confusion entre l'acier, le fer et la fonte. Ces trois métaux distincts sont définis selon leur teneur en carbone (C):

- moins d'un pourcent pour le fer qui est mou et ductile;
- de 0,15 à 2 pourcents pour l'acier qui est dur, élastique et plastique;
- de 2,5 à 4 pourcents pour la fonte qui est très dure, cassante et difficile à travailler.

Le secteur de la construction utilise aujourd'hui une multitude de produits, pièces ou éléments métalliques: pièces en fonte, câbles étirés, armatures en acier, treillis, tubes, profilés, rondelles, vis, tôles...
Les métaux, essentiellement le fer, l'acier et la fonte, mais aussi l'aluminium, le cuivre, le zinc… sont utilisés de manière invisible ou visible dans de nombreuses applications : éléments de structure, renforts structurels, éléments de fixation ou d'assemblage d'autres matériaux, éléments de châssis, tôles de parement, tôle de couverture…
Les propriétés particulières du fer (fonte et acier) en font un matériau de grande valeur qui est devenu incontournable dans le secteur de la construction.
Le fer a joué un rôle prépondérant tout au long de notre histoire même s'il n'est que rarement utilisé à des fins pacifiques, comme matériau de base pour la bijouterie et la confection d'outils ou d'objets quotidiens.
Ses champs d'utilisation sont nombreux au cours des époques de l'histoire de la construction.

5.5. Métallurgie et sidérurgie : production et façonnage des métaux

La métallurgie désigne toutes les étapes de transformation du minerai au métal jusqu'à la fabrication de produits semi-finis.

Production des métaux

En termes de production , il faut distinguer la production des métaux ferreux et des métaux non ferreux.
La sidérurgie est définie comme l'ensemble des techniques permettant d'élaborer et de mettre en forme le fer, la fonte et l'acier. En sidérurgie, l'acier est produit actuellement de deux manières :

- dans un haut-fourneau, à partir du minerai de fer et de coke avec réduction du carbone dans un convertisseur. On parle d'acier « sauvage »;
- dans un four électrique, à partir d'acier de récupé-

ration. On parle d'acier « de recyclage » ou d'acier « électrique »

Les deux filières se rejoignent ensuite pour affiner l'acier obtenu et élaborer différentes nuances d'alliages selon les besoins. Vient ensuite le façonnage de l'acier et des alliages.

La production de métaux non ferreux est spécifique à chaque métal. Cette production sera brièvement détaillée lors de la description des différents métaux non ferreux.

Façonnage des métaux

En termes de façonnage, on fait la distinction entre façonnage à froid, façonnage à chaud et traitement mécanique.

Les différents procédés de façonnage des métaux sont le forgeage, le coulage, le laminage, le pressage, l'étirage et l'usinage mécanique.

- Forgeage

Le forgeage est effectué de manière artisanale ou par des machines au moyen d'une enclume et d'un marteau ou à l'aide de moules de pressage. Le forgeage est un processus de façonnage qui peut s'effectuer selon le type de métal à chaud ou à froid. Il permet d'obtenir différentes formes.

- Laminage

Les pièces métalliques usinées sont façonnées en plusieurs étapes dans un laminoir, à travers un ensemble de rouleaux et de cylindres successifs. Sous l'effet d'une forte pression exercée par les rouleaux, le métal subit une réduction d'épaisseur et un allongement significatif. Ce procédé de façonnage peut se dérouler à chaud ou à froid.

- Pressage

Par pressage (ou repoussage), le métal est passé par pression au travers d'une ouverture de forme spécifique. Ce procédé de façonnage convient parfaitement aux métaux non ferreux, dont l'aluminium. Il permet d'obtenir des profils ou sections complexes comme des châssis de fenêtres.

Ce procédé de façonnage peut se dérouler à chaud ou à froid.

- Usinage mécanique

L'usinage mécanique des métaux concerne un vaste secteur des produits de construction : fraisage, perçage, limage, sciage, tournage, cintrage, gauffrage… Ces techniques permettent d'obtenir notamment des vis, des charnières, des tôles avec un dessin spécifique, différentes mailles…

Traitements

Les propriétés mécaniques des métaux peuvent être modifiées par des traitements thermiques, une fois les éléments ou profilés réalisés ou façonnés. Ces traitements thermiques consistent à modifier la structure du matériau :

- le recuit : la pièce métallique est chauffée à une température de 500° à 850 °C, maintenue à cette température puis refroidie lentement. Les tensions internes du métal sont ainsi relâchées, rendant ainsi la matière plus malléable et facile à travailler.
- la trempe : la pièce métallique est chauffée à une température supérieure à 800 °C, maintenue à cette température puis refroidie brutalement avec de l'eau, de l'huile, de l'air ou du gaz. Deux types de trempes peuvent être envisagées: dans la masse ou superficielle. Le métal devient dans les deux cas dur, mais également cassant.
- le revenu : une fois la trempe réalisée, on chauffe à nouveau la pièce métallique de façon à atténuer les effets négatifs de la trempe.

5.6. Techniques d'assemblage

Il existe différentes techniques d'assemblage des métaux. On peut notamment citer les assemblages réversibles comme les vis, clous, rivets et boulons et les as-



Illustration AN.49: Bardage métallique - usine

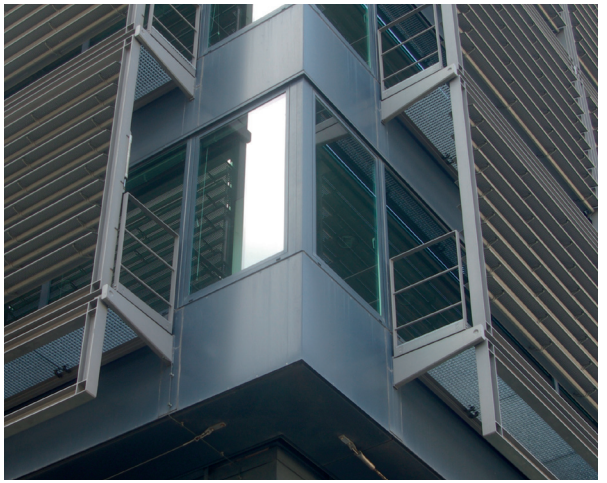


Illustration AN.50: Protections solaires en aluminium - Anvers

semblages irréversibles comme la soudure, le brasage et le collage.
L'assemblage par soudure consiste à assembler par liaison de matière deux pièces métalliques en les faisant « fondre » à leurs points de contact.
Le brasage est un assemblage qui consiste à lier deux pièces métalliques en faisant « fondre » sur le point de contact de celles-ci un métal dont le point de fusion est plus bas que les deux pièces à assembler.

5.7. Les métaux ferreux

Le fer et ses alliages – principalement l'acier – répondent à de nombreuses applications techniques dans la construction et font toujours l'objet d'une forte demande.

Fer

Le fer est un élément chimique, de symbole Fe et de numéro atomique 26. Le fer est le métal le plus utilisé dans le monde. Les gisements de fer se placent, après l'oxygène, le silicium et l'aluminium à la quatrième place des éléments chimiques disponibles dans la nature (avec environ 5 %).
Le fer brut contient environ 4 % de carbone et est très cassant.
Le fer est traité pour fabriquer de l'acier et de la fonte ainsi que d'autres alliages ferreux.

• Production

Dans les hauts-fourneaux, le minerai de fer est mélangé à de la chaux puis réduit en fer à une température de 1500 °C.
Les matières non métalliques présentes dans le minerai laissent alors des scories et dégagent des gaz.
Le carbone présent dans le fer se dissout partiellement. On obtient ainsi du fer brut contenant du carbone.
Le fer brut étant plus lourd que les scories, il descend dans le haut-fourneau et peut être ainsi récupéré ou retiré au cours du processus.

• Recyclage

Le fer est facilement récupérable au milieu d'autres déchets au moyen d'un tri magnétique.
Le fer est recyclable à l'infini. Le recyclage permet de faire des économies de minerai, d'eau et d'énergie (60 % à 80 % d'économie par rapport à la fabrication de fer à partir du minerai). En outre, l'adjonction de déchets de fer dans la production offre également l'avantage d'améliorer la qualité du fer brut.

La fonte

La fonte est un alliage de fer contenant plus de 2 % de carbone. On y rencontre également du silicium et du manganèse en proportions variables, ainsi que des impuretés comme le soufre et le phosphore
Il existe deux types majeurs de fonte :
• la fonte grise : sombre, moulable, fragile ;
• la fonte d'affinage : claire, destinée à être forgée.
Au départ de la fonte grise, on fabrique le fer de fonte grise qui est utilisé en construction.

• Caractéristiques de la fonte grise (valeurs moyennes)[6]

- masse volumique:	7200 kg/m³
- module de Young:	100.000 N/mm²
- coeff. de Poisson:	0.25
- résistance à la traction:	200 N/mm²
- résistance à la compression:	800 N/mm²
- réaction au feu - Belgique:	A0
- réaction au feu - Europe:	A1

L'acier

L'acier s'élabore actuellement de deux manières :
- dans un haut-fourneau, à partir de minerai de fer et de coke avec réduction du carbone dans un convertisseur ;
- dans un four électrique, à partir d'acier de récupération. On parle d'acier de recyclage ou d'acier électrique.

Dans les hauts-fourneaux, on extrait le fer de son minerai. Le minerai et le coke solides sont enfournés par le haut dans le gueulard. L'air chaud (1 200 °C) insufflé à la base provoque la combustion du coke. L'oxyde de carbone ainsi formé va « réduire » les oxydes de fer, c'est-à-dire leur prendre leur oxygène et, de ce fait, isoler le fer. Il se chargera cependant en carbone au fur et à mesure de sa descente dans le haut-fourneau et se transformera en fonte. À la sortie du haut-fourneau, ces oxydes sont récupérés à l'état liquide, avec la gangue du minerai. Leur densité moindre les fait flotter au-dessus de la fonte. Ce résidu est appelé laitier du haut-fourneau et est principalement exploité pour la fabrication du ciment.

• Caractéristiques d'un acier de construction AE 235 (valeurs moyennes)[7]

- masse volumique:	7850 kg/m³
- module de Young:	210.000 N/mm²
- coefficient de Poisson:	0.30
- résistance à la traction:	400 N/mm²
- résistance à la compression:	400 N/mm²
- réaction au feu - Belgique:	A0
- réaction au feu - Europe:	A1

Les alliages d'acier

• Acier inoxydable

Les aciers résistants à la corrosion sont regroupés sous le terme «acier inoxydable». Ces alliages contiennent au moins 10 % de chrome et d'autres métaux comme le nickel, le molybdène, le titane... Les aciers inoxydables ont la particularité de former une couche de protection appelée «couche passive» qui se renouvelle en cas de détérioration.

6 Source: [ZASTAVNI 2010]

7 Source: [ZASTAVNI 2010]

Dans la mesure où ces aciers ne nécessitent pas de revêtement de surface, ils sont facilement recyclables; ce qui est un avantage puisque la fabrication de ceux-ci est très énergivore.
Les aciers inoxydables peuvent subir différents traitements de surface: brossage, ponçage, sablage ou gravure à l'acide.
Ils sont fort présents en construction: revêtement de façade, garde-corps, main courante, tubages, ferrures, systèmes de fixation, etc.

• Acier Cor-Ten

Les alliages d'acier avec du cuivre, du chrome, du nickel et du phosphore forment peu à peu, en cas d'exposition aux intempéries, une couche de rouille résistante qui leur sert de protection.

5.8. Les métaux non ferreux

Nous n'aborderons ici que les métaux ayant des applications dans le bâtiment comme le zinc, l'aluminium ou le cuivre.

Aluminium

L'aluminium est un élément chimique, de symbole Al et de numéro atomique 13. C'est un métal pauvre, malléable, de couleur argentée. Il est remarquable pour sa résistance à l'oxydation et sa faible densité. C'est le métal le plus abondant de l'écorce terrestre et le troisième élément le plus abondant après l'oxygène et le silicium; il représente en moyenne 8 % de la masse des matériaux de la surface solide de notre planète.
L'aluminium n'a été réellement découvert qu'au 19e siècle. Son extraction étant relativement complexe, il a été à l'origine considéré comme un métal noble.

• Production

L'aluminium est produit à partir de la bauxite où il est présent sous forme d'oxyde hydraté. Par un procédé comparable à celui utilisé pour le fer, on extrait l'alumine (hydroxyde d'aluminium) du minerai grâce à une lessive de soude. L'alumine est ensuite chauffée à 1200 °C et transformée en oxyde d'aluminium.
L'adjonction de la cryolithe (Na_3AlF_6) fait baisser sa haute température de fusion (environ 2000 °C). À partir de ce mélange, on obtient de l'aluminium grâce à une température d'environ 1000 °C et le passage d'un courant électrique.
La production d'une tonne d'aluminium nécessite de quatre à cinq tonnes de bauxite[8]. Elle consomme également une très grande quantité d'énergie et les sous-produits de l'électrolyse contribuent à la pollution de l'environnement: lors de l'électrolyse, sont émis des gaz tels que du dioxyde de carbone, du monoxyde de carbone, des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et des fluorures gazeux.

• Recyclage

L'aluminium a une excellente recyclabilité théorique, mais il faut le collecter, le trier et le faire fondre. En plus des bénéfices environnementaux, le recyclage de l'aluminium est beaucoup moins coûteux que l'extraction à partir du minerai de bauxite. Il nécessite 70 % à 90 % d'énergie en moins et une tonne d'aluminium recyclé permet d'économiser quatre tonnes de bauxite. En sautant l'étape de l'électrolyse, qui réclame beaucoup d'énergie, on évite également les rejets polluants qui lui sont associés.
L'aluminium est quasiment recyclable à l'infini sans perdre ses qualités, à condition de ne pas fondre dans un même bain des alliages de composition différente.
Le recyclage de l'aluminium a commencé à être pratiqué dans les années 1900 et a régulièrement progressé : dans la consommation d'aluminium en Europe, la part d'origine recyclage est passée de 50 % en 1980 à plus de 70 % en 2000.

8 Source: WIKIPEDIA: aluminium

• Caractéristiques d'un aluminium 6061 (valeurs moyennes)[9]

- masse volumique:	2700 kg/m³
- module de Young:	70.000 N/mm²
- coefficient de Poisson:	0.33
- résistance à la traction:	280 N/mm²
- résistance à la compression:	280 N/mm²
- réaction au feu - Belgique:	A0
- réaction au feu - Europe:	A1

• Utilisations

L'aluminium est utilisé dans le bâtiment sous forme de profilés extrudés pour les ossatures ou structures secondaires, les châssis de fenêtre ou encore les montants et traverses de façade. Il peut également être utilisé sous forme de tôles plates ou formées pour les façades ou les toitures.
Il est encore fortement utilisé pour l'aménagement intérieur et la décoration des espaces : boîtiers de lampes, ferrures, mobilier…
L'aluminium est léger, facile à façonner, à travailler. Les éléments en aluminium peuvent être fraisés, sciés et/ou percés.
Grâce à sa grande ductilité, la fabrication de profilés extrudés exige bien moins d'énergie que celle de profilés en acier.
L'aluminium s'oxyde directement à l'air en formant une couche de protection résistante qui le rend donc très durable dans le temps.

Zinc et zinc-titane

Le zinc est un élément chimique, de symbole Zn et de numéro atomique 30.
Son principal minerai est la sphalérite, un sulfure de zinc.
Les réserves mondiales estimées de zinc étaient de 250 millions de tonnes en 2010, détenues principalement

9 Source: [ZASTAVNI 2010]

par l'Australie (21,2 %) et la Chine (16,8 %).

• Production

La production de zinc à partir de minerai est effectuée dans deux filières technologiques distinctes : la pyrométallurgie et l'hydrométallurgie suivie d'une électrolyse.

Les opérations du procédé pyrométallurgique sont :

- grillage du sulfure de zinc pour obtenir un oxyde de zinc;
- réduction de l'oxyde pour obtenir du zinc métallique;
- affinage du zinc par liquation et distillation pour supprimer les impuretés comme le plomb ou le fer.

Les opérations du procédé hydrométallurgique sont :

- grillage du sulfure de zinc pour obtenir un oxyde de zinc et supprimer certaines impuretés (fer);
- lixiviation pour solubiliser le zinc sous forme de sulfate de zinc;
- cémentation pour éliminer les impuretés : cobalt, nickel, cadmium et cuivre de la solution de sulfate de zinc;
- électrolyse pour transformer le sulfate de zinc en zinc métal.

• Recyclage

Le zinc est un matériau recyclable. Il peut être indéfiniment recyclé sans aucune perte de ses propriétés physiques ou chimiques. À l'heure actuelle, environ 30 % de la consommation mondiale de zinc provient de zinc recyclé . Le recyclage du zinc s'effectue à partir de produits divers récupérés. La récupération du zinc se fait également à partir des chutes de fabrication et de transformation, comme les résidus de galvanisation, les poussières et les cendres de fours, les débris de fonte et les chutes provenant de la mise en forme des pièces de laiton.

• Caractéristiques du zinc laminé recuit à chaud (valeurs moyennes)[10]

- masse volumique:	7100 kg/m³
- module de Young:	85.000 N/mm²
- coeff. de Poisson:	0.25
- résistance à la traction:	120 N/mm²
- résistance à la compression:	120 N/mm²
- réaction au feu - Belgique:	A0
- réaction au feu - Europe:	A1

• Utilisations

C'est principalement du zinc-titane que l'on retrouve dans le bâtiment. Les tôles en zinc-titane permettent de réaliser des parements de façade, des revêtements de toiture, des chéneaux et des conduites.

Il existe également différents alliages de zinc qui peuvent être utilisés dans la construction comme le zamak pour les ferrures.

Un des principaux domaines d'utilisation du zinc est la protection contre la corrosion des éléments de construction en acier : la couche de zinc s'oxyde en formant une fine couche de protection très résistante. Les procédés sont nombreux : galvanisation à chaud, pulvérisation ou encore zingage par galvanisation…

Cuivre

Le cuivre est un des rares métaux qui existent à l'état natif. Ce qui explique probablement pourquoi il fut le premier et le plus ancien métal utilisé par les hommes: les plus anciennes traces de fusion du cuivre dans des fours à vent ont été découvertes sur le site archéologique de Sialk III datant de la première moitié du Ve millénaire av. J.C

Le cuivre est un élément chimique de symbole Cu et de numéro atomique 29.

Naturellement présent dans la croûte terrestre, il est essentiel au développement de toute forme de vie. Avec l'or, le cuivre pur est le seul métal coloré ; il présente sur ses surfaces fraîches une teinte rose saumon.

Les réserves mondiales estimées de cuivre s'élevaient à 630 millions de tonnes en 2008, dont près du quart au Chili.

• Production

Il n'existe plus dans la nature à l'état natif, comme dans l'Antiquité. Il se présente sous forme de sels contenant 30 à 90 % de cuivre. Selon la forme des gisements et leur profondeur, il existe 2 types d'exploitation : les mines à ciel ouvert et les mines souterraines.

• Recyclage

Le cuivre est un métal qui se prête particulièrement bien au recyclage : il est recyclable à l'infini, sans altération ni perte de performances.

Le processus de recyclage permet une économie d'énergie jusqu'à 85 % par rapport à la production de cuivre primaire. D'autre part, le recyclage émet moins de gaz à effet de serre.

En 2008, 2,5 millions de tonnes de cuivre recyclé ont été utilisées en Europe, soit 43 % de l'utilisation totale sur la période selon l'ICSG .

Le recyclage provient de 2 sources :

- la revalorisation du « cuivre secondaire » issu des produits arrivés au terme de leur cycle de vie, qui sont récupérés, triés et dont le cuivre peut être refondu ;
- la réintroduction directe des chutes d'usine dans le processus de production

Parmi les applications contenant les plus fortes proportions de cuivre et présentant le potentiel de recyclage le plus élevé, on peut citer les câbles, les canalisations, les valves et les raccords, les toitures et bardages cuivre, les moteurs industriels, l'équipement ménager, ainsi que l'équipement informatique et électronique.

• Caractéristiques du cuivre pur recuit (valeurs moyennes)[11]

- masse volumique:	8930 kg/m³
- module de Young:	120.000 N/mm²
- coefficient de Poisson:	0.35
- résistance à la traction:	210N/mm²
- résistance à la compression:	210 N/mm²
- réaction au feu - Belgique:	A0

10 Source: [ZASTAVNI 2010]

11 Source: [ZASTAVNI 2010]

- réaction au feu - Europe: A1

• Utilisations

Le cuivre est un métal ductile, malléable et résistant à la corrosion. Cette résistance à la corrosion lui confère une très grande durabilité dans le temps.
Le cuivre est facile à travailler, à souder et à abraser, mais difficile à fondre.
Il possède une conductivité électrique et une conductivité thermique particulièrement élevées qui lui confèrent des usages variés. Il entre également dans la composition de nombreux alliages (les laitons, les bronzes et les cupro-aluminiums) qui permettent d'améliorer sa résistance.
Dans le bâtiment, le cuivre est utilisé dans de nombreuses applications: câblage électrique, appareillage électrique, canalisations de chauffage et d'eau chaude sanitaire, barres et profilés, tôles pour façades et toitures…

• Patine

Le cuivre, contrairement au zinc, résiste à la chaux, au plâtre et au ciment. Placé à l'air, le cuivre se corrode et se patine en formant, sur environ 8 ans en milieu urbain, une couche de protection étanche, verdâtre et constituée de sels de cuivre. Au cours de ce processus de corrosion, la teinte du métal passe du rouge brun au brun foncé et gris jusqu'à la teinte gris vert typique.
Sous l'effet de l'acide acétique, un sel de cuivre peut se former sur l'élément en cuivre ; celui-ci est appelé «vert-de-gris ». Le vert-de-gris, contrairement à la patine du cuivre, est toxique et soluble dans l'eau.

Alliages de cuivre et de zinc

Les alliages cuivreux connaissent de larges applications dans le bâtiment. Ces alliages contiennent au moins 50 % de cuivre et sont faciles à mettre en forme et à façonner.

• le bronze

Le bronze se forme dans un bain de fusion à 1000 °C et contient 10 à 20 % de zinc.
Il possède une grande durabilité dans le temps et est très résistant aux intempéries. Le bronze est plus dur que le laiton et le cuivre. Il présente une surface sombre qui lorsqu'elle est polie, apparaît avec des reflets dorés.
Le bronze a été et est encore fortement utilisé pour la création de sculptures et objets décorant l'espace public.
Le bronze est également utilisé pour l'assemblage des conduites, pour réaliser des ferrures et des armatures.
Dans les bâtiments historiques et anciens ou dans certains bâtiments de prestige, les châssis de fenêtres et de portes étaient réalisés au moyen de profilés en bronze

• le laiton rouge

Le laiton rouge est un alliage de cuivre, de zinc (1 à 10 %) et d'étain (1 à 10 %). Le laiton est très résistant à la corrosion. Il peut être traité à chaud comme à froid et ensuite poli pour donner un aspect doré.
Avec le temps, sa surface devient mate et sombre.
Le laiton est utilisé pour fabriquer des bornes de raccordement, des vis et des écrous, des armatures et de nombreuses ferrures.
Il peut également être utilisé comme élément décoratif sous forme de parement ou de «tissus métalliques».

• le maillechort

Le maillechort est un alliage de cuivre comprenant entre 50 et 60 % de cuivre et entre 10 et 25 % de nickel et de zinc.
Le maillechort permet de réaliser des surfaces de contact en électrotechnique, mais également des ferrures, de la robinetterie et des armatures.



Illustration AN.51: Mélange d'aluminium et cuivre oxydé - Bâtiment KBC à Anvers



Illustration AN.52:Revêtement de toiture en zinc - Anvers

6. Liants minéraux, mortiers et produits dérivés

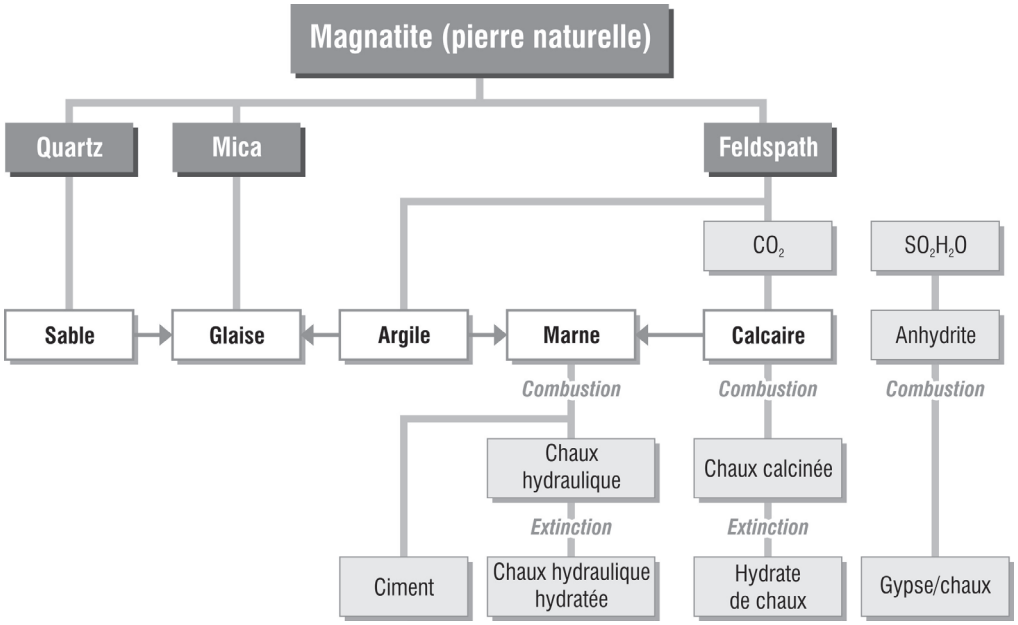


Illustration AN.53: Descriptif des matériaux et produits à base de liants minéraux



Illustration AN.54 : Mises en œuvre de produits à base de liants minéraux

Les liants minéraux ainsi que les matériaux de construction avec des liants sont connus depuis des millénaires: les Phéniciens, les Égyptiens et les Grecs utilisaient déjà du mortier de plâtre et de la chaux pour leurs travaux de maçonnerie ainsi que comme couche d'enduit de protection.
Les liants minéraux assemblent entre eux des agrégats comme le sable ou divers granulats. Ils sont utilisés dans la fabrication de mortiers, d'enduits, mais également de produits en béton, de blocs de maçonnerie, de plaques…
Les mortiers sont des liants additionnés de charges inertes, le plus souvent des sables.
Les bétons sont des mortiers additionnés de granulats (agrégats, sables…)
Ces matériaux de liaison sont de deux types :

- les liants aériens qui font prise au contact du dioxyde de carbone contenu dans l'air;
- les liants hydrauliques qui font leur prise au contact de l'eau.

Les différentes propriétés comme la dureté, la perméabilité à la vapeur, la résistance à la compression et l'élasticité sont déterminées par le processus chimique de la prise.

6.1. Les différents liants minéraux

Les différents liants minéraux utilisés dans le secteur de la construction sont le plâtre, la chaux, les liants à base de magnésie et le ciment.
Le gypse ($CaSO_4 2H_2O$), ou pierre à plâtre est la roche naturelle qui permet la fabrication du plâtre.
Le plâtre est un matériau de construction servant d'enduit et de liant. Il est utilisé sous sa forme semi-hydratée ($CaSO_4 ½ H_2O$) et sous forme anhydre ($CaSO_4$).
La chaux vive (CaO) est fabriquée au départ du carbonate de calcium ($CaCO_3$) que l'on trouve dans la roche calcaire, la craie et les coquillages.
Pour la construction, on utilise la chaux aérienne hydratée ($Ca(OH)_2$) et la chaux hydraulique (CaO + argile cuits ensemble).
Le ciment est un liant hydraulique composé principalement de chaux et de silice, auquel s'ajoutent de l'alumine et de l'oxyde de fer.
Les principaux liants minéraux seront décrits ci-après.

Le plâtre

Le plâtre est initialement produit à partir du gypse naturel. Le plâtre est également, et de plus en plus souvent, produit à partir de gypse de synthèse (phosphogips ou sulfogips) produit par le traitement des fumées des centrales thermiques ou à partir de déchets industriels.
Le gypse naturel est un minéral extrait en carrière sous forme de petits cristaux blancs agglomérés en blocs. Il provient d'une roche sédimentaire constituée de sulfate de calcium hydraté et cristallisé.
L'eau représente environ 20 % de cette pierre et c'est par sa déshydratation partielle lors d'une cuisson qu'on obtient le plâtre.
Cette roche sédimentaire est généralement extraite de mines ou de carrières souterraines puis cuite et ensuite cassée, broyée et moulue pour donner la poudre blanche du plâtre.
Le plâtre (semi-hydraté) est obtenu en chauffant le gypse à une température entre 120° et 180 °C, puis en le broyant. La poudre obtenue est un liant qui durcit très vite une fois additionné d'eau.
Le plâtre anhydraté (anhydrite) s'obtient en cuisant le gypse à des températures de 270 °C, parfois jusqu'à 1100 °C. La poudre obtenue additionnée d'eau devient très dure, résiste aux intempéries et est de couleur rougeâtre ou gris clair.
Le plâtre est utilisé dans la fabrication d'une multitude de produits : blocs, plaques, éléments moulés et d'enduits (mélangés avec différents agrégats). Ces différents produits de construction sont résistants au feu, car sous l'effet de la chaleur, le plâtre restitue l'eau contenue dans ses cristaux.
Le plâtre est également utilisé dans certains mélanges de béton où son adjonction réduit la vitesse de prise.

- Historique[12]

Le plâtre est un des plus anciens matériaux de construction fabriqués par l'homme, avec la terre cuite et la chaux.
Pour l'obtenir, il suffit de cuire très modérément la pierre de plâtre, roche relativement répandue à l'état naturel.
Le plâtre est utilisé dès le 8e millénaire avant J.-C. en Syrie et en Turquie pour fabriquer des enduits, des sols, des récipients.
Les Égyptiens se servaient du plâtre pour assembler les pierres des édifices et pour réaliser des enduits. C'est notamment le cas de la grande pyramide de Chéops dont les blocs sont grossièrement maçonnés au plâtre.
Dans son traité, le philosophe grec Théophraste mentionne au 3e siècle avant J.-C. l'emploi du plâtre dans la confection d'enduits, d'éléments d'ornementation, de fresques, de bas-reliefs et de la statuaire.
Les Romains se servaient du plâtre pour les enduits et les sculptures. Les murs des habitations sont enduits de plâtre et de chaux, les plafonds faits de bois et de plâtre. Il peut servir dans la maçonnerie pour unir les pierres les unes aux autres. Les artisans romains développent aussi son emploi comme revêtement extérieur: les tons d'ocre rouge proviennent d'un mélange de briques finement broyées, de pouzzolane, de plâtre et d'eau. Le stuc, fait de plâtre et de poudre de marbre, est utilisé avec éclat pour l'ornementation des édifices.
Pline l'Ancien signale également son usage dans de multiples utilisations domestiques.
Les Romains, par leurs conquêtes, vont largement diffuser le plâtre dans tout l'Empire romain et notamment en Gaule.
Au Moyen-Âge, puis sous l'Ancien Régime, les petites

12 Source: [ZASTAVNI 2010]

carrières et plâtrières furent nombreuses, mais elles fonctionnaient de manière intermittente. L'habitat local fit largement appel au plâtre.
Suite à l'incendie de Londres de 1666, des édits imposent ce matériau ignifuge en tant qu'enduit intérieur et extérieur, pour éviter les propagations d'incendies.
Au 18e siècle, l'utilisation du plâtre est généralisée à toute la construction et Paris devient la ville du plâtre grâce à ses gisements souterrains. En effet, des gisements de gypse se sont formés dans le bassin parisien par sédimentation au cours de l'évaporation de lagunes d'eau de mer.
Au 19e siècle, l'invention du four à plâtre industriel va permettre d'augmenter la production.

• Propriétés et utilisations

Les adjuvants et la proportion eau/gypse du mélange influencent la dureté du plâtre obtenu ainsi que le degré de maniabilité et la porosité.
Le plâtre semi-hydraté est utilisé comme ajout aux mortiers de chaux pour accélérer la prise, pour les blanchir et limiter leur retrait ou comme plâtre prêt à l'emploi moyennant 3 à 5 % d'adjuvants ;
Les propriétés du plâtre semi-hydraté sont une prise rapide, une dilatation de la matière à la prise, son pouvoir de corrosion de l'acier et sa sensibilité importante à l'eau.
Le plâtre anhydraté (anhydrite) est utilisé pour la réalisation de chapes (autolissant) et pour les enduisages de murs intérieurs.
Ses propriétés sont une prise rapide et un retrait quasi nul lors de la prise. Ce type de plâtre est « corrodé » par le ciment et imperméabilise les murs lorsqu'il est placé en enduit.
De manière générale, le plâtre naturel est un matériau qui agit favorablement sur le climat intérieur grâce à sa capacité d'absorption et de restitution de la vapeur d'eau. Cependant, vu sa sensibilité à l'eau, ce matériau n'est pas adapté pour les pièces humides.

• Fabrication

La fabrication du plâtre nécessite plusieurs étapes. Une fois extrait et acheminé par camion jusqu'aux installations de production, le gypse subit une opération de concassage et de criblage. Le gypse est ensuite stocké en tas dans un hangar couvert. Les différentes couches de gypse ainsi stockées seront mélangées afin d'assurer une certaine homogénéité.
Le gypse est ensuite conduit dans des fours tubulaires rotatifs où il sera d'abord broyé, concassé, moulu puis porté à des températures aux alentours de 150 °C.
Ce procédé permet d'obtenir plusieurs sortes de plâtres selon le degré d'hydratation du sulfate de calcium : semi-hydraté ($CaSO_4$½ H2O) et/ou anhydre ($CaSO_4$).
Des additifs peuvent être mélangés au plâtre, en très faible quantité, par exemple de l'amidon, pour améliorer l'adhésion entre le plâtre et le carton ou des retardateurs pour modifier les temps de prise.
Le plâtre obtenu est ensuite mélangé à de l'eau, appelée eau de gâchage. Cette adjonction d'eau fait durcir à nouveau le plâtre à l'air avec une réaction exothermique. Cela signifie que la réaction de combustion est inversée lors de la réaction de durcissement où l'eau de gâchage est stockée sous forme d'eau de cristallisation.

La chaux

La chaux est une matière généralement poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire. Elle est utilisée en construction depuis l'Antiquité.

• Historique

La plus ancienne application de la chaux date de 12 000 ans av. J.-C. en Turquie. Elle est mentionnée dès le 5e siècle av. J.-C. lors de la construction des citernes de Jérusalem.
Vers 6000 ans av. J.-C., les habitants de Jéricho (Palestine) l'employaient comme liant pour leurs maçonneries en brique.
L'utilisation des mortiers de chaux se retrouve également durant l'Antiquité chez les Grecs et chez les Égyptiens. Dès le 7e siècle av. J.-C., les Grecs employaient de la chaux mélangée avec du marbre concassé pour en faire des enduits. Les réservoirs que le roi David fit construire à Jérusalem en -1000 av. J.-C sont enduits d'un mélange de chaux et d'argile.
On rencontre des mortiers de chaux à Kars et à Babylone (vers -600 av. J.-C), dans les Longs Murs d'Athènes (vers -450 av. J.-C), dans certains segments de la grande muraille de Chine (vers -300 av. J.-C) ainsi que pour la stabilisation de sols pour en augmenter la portance.
La chaux ne sera employée couramment qu'à l'Époque romaine. Sa fabrication et ses usages sont décrits par Caton (De re rustica) et par Vitruve (De architectura).
Ce sont les recherches menées par l'architecte anglais Smeaton sur une chaux qui résiste à l'eau de mer qui mènent à la découverte des premiers liants modernes. En 1756, il obtient une chaux hydraulique au départ d'une pierre calcaire qui contient de l'argile.

• Types de chaux, propriétés et utilisation

Il existe différentes chaux que l'on distingue par rapport à leur utilisation dans la construction. Celles-ci sont des mélanges d'oxydes et d'hydroxydes de calcium, de magnésium, de silicium et de fer.
La chaux vive est le produit direct de la pyrolyse (cuisson entre 800° et 1000 °C dans des fours verticaux ou des fours rotatifs horizontaux) du calcaire, dont le principal composant est l'oxyde de calcium (CaO). La chaux vive est broyée à la sortie du four. Ce type de chaux ne peut être utilisé tel quel dans la construction.
En raison des différents processus de durcissement, on distingue encore la chaux aérienne et la chaux hydraulique.
La chaux aérienne (ou chaux éteinte ou hydratée) est obtenue par la réaction de la chaux vive avec de l'eau. Elle est constituée surtout d'hydroxyde de calcium

($Ca(OH)_2$).
Elle est dite « aérienne » car elle réagit avec le dioxyde de carbone (CO_2) de l'air ambiant.
La chaux aérienne durcissant à l'air, elle est utilisée dans la composition de mortiers (une part de chaux pour une part de ciment et pour six parts de sable) et dans la réalisation de plafonnages (méthodes traditionnelles).
Utilisée dans la composition de mortiers, elle rend ceux-ci plus faciles à mettre en œuvre, leurs procure une meilleure adhérence et une meilleure étanchéité.
La chaux hydraulique contient en plus des silicates et des aluminates, car elle provient de calcaires argileux. Elle est appelée « hydraulique » parce qu'elle durcit en présence d'eau.
La chaux hydraulique naturelle est fabriquée par la cuisson (entre 900 et 1000 °C) de carbonate de calcium ($CaCO_3$) ayant une grande teneur d'argile. Elle n'est pratiquement plus fabriquée aujourd'hui.
La chaux hydraulique artificielle est un mélange de ciment, de poudre de calcaire, et souvent d'adjuvants (un retardateur de prise et un entraîneur d'air). Elle ne contient donc pratiquement plus de chaux.
La chaux hydraulique durcit aussi bien à l'eau qu'à l'air. Elle est utilisée pour la réalisation de mortiers et d'enduits (intérieurs et extérieurs).
Utilisée dans les mortiers et les enduits, elle rend ceux-ci plus faciles à mettre en œuvre, augmente le temps disponible pour la mise en œuvre et diminue le risque de fissures
De manière générale, les chaux sont utilisées en construction pour leurs propriétés hygroscopiques c.-à-d. leur capacité à stocker et à restituer l'humidité, propriétés qui améliorent le confort et le climat intérieur.

- Précautions à prendre lors de l'utilisation de chaux vive

La chaux vive est un produit potentiellement dangereux, principalement employé dans l'industrie et l'agriculture.
En cas de mélange de grandes quantités de chaux vive et d'eau, la chaleur dégagée est telle que l'eau peut se mettre à bouillir et projeter de la chaux, qui est corrosive. Il est de ce fait conseillé :
- d'utiliser des lunettes et des gants lors de la manipulation ;
- de verser progressivement la poudre dans l'eau et non pas l'inverse ;
- de brasser le mélange eau/chaux vive tout au long de sa préparation, ceci afin de limiter les risques de projection.

Ciments

Les ciments sont des liants hydrauliques pour les mortiers et les bétons. Ils se distinguent des autres liants minéraux par leur grande résistance. Les ciments sont composés de chaux, de silice, d'alumine et d'oxyde de fer (Fe_2O_3).
Les cimenteries s'installent d'ailleurs souvent à proximité des gisements de ces matières premières. Celles-ci sont transformées dans un four à une température de 1450° à 2000 °C, ce qui nécessite une consommation d'énergie importante (69 % de l'énergie consommée par le processus de fabrication[13]).
La Belgique produit annuellement près de 7 millions de tonnes de ciment dont environ 5 millions sont destinés à être utilisés à l'intérieur des frontières. Les 2 millions restants sont exportés, en majorité vers les Pays-Bas, l'Allemagne et la France. Ce faisant, les cimenteries belges consomment chaque année environ 600 000 tonnes d'équivalents pétrole[14].
L'industrie cimentière utilise des combustibles alternatifs aux combustibles fossiles traditionnels sous forme de sous-produits ou déchet : des schistes de terril, du coke de pétrole, des pneus et huiles usagées et dans une moindre mesure des déchets de bois et de papier, des matières plastiques, des déchets industriels… Conscient de la dépense énergétique engendrée par le processus de fabrication, le secteur cimentier a déjà réduit ses consommations d'électricité et de combustible d'environ 30 % au cours de ces trente dernières années. En termes d'utilisation de ressources, les cimentiers intègrent de plus en plus souvent des matières « secondaires » telles que des cendres volantes, du laitier de hauts-fourneaux dans la composition des bétons, ce qui diminue également la demande en combustibles.
Les ciments font l'objet de la norme NBN EN 197-1/2000. Ils sont désignés par les lettres CEM suivies d'un chiffre romain spécifiant le type.

Tableau AN.6 : Désignation des différents ciments

Appellation abrégée	Appellation	Composition
CEM I	ciment Portland	95 à 100 % clinker
CEM II	ciment Portland composé	60 à 95 % de clinker
CEM III	ciment de hauts-fourneaux	20 à 65 % de clinker 35 à 95 % de laitier
CEM IV	ciment pouzzolanique	45 à 90 % de clinker
CEM V	ciment composé	20 à 65 % de clinker

L'adjonction d'eau fait durcir les ciments de manière exothermique aussi bien à l'air que sous l'eau. Ce processus chimico-physique est appelé hydratation ; il débute dès le premier contact d'un grain de ciment avec l'eau : une pâte de ciment apparaît tout d'abord ; cette pâte passe ensuite de l'état liquide à l'état visqueux puis se durcit complètement lors de la prise.

13 Source : [EVRARD 2005]
14 Source : [EVRARD 2005]

• Fabrication du ciment

Étape 1 : clinkerisation

Pour fabriquer du ciment, il faut réunir quatre éléments principaux selon des dosages préétablis : la chaux (65 %), la silice (20 %), l'alumine (10 %) et l'oxyde de fer (5 %).

L'ensemble de ces éléments, appelé cru, est ensuite traité en installations procédant par voie humide ou par voie sèche, suivant la teneur en eau du calcaire ou de la craie.

Dans la voie humide, le cru est broyé et malaxé avec de l'eau pour constituer une pâte liquide qui est homogénéisée et stockée dans de grandes cuves cylindriques. Cette pâte est ensuite introduite dans la partie supérieure du four.

Dans la voie sèche, le cru est séché puis broyé. Il est ensuite homogénéisé dans de grands silos. Il est enfin introduit sous forme pulvérulente dans une tour de préchauffage où la décarbonatation se déroule partiellement, avant d'entrer dans le four proprement dit.

Les fours rotatifs de cimenteries sont légèrement inclinés. Leur lente rotation permet d'acheminer progressivement la matière à contre-courant des gaz chauds. L'intérieur est revêtu de briques réfractaires. La flamme (à environ 2.000 °C) provoque une réaction physico-chimique, dite «clinkérisation», des différents oxydes. La clinkérisation débute vers 1.450 °C. Les granules incandescents doivent être refroidis rapidement. On obtient ainsi des grains solides à 150 °C : c'est le clinker, qui est transporté vers d'énormes silos de stockage.

Étape 2 : broyage

La deuxième étape, qui va conduire au ciment, s'appelle le broyage. Cette étape consiste à doser les différents constituants, puis à les mélanger et à les broyer de façon à obtenir une poudre homogène et très fine : le ciment. Le clinker est le constituant de base des ciments Portland. Il peut être broyé avec d'autres matières premières industrielles ou naturelles:

- le laitier de haut-fourneau qui, lui aussi, est hydraulique;
- les cendres volantes de centrales électriques au charbon, qui ont des propriétés pouzzolaniques;
- les fillers, qui sont des matières souvent très fines et généralement à base de calcaire.

Différentes formes de sulfate de calcium (gypse, anhydrite) sont utilisées dans le mélange, afin de réguler le temps de prise du ciment, ce qui facilite sa mise en œuvre.

La machine traditionnellement utilisée dans cette deuxième étape est le broyeur à boulets. De nouvelles techniques de broyage sont développées aujourd'hui - avec pour objectif de réduire drastiquement la consommation d'électricité - notamment les broyeurs à rouleau et les broyeurs verticaux.

6.2. Mortiers

Le mortier est un mélange de liant, d'eau, de sable et d'adjuvants. Ces différents composants sont mélangés soit sur chantier, soit en atelier pour le mortier industriel. Celui-ci est d'ailleurs souvent préféré, car sa composition est plus précise.

Le sable doit être pur et propre. On emploie le plus souvent des sables jaunes (ou sable de carrière), plus fins, pour la réalisation de mortiers à maçonner et leurs joints.

Les sables rudes par exemple les sables de rivière ou les « sables du Rhin » sont plutôt employés pour les cimentages ou la confection des bétons.

Les sables les plus fins ou sables blancs sont utilisés pour les mortiers de jointoiement pour joints fins entre carrelages.

La quantité d'eau doit être minimale, au risque d'obtenir un mortier de mauvaise qualité (poreux, retrait important, durcissement lent, mauvaise résistance). Inversement, un mortier trop sec est impossible à mettre en œuvre.

On distingue plusieurs types de mortiers :

- les mortiers frais industriels : ce sont des mortiers courants, prêts à l'emploi qui contiennent un adjuvant retardateur de prise qui permet une utilisation pendant 36 heures;
- le mortier industriel prémélangé : c'est un mélange de chaux aérienne ou hydraulique et d'adjuvants auquel on rajoute sur chantier et en fonction des exigences de l'eau et d'autres liants;
- le mortier industriel sec : mélange disponible en sacs ou à la sortie des silos auquel on rajoute de l'eau (quantité précisée par le fabricant) sur chantier.

Ils doivent être mis à l'abri du vent, des précipitations, d'une sécheresse excessive, du gel.

Les mortiers peuvent améliorer la protection acoustique et thermique ainsi que la protection ou la résistance au feu des ouvrages.

Selon l'usage, on fait la distinction entre les mortiers de maçonnerie et les mortiers d'enduit.

À titre indicatif, en volume, on est souvent proche des proportions suivantes[15] :

	Maçonner	Jointoyer	Enduit
ciment	1	1	1
chaux	0 à 1	2	2
sable	3 à 6	8	5

Le mortier de maçonnerie doit assurer la liaison entre les différents éléments de construction : moellons, pierres, blocs ou briques. Ces liaisons doivent résister à la pression et au cisaillement.

Le mortier d'enduit, en tant que couche plus fine et plane, doit assurer une protection des murs et des plafonds contre les intempéries (si l'enduit est extérieur),

15 Source: [ZASTAVNI 2010]

contre le climat intérieur, contre les sollicitations mécaniques (coups, griffes…) ou servir de support à un autre revêtement.

Mortiers de maçonnerie ou mortiers de jointoiement

• Composition

La composition du mortier est prescrite selon la technique de mise en œuvre utilisée (jointoiement «en montant » ou jointoiement «après exécution de la maçonnerie»), les caractéristiques des briques ou des blocs de maçonnerie, les caractéristiques du mortier de maçonnerie mis en œuvre, de l'exposition du parement à jointoyer et des conditions climatiques lors du jointoiement. La Note d'Information Technique du CSTC (NIT 208 «Jointoiement des Maçonneries ») spécifie de manière claire les différentes compositions en fonction des usages ou exigences.

• Jointoiement

Le jointoiement peut s'effectuer :

- au fur et à mesure de l'avancement du travail de maçonnerie. Ce jointoiement « en montant » est pratiqué par le maçon avant durcissement du mortier de maçonnerie. Lors de cette opération, il ajoutera, si nécessaire, du mortier afin d'assurer la continuité du joint;
- soit après réalisation et durcissement de la maçonnerie. Ce jointoiement ultérieur est généralement réalisé par un entrepreneur spécialisé en jointoiement.

Le choix de la teinte du mortier et du type de joint influence considérablement l'aspect du parement.

Le jointoiement « en montant » ne nécessite aucun préparatif spécial, pas même le grattage des joints. Il requiert dès lors moins de main-d'œuvre que la seconde technique. En revanche, comme il s'effectue au moyen de mortier de maçonnerie, le choix des teintes s'en trouve limité et les risques de nuances au sein de ces dernières accrus.

Le jointoiement «après exécution de la maçonnerie» peut faire appel à des mortiers spéciaux et permet donc de répondre à des exigences particulières en matière d'aspect (coloris et texture) et de dureté du joint.

En termes de joint, on distingue:

• selon la localisation de la surface du joint par rapport à celle de la brique ou du bloc:
  - joint plein (affleurant)
  - joint creux (en retrait ou repoussé)
  - joint saillant
• selon l'orientation de la surface du joint :
  - joint parallèle au parement
  - joint en glacis
  - joint en glacis inversé
• selon la forme du joint :
  - joint plat
  - joint profilé
• selon la structure de la surface du joint :
  - joint lissé à la dague
  - joint brossé diagonalement à la brosse dure
  - joint peigné
  - joint tamponné à la brosse dure après une certaine prise.

6.3. Éléments et produits de construction liés par un liant minéral

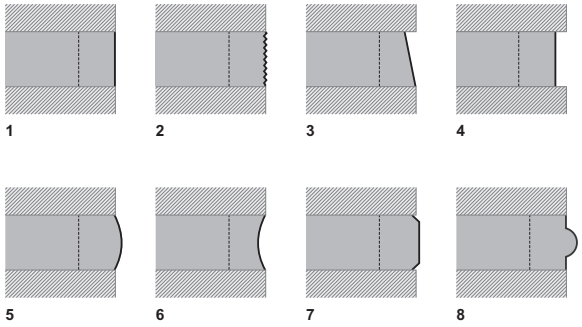
Briques / blocs de béton cellulaire

Le béton cellulaire est formé d'un mélange de ciment, de sable, de chaux, d'eau et de poudre d'aluminium. Le mélange est étuvé en autoclave (traitement chaleur + pression + vapeur).

Les composants sont d'abord dosés et soigneusement mélangés. Ensuite le mélange est coulé dans de grands moules.

Une réaction chimique provoque un dégagement gazeux, base de la structure cellulaire.

Après quelques heures, arrivée à consistance suffisante, la pâte ainsi formée est débitée en blocs aux dimen-



1. Joint plat à fleur de parement et lissé
2. Joint plat à fleur de parement et brossé
3. Joint en glacis
4. Joint plat en refend ou en retrait
5. Joint arrondi en saillie ou bombé
6. Joint concave
7. Joint saillant
8. Joint baguette

Illustration AN.55 : Différents types de joint



Illustration AN.56 : Blocs de béton cellulaire



Illustration AN.57 : Mise en œuvre des blocs de béton cellulaire

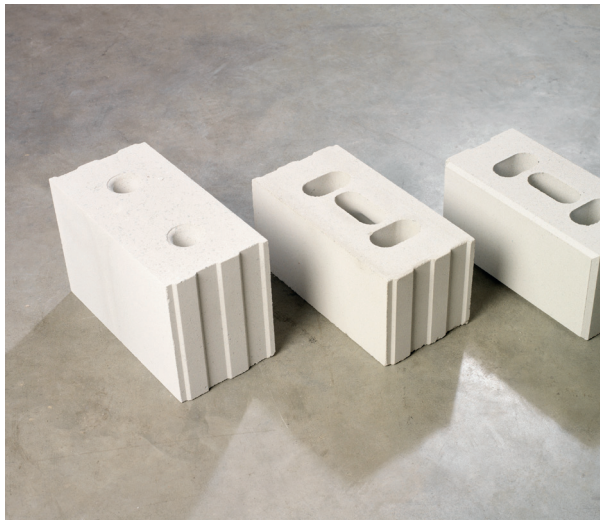


Illustration AN.58 : Blocs silico-calcaire

sions requises, ne présentant que de faibles tolérances. La croûte, excédent de matériau, est récupérée et entre à nouveau dans le cycle de production.
Les produits ainsi obtenus passent ensuite dans l'autoclave où, baignés dans des hautes pressions de vapeur et des températures de l'ordre de 180° à 200 °C, ils acquièrent dureté et stabilité.
Le béton ainsi produit a jusqu'à 80 % de pores (ou de vides) ce qui lui confère à la fois les caractéristiques d'une pierre (solide, dur, indéformable, imputrescible et ininflammable) et les caractéristiques d'un isolant.
Le béton cellulaire est utilisé pour produire des blocs à coller ou à maçonner, des éléments de murs préfabriqués (hauteur d'étage), des dalles de bardage sous forme de parallélépipèdes à poser horizontalement ou verticalement (bâtiments industriels), des dalles de cloison (hauteur d'étage), des poutres ou des linteaux préfabriqués ainsi que des précoffrages pour poutres et colonnes (en U).

Briques / blocs silicocalcaires

Les blocs et éléments en silicocalcaire sont des blocs de construction de couleur blanche conçus à base d'un mélange de sable et de chaux qui se solidifie par réaction avec adjonction d'eau. Le mélange est pressé dans des moules avant d'être étuvé dans un autoclave qui produit de la vapeur d'eau.
Ces blocs sont apparus au 19e siècle pour imiter la «pierre de France », grès naturel de couleur blanche utilisé de tout temps pour les constructions (cathédrales, façades…). Ils ont été mis au point en 1880 par le Dr Whilhelm Michaelis et leur fabrication industrielle a débuté en Allemagne vers 1894.
La chaux sert tout d'abord de liant à la masse obtenue après mélange. Dans l'autoclave, par réchauffement à la vapeur, l'hydrate de chaux réagit avec les grains de sable pour former des hydrosilicates de calcium.
Le silicocalcaire est utilisé pour fabriquer des blocs à coller, des blocs à maçonner ainsi que des blocs de grands formats destinés à des systèmes de préfabrication de murs.
Les briques ou les blocs ont une densité élevée ainsi qu'une grande résistance à la compression. Les produits en silicocalcaire sont également résistants au gel et résistants au feu.

Blocs de plâtre

Les blocs de plâtre sont composés de plâtre auquel on ajoute de l'eau et des matières à charges inorganiques ou des fibres. Leurs surfaces sont lisses et planes.

Mise en œuvre des blocs (béton cellulaire, silicocalcaire et plâtre)

Les blocs de béton cellulaire, les blocs silicocalcaires ainsi que les blocs de plâtre sont mis en œuvre par collage au moyen de mortier-colle dans le but d'obtenir une maçonnerie à joints minces (2 à 3 mm). Le mortier-colle est utilisable pendant environ 8 heures.
Des armatures préfabriquées en acier galvanisé peuvent également être utilisées :
- autour des baies de fenêtres et de portes;
- entre les joints de dilatation, dans le cas de murs longs;
- en poutre de ceinture.

Plaques de plâtre

Le temps de prise relativement bref de plâtre permet la production de plaques de grands formats pour l'habillage de murs et de plafonds ainsi que pour la réalisation de chapes sèches.
Les plus connues, les plaques de plâtre cartonnées sont fabriquées en bandes continues et recouvertes sur leurs deux faces de carton qui recouvre également les arêtes (épaisseurs) longitudinales.
Le carton est collé et ce contre-collage sert d'armature, reprend les forces de tension et permet de grandes portées.
Les plaques de plâtre sont faciles à travailler avec des

outils ordinaires : découpage, sciage, fraisage, perçage. Elles se fixent :
- sur des ossatures « secondaires » non porteuses métalliques ou en bois à l'aide de vis, de clous ou de chevilles;
- sur des supports minéraux (murs existants) à l'aide de mortier-colle.

Leurs principaux avantages sont un faible poids, une bonne résistance et une faible conductivité thermique. Les plaques de plâtre possèdent une proportion importante de micropores qui expliquent sa capacité de régulation hygrothermique.
Cependant les plaques de plâtre sont sensibles à l'eau, elles devront donc être protégées par un revêtement, un parement ou un enduit.
Les plaques de plâtre sont également utilisées comme habillage de protection au feu ; leur durée de résistance au feu dépend des agrégats et de l'épaisseur de la couche de protection (1 plaque, 2 plaques…).

• Types de plaques

Les plaques de plâtre sont des matériaux adaptés à la réalisation de surfaces verticales (murs) et horizontale s (plafonds et sols).
Il existe différents types de plaques répondant à une utilisation spécifique ou à certaines exigences :
- plaque de type A : plaque standard dont la face visible constitue le support pour l'enduisage ou le revêtement.
- plaque de type F : plaque répondant aux exigences de protection et de résistance au feu. Le plâtre contient en général des fibres minérales.
- plaque de type H : plaque adaptée aux locaux et pièces humides (plaques vertes).

Pour des besoins spécifiques, notamment des exigences acoustiques, les plaques de plâtre peuvent subir un traitement approfondi en atelier et être ainsi pourvues de perforations ou de fentes.

Plaques de fibroplâtre

Les plaques de fibroplâtre sont un mélange de plâtre et de fibres de papier issues du recyclage de celui-ci. Ces deux matières premières sont mélangées, puis, après addition d'eau – sans quelque liant que ce soit – elles sont comprimées et transformées en panneaux stables. Ces derniers sont séchés, imprégnés d'un produit imperméabilisant, puis découpés dans les formats requis. Les fibres servent d'armatures et augmentent ainsi la résistance de la plaque.
Les plaques offrent les mêmes avantages que les plaques de plâtre en termes de capacité hygrothermique, de résistance au feu et de conductivité thermique. Elles ont cependant une densité plus élevée et sont plus résistantes à l'eau.
Les plaques de fibroplâtre peuvent être utilisées pour la réalisation de chapes sèches (en construction neuve ou en rénovation). Les chapes sont obtenues par collage de deux ou trois couches de plaques de fibroplâtre.

Élément composite – plaque et isolant

Les habillages de murs et plafonds ainsi que les chapes sèches peuvent être réalisés au moyen d'éléments composites constitués d'une plaque de plâtre sur laquelle on applique par collage un isolant (polystyrène expansé, fibres minérales, fibres de bois).

Plaques de fibrociment

Les plaques ou panneaux de fibrociment sont fabriqués à partir de ciment (principalement du ciment Portland), d'eau et de fibres de renforcement (fibres synthétiques ou cellulose).
Les plaques ou panneaux de fibrociment sont principalement utilisés comme revêtement ou parement extérieurs (toitures et façades). Ils sont résistants aux intempéries, imperméables à l'eau, imputrescibles et incombustibles.

6.4. Impact environnemental et sanitaire des liants minéraux et produits dérivés

Consommation de ressources non énergétiques importantes

La fabrication de liants minéraux et de produits dérivés consomme des ressources naturelles non renouvelables, mais présentes en quantité relativement importante.
Selon la Febelcem, le secteur de la construction belge utilise 9 millions de tonnes de sable de sablière, de rivière ou de mer sur les 16 millions produits annuellement en Belgique.
Les fabricants de plâtre et de ciment récupèrent également des matières secondaires issues d'autres procédés industriels : sulfogypse, phosphogypse, laitier de hauts-fourneaux, cendres volantes...
La fabrication de ce type de matériau nécessite également une consommation relativement conséquente d'eau.

Consommation de ressources énergétiques importantes

Le processus de fabrication consiste essentiellement à chauffer les matières premières. Cette demande en chaleur nécessite une consommation importante d'énergie et implique également une pollution atmosphérique.
Pour réduire la consommation de combustibles fossiles traditionnels (charbon, fioul et gaz naturel), certains fabricants, dont les cimentiers, introduisent dans les fours des déchets à fort pouvoir calorifique, combustibles moins nobles, comme les schistes de terril, du coke de pétrole, des pneus et des huiles usagées. On introduit aussi, mais en plus faible quantité des déchets de bois et de papiers, des résidus de broyage automobile, des matières plastiques...
Il est cependant intéressant de constater qu'au cours de ces trente dernières années le secteur cimentier a réduit ses consommations d'électricité et de combustible d'environ 30 %.

Carrières et extraction des matières premières: impact sur la biodiversité et sur les paysages

L'exploitation des carrières a des conséquences sur la biodiversité puisqu'elle supprime sur quelques kilomètres carrés une zone d'habitat pour certaines espèces (faune et flore), mais également sur les paysages et la topographie des lieux d'implantation.
Les carrières sont également des sources importantes de bruits et d'émissions de poussières.
Il est également important de se poser la question de l'aspect social des carrières: si en Europe et en Belgique ce secteur d'activité a mis en place une politique sociale, ce n'est pas le cas dans certaines régions du monde où la plupart des travailleurs sont exploités et travaillent sans sécurité d'emploi, dans des conditions précaires de sécurité.

Propriétés sanitaires de la chaux[16]

La chaux hydraulique naturelle agit sur la qualité de l'air intérieur grâce à sa perméabilité à la vapeur et son pouvoir hygroscopique.
La chaux vive a également des qualités antiseptiques et désinfectantes. C'est d'ailleurs pour cette raison qu'elle était utilisée dans le temps pour chauler certaines parties de la maison et des fermes (écuries, étables).
L'alcanité[17] de la chaux nécessite le port de gants et de lunettes ainsi que des vêtements munis de manches pour éviter toute irritation cutanée et oculaire.

Propriétés sanitaires du plâtre[18]

La mise en œuvre de certains produits à base de plâtre peut entraîner l'émission de poussières. Celles-ci sont inertes et ne contiennent que des traces - en très faible quantité - de silice cristalline. Elles ne sont pas à l'origine du développement de fibroses pulmonaires.
L'utilisation de certaines colles peut entraîner l'émission de COV (collage des plaques, collage des blocs).
Les plaques de carton-plâtre ou de fibroplâtre, en cas d'exposition à une trop forte humidité, peuvent entraîner le développement microbien, essentiellement par la présence de constituants organiques (carton, fibres, additifs...).

Propriétés sanitaires du ciment[19]

Depuis 1936, il est reconnu que le ciment et sa manipulation sont à l'origine de maladies professionnelles et d'accidents graves, surtout lors d'une utilisation non professionnelle par des particuliers non avertis.
L'utilisation et la mise en oeuvre du ciment et des produits dérivés peuvent entraîner:

- des dermites allergiques des mains, provoquées par la présence de chrome hexavalent[20] et également par la présence de cobalt et de nickel;
- des dermites de contact provoquées par la présence de résines époxy ou certains additifs;
- des brûlures chimiques avec un risque potentiel de dégénérescence en cancer de la peau;
- problèmes oculaires : conjonctivites et inflammations des paupières;
- l'inhalation de poussières dont une partie (20 à 30 %) peut pénétrer profondément dans les poumons. Des problèmes d'allergie respiratoire sont susceptibles de survenir ainsi que des asthmes au chrome, encore trop souvent sous-estimés.

16 Source: [DEOUX 2006]
17 Alcanité
18 Source: [DEOUX 2006]
19 Source: [DEOUX 2006]
20 Chrome hexavalent (IV): le chrome hexavalent est l'allergène le plus répandu et un des plus sévères. Il crée une lésion cutanée caractéristiques appelée «trou de chrome» et provoque des dermatoses et de l'asthme allergique. Le chrome hexavalent est cancérogène et à l'origine de cancers bronchiques, essentiellement dans l'industrie des chromates. Source: [DEOUX 2006]

7. Le béton



Illustration AN.59 : Coque en béton armé - Lausanne

« Le béton, c'est de la pierre que nous fabriquons, bien plus belle et plus noble que la pierre naturelle.» Auguste PERRET

« Associé à l'uniformité, à la rigidité, à une couleur grisâtre, il en est pourtant l'exact contraire: le béton n'a aucune couleur, aucune texture ou forme prédéterminée. Il n'a pas d'apparence propre, mais une infinité d'apparences possibles. Et c'est là la révolution architecturale induite par le béton: être une pâte prête à la création.» Source: [KULA 2009]



Illustration AN.60 : Mises en œuvre intérieures et extérieures de bétons

7.1. Historique

Les origines du béton de terre remontent à l'Antiquité : en compactant à la main de la terre argileuse humide, on obtient, après séchage, un matériau, dont la composition, et certaines caractéristiques ou propriétés sont analogues à celles des bétons actuels.
Dans les Carpates, à Lepenski Vir, on rencontre des dallages datant de 5 500 ans av. J.-C. d'une composition proche du béton.
Fin du 3e siècle av. J.-C., les Romains ont introduit le mortier de chaux.
En 80 av. J.-C., dans les «Dix livres d'architecture», Vitruve a transmis la connaissance qu'avaient les Romains des mortiers :

- une partie de chaux éteinte avec trois parties de sable de cave (c.-à-d. de carrière), ou deux parties de sable de rivière ou de mer ; le mélange deviendra encore meilleur si on ajoute au sable de mer et de rivière une troisième partie de tuileaux pilés et cassés
- il recommande l'usage du sable volcanique, la poudre pouzzolanique (puluis puteolano) qui se trouve au pays de Baïes et dans les terres qui sont autour du Mont Vésuve.

En ajoutant de la pouzzolane à la chaux aérienne, on la transforme artificiellement en chaux hydraulique ; c'est la même transformation qui s'opère lorsqu'on mêle au mortier de la céramique pilée, recette mise à profit par les Romains pour leurs revêtements étanches.
Le mortier de chaux est utilisé pour le mêler aux moellons dans le massif de remplissage (opus caementicium), pour garnir les joints des pierres ou des briques ou comme enduit.
La distinction entre le béton des constructions romaines et le béton moderne réside dans la préparation ; le béton romain est un mélange dans le mur du mortier et des cailloux, tandis que le béton actuel est un mélange de mortier et de cailloux préparé à l'avance que l'on met en œuvre entre des coffrages sans y ajouter ensuite d'autres matériaux.
Au 14e siècle le mot « bétun » est employé pour le limon de rivière et la glaise plastique. Betun, becton, beter signifient se solidifier.
Pour la première fois, au 18e siècle, le terme de béton est introduit par l'ingénieur français Bélidor (1697-1761).
En 1824, l'Anglais Aspdin dépose un brevet pour la création d'un ciment artificiel, mélange de calcaire et de marne, calciné et moulu, appelé ciment Portland du nom de la péninsule anglaise d'où le calcaire fut extrait. Le ciment Portland a une résistance plus élevée que la chaux ou la pouzzolane.
En 1847, François Coignet (1814-1888) conçoit et réalise une maison en ciment coulé dans un coffrage et armé de fers profilés, ainsi qu'une terrasse à Saint-Denis (1852). On lui accorde la mise au point du procédé de béton armé qui fait l'objet d'un brevet en 1855 pour la construction d'une maison monolithique de trois étages.
En 1848, Lambot conçoit une barque en béton.
En 1849, Joseph Monier (1823-1906) construit les premiers bacs à fleurs armés d'un treillis métallique. Après avoir breveté en 1855 ses bacs à fleurs, il obtient une série d'autres brevets pour l'application du béton armé aux canalisations (1868), aux panneaux (1869), aux ponts (1873), aux escaliers (1875), aux poutres (1878), aux couvertures (1880). Les réalisations concrètes commencent immédiatement : un réservoir d'eau à Fontainebleau en 1868, suivi, en 1875, d'un premier pont d'une portée de 16 mètres.
En 1892, François Hennebique (1842-1921), un self-made-man, expérimente et fait breveter un système où poutres et poteaux forment un assemblage monolithique de planchers en hourdis. L'armature est constituée de fers ronds, maintenus par des étriers, rubans de fers plats ; l'étrier devient l'emblème de Hennebique.
Après 1892 : son entreprise crée 42 agences à l'étranger et environ 7000 productions parmi lesquelles les dalles du Grand et du Petit Palais pour l'Exposition universelle de Paris (1900).
L'architecte Auguste Perret (1874-1954) élabore un type de structure en béton armé constitué d'un squelette de piliers et de poutrelles, sur lequel s'appuient les structures horizontales, les remplissages extérieurs et les cloisons intérieures. En 1937, Perret réalise le Musée des travaux publics à Paris où il donne aux piliers l'expression de colonnes et exprime les poutres comme des poutraisons. La colonne de Perret exprime le système statique, en étant plus étroite vers le bas ; son expression renoue avec le rythme classique.
L'architecte et ingénieur Frank Lloyd Wright (1869-1959) utilisa également le béton armé et y apporta des innovations techniques et formelles, notamment dans les Laboratoires Johnson à Racine (1939), la maison de la cascade Kaufmann en Pennsylvanie (1939) ou le musée Guggenheim à New York (1959).
En 1926, P. Jeanneret, dit Le Corbusier (1887-1965), publie « Les cinq points d'une nouvelle architecture » qui intègrent les pilotis, les toits-jardins, le plan libre, la fenêtre en longueur et la façade libre. Ces préceptes ne peuvent se réaliser facilement qu'en béton armé.
En 1931, il réalise la villa Savoye à Poissy comme un manifeste de cette nouvelle idéologie.
Les œuvres de Pier Luigi Nervi (1891-1979) se distinguent également par une utilisation imaginative du béton armé. Ses bâtiments témoignent d'une connaissance intime du matériau et d'un compréhension réelle des mécanismes du report des charges.

7.2. Le béton en construction

Le mot « béton » est aujourd'hui un terme générique qui désigne un matériau de construction composite fabriqué à partir d'un mélange de granulats agglomérés par un liant et additionnés d'eau, assorti quelquefois d'adjuvants.
Sous le terme « béton », ont peut rencontrer :

- les bétons de terre ou d'argile : mélange de pierres et d'argile;
- les bétons de résine : mélange de granulats et de résine;
- les bétons de fibres : mélange de granulats, de fibres et de liant ;
- les bétons de ciment : mélange de granulats, de sables et de ciment;
- les bétons légers : granulats légers et liant.

Nous décrirons dans ce chapitre essentiellement les bétons de ciment.

Le béton est actuellement utilisé pour produire une multitude de produits de construction :

- un matériau prêt à l'emploi destiné à être coulé en place ;
- des blocs à maçonner pour maçonnerie portante ;
- des blocs à maçonner pour maçonnerie apparente ;
- des blocs à paver (klinkers), des bordures, des éléments de mobilier urbain ;
- des éléments de construction préfabriqués (murs, colonnes, éléments de façade, etc.) ;
- des poutres et des linteaux, des tuyaux préfabriqués ;
- des précoffrages (prédalles et pré-murs) ;
- des éléments de planchers (hourdis) ;
- des ardoises artificielles, des tuiles, des plaques de façade ;
- des dalles de bardage sous forme parallélépipèdes à poser horizontalement ou verticalement (voir bâtiment industriels) ;
- des routes en béton.

Les possibilités plastiques du béton sont nombreuses et illustrées ci-contre par quelques projets.

« Pierre ou aggloméré artificiel », le béton de ciment est issu d'un mélange durci de ciment, de granulats et d'eau. En fonction de la masse volumique des granulats, le béton sera considéré comme normal, léger ou lourd.

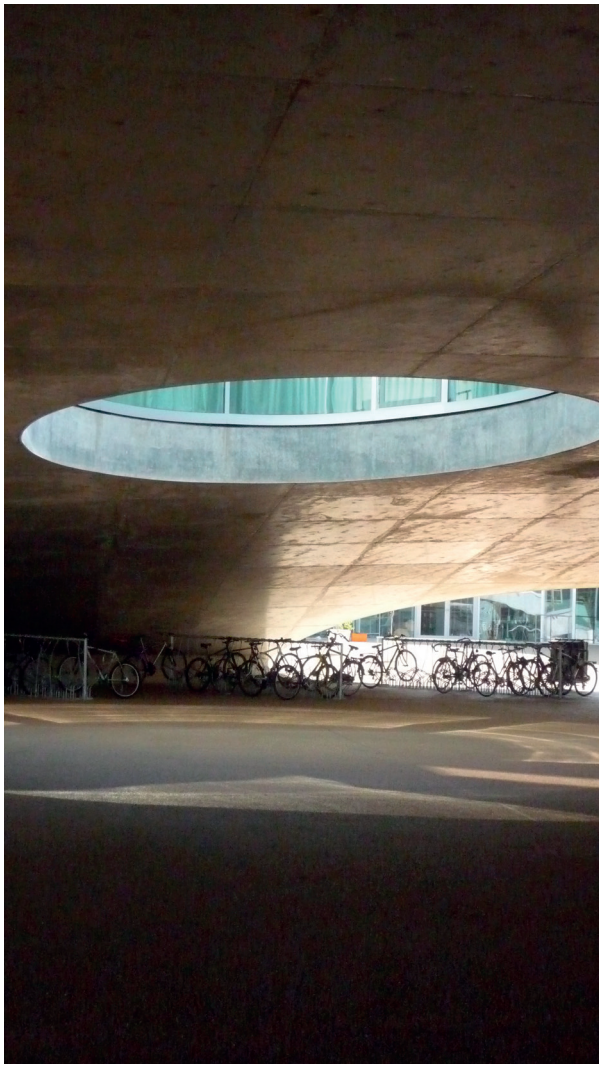


Illustration AN.61: Rolex Learning Center conçu par Sanaa, EPFL, Lausanne



Illustration AN.62 : Université de Louvain la Neuve
Architecte : Jacqmain



Illustration AN.63 : Bâtiment de bureau, chaussée de la Hulpe, Bruxelles
Architecte : C.Brodski

Le béton est un mélange précis de ciment, de granulats et d'eau. En règle générale, un mètre cube de béton normal comprend 2000 kg de granulats, 250 à 400 kg de ciment et 150 kg d'eau.
Dans ce mélange, le ciment joue le rôle de liant et modifie les qualités et usages du béton :
- le ciment Portland est utilisé dans la préparation des bétons armés;
- le ciment Portland composé est destiné aux travaux de dallage et aux routes;
- les autres types de ciment sont réservés aux travaux ne nécessitant pas une résistance particulière à la chaleur.

Autres composants essentiels du béton, les granulats se caractérisent par les propriétés intrinsèques de la roche dont ils sont issus. La coloration et les caractéristiques mécaniques et physico-chimiques des granulats influencent directement les propriétés esthétiques, mécaniques et de durabilité du béton.
Des adjuvants peuvent être ajoutés en faible quantité (moins de 10 kg/m^3) pour doter le béton de caractéristiques spécifiques :
- les réducteurs d'eau permettent de produire un béton de qualité égale ainsi qu'un béton très fluide, en utilisant moins d'eau;
- les superplastifiants ou fluidifiants, qui renforcent la fluidité, sont utilisés pour produire des bétons autoplaçants et autonivelants;
- les hydrofuges de masse rendent les bétons imperméables;
- les entraîneurs d'air rendent le béton insensible au gel et aux produits dégivrants;
- les accélérateurs de prise permettent de « décoffrer » rapidement;
- les retardateurs sont utilisés pour maintenir l'ouvrabilité du béton.

7.3. Fabrication des bétons

Le béton peut être livré frais c.-à-d. encore manipulable et coulé « in situ » ou mis en œuvre dans des usines à béton avant d'être livré sur chantier comme élément préfabriqué.

Coffrage

Le béton frais permet la création d'une multitude de formes. Il est mis en œuvre dans des coffrages. Ceux-ci sont réalisés à l'aide de planches ou de panneaux en bois, de tôles métalliques ou de moules en polyester.
Des cadres métalliques supportent les coffrages en bois de grandes dimensions
Des tiges de coffrage répartissent la pression du béton liquide. Cette opération laisse des «trous de banches» typiques des surfaces de béton apparent.
La fabrication du coffrage permet de donner forme à toute surface en béton, à condition de
pouvoir fabriquer la géométrie du coffrage.
La confection du coffrage est l'occasion de réfléchir à l'aspect des surfaces de béton une fois celui-ci décoffré. En jouant sur la surface du coffrage, on influence le relief de la peau en béton.
Les délais de décoffrage dépendent à la fois de l'élément de construction et de la résistance du ciment utilisé.

Coulage et compactage

En règle générale, le béton frais est coulé dans un coffrage à l'aide de tuyaux et de pompes puis densifié avec des appareils de vibrage et de compactage afin de minimiser la teneur en air et d'ainsi obtenir des surfaces fermées et une bonne liaison par adhérence à l'armature.
On utilise de plus en plus souvent un béton auto-compactant. Sa consistance, rendue plus fluide à l'aide d'adjuvants, permet de remplir le coffrage de béton sans mesure de compactage mécanique complémentaire. Ce type de béton est parfaitement adapté à la réalisation de murs apparents en béton et/ou aux éléments à géométrie plus complexe.

Armatures

Le béton possède une très bonne résistance à la compression, par contre, il ne résiste pas à la traction.
On lui intègre souvent des armatures en acier. L'armature du béton est faite de treillis soudés et de ronds à béton.
Le béton armé est coulé sur des cageots d'armatures en acier à béton placés dans les coffrages avant bétonnage.
Le mélange « béton / armatures en acier » constitue un matériau composite qui présente une bonne résistance à la traction et à la compression grâce à la solidarisation entre l'acier et le ciment durci.
Les armatures en acier empêchent également la formation de fissures liées au retrait.
Le béton précontraint est un béton mis en compression par des armatures tendues. Ces armatures sont soit des fils tendus dans le coffrage avant bétonnage (précontrainte), soit des câbles tendus dans des gaines qui traversent le béton (postcontrainte).
La teneur alcaline élevée du béton protège les armatures contre la corrosion (rouille)
La rouille est un processus d'oxydation qui requiert un pH acide pour se dérouler.
Au cours du temps, le béton de surface réagit avec le CO2 présent naturellement dans l'air ambiant et ce milieu s'acidifie progressivement. Dès que les armatures présentes dans le béton sont dans un milieu acide, le processus de corrosion reprend, ce qui fait augmenter leur volume. L'augmentation de volume distend progressivement la masse du béton pour le faire éclater, mettant les armatures à nu et les exposant ainsi aux intempéries.
Ce phénomène est connu comme étant la carbonatation du béton.
Pour éviter ce phénomène de « carbonatation » du bé-

ton, on préconise l'emploi d'une épaisseur d'enrobage suffisante des armatures et/ou la mise en œuvre d'armatures inoxydables.

8.4. Propriétés et utilisation

Le béton est un matériau massif, à densité élevée (environ 2300 kg/m³). Il possède une très bonne résistance naturelle à la compression.
C'est un matériau non combustible et ininflammable qui résiste également à de nombreux agents agressifs.
Selon sa fabrication, il peut être résistant au gel et au sel, imperméable à l'eau et étanche au gaz.

Caractéristiques d'un béton de qualité courante (valeurs moyennes)[21]

- masse volumique: 2300 kg/m³
- module de Young: 30.500 N/mm²
- coefficient de Poisson: 0.15
- résistance à la traction: 3N/mm²
- résistance à la compression: 30 N/mm²
- réaction au feu - Belgique: A0
- réaction au feu - Europe: A1

Éléments en béton non armé

Les éléments de construction en béton non armé se retrouvent dans de nombreuses applications, notamment pour les aménagements extérieurs (plaques ou pavés de revêtement de sol, bordures, caissons…), et intérieurs (bloc de maçonnerie, revêtement de sol, marches…), pour la réalisation de gaines et de canalisations et en tant qu'élément de couverture ou de parement.

Éléments préfabriqués en béton armé

Des éléments porteurs comme des poutres, des colonnes ou poteaux ainsi que des linteaux peuvent être préfabriqués sous différentes formes et différentes dimensions.
Des éléments à géométrie complexe, par exemple des volées d'escaliers, justifient l'utilisation de coffrage réutilisable en atelier.
Les éléments « prédalles » sont des plaques de béton préfabriqué avec une armature sous tension qui reçoivent, sur chantier, une couche de béton pour former une dalle.

Bétons particuliers

Ces dernières années, on voit apparaître toute une série de bétons aux propriétés nouvelles :
- béton HRC (High Resistance Concrete): bétons à haute performance;
- béton UHRC (Ultra High Resistance Concrete) : bétons à ultra haute performance;
- béton FRC : bétons fibrés (Fiber Reinforced Concrete) à l'aide de fibres métalliques ou plastiques (PE);
- béton UHPFRC : bétons ultra haute performance fibrés (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete).

L'utilisation de fibres de verre, de plastique, d'acier ou de carbone permet d'améliorer ou de modifier les propriétés du béton, notamment sa résistance à la traction et aux chocs ou de réduire la formation de fissures.
Les agrégats en bois diminuent la conductivité thermique et augmentent ainsi les performances d'isolation thermique.
Les éléments de construction en béton de fibres ont une durabilité supérieure et peuvent être réalisés en section plus fine que les bétons traditionnels.
Cependant, plus les bétons gagnent en résistance, plus leurs caractéristiques mécaniques s'approchent de celles des matériaux pierreux naturels, mais par la même occasion, ils deviennent extrêmement fragiles en perdant le palier plastique en compression que possèdent les bétons courants.
Le béton translucide constitue une évolution récente dans laquelle des fibres conductrices de lumière (fibres de verre) servent d'agrégat au béton.

8.5. Propriétés environnementales et sanitaires

Consommation de ressources énergétiques

L'essentiel de la consommation d'énergies fossiles nécessaire à la fabrication des bétons est utilisé par la fabrication du ciment (clinker).
L'acier utilisé pour la fabrication des armatures a un impact environnemental élevé, notamment une consommation importante d'énergie à la fabrication. L'importance énergétique de ce composant pousse à optimiser les quantités d'acier, en choisissant du béton précontraint ou à hautes performances ou en passant par des méthodes de calcul plus poussées.
La Febelcem, la fédération belge des cimentiers, a estimé les postes les plus significatifs de la consommation énergétique des bétons de manière suivante[22] :
Pour 1 m³ de béton normal lourd coulé sur chantier en Belgique:

- ciment 1.58 GJ
- sables et granulats 0.27 GJ
- armatures 2.25 GJ
- bois de coffrage 0.43 GJ
- transport et mise en œuvre 0.34 GJ

Consommation de ressources non énergétiques

La fabrication des bétons nécessite une consommation relativement importante de ressources naturelles : sable, granulats, eau.
La fabrication du béton consomme annuellement environ un tiers de la production de granulats en Belgique et la moitié de la production de sable (sablière, rivière ou mer).
Ces ressources naturelles sont des ressources locales,

21 Source: [ZASTAVNI 2010]

22 Source: [EVRARD 2005]

non renouvelables, mais présentes sur le sol belge en quantité relativement importante.
Ceci étant, la fabrication de béton à partir de granulats de béton recyclé est une alternative très intéressante qu'il convient d'encourager fortement.

Durée de vie

Les éléments en béton, qu'ils soient coulés sur chantier ou préfabriqués, ont une longue durée de vie (> 100 ans). Les éléments en béton ne nécessitent pas ou peu d'entretien.

Recyclage

Les bétons de démolition ou les déchets de mise en œuvre sur chantier peuvent en principe être réintroduits, après concassage, dans la fabrication de nouveaux éléments en béton. Cependant, jusqu'à présent, la plupart de déchets de béton sont principalement utilisés en dowcycling (ou décyclage) : après concassage, ils sont employés dans la construction de routes et comme éléments de remplissage.
Cependant, les bétonniers, conscients de l'opportunité qui est offerte par ce déchet, travaillent depuis plusieurs années sur les possibilités d'utilisation des bétons recyclés en tant que granulats ou agrégat concassé.
La recherche actuelle se penche sur les exigences de qualité du matériau afin de fournir une base pour établir les conditions juridiques et légales de la réutilisation de ceux-ci.
Deux problèmes se posent aujourd'hui :

- en raison de leurs arêtes vives et de leur granulométrie variable, les mélanges de bétons réalisés avec cet agrégat demandent une quantité plus importante de ciment, ce qui peut remettre en cause les avantages du recyclage « matières » en raison de la demande plus importante en énergie grise liée à la production du ciment;
- les quantités de déchets de béton sont influencées par le nombre de chantiers de démolition et leur répartion géographique. La disponibilité de ces déchets est donc très variable dans le temps, contrairement à celle des granulats extraits en carrière ou en mer.

Santé

Lors de la mise en œuvre des bétons, les principaux risques encourus par les professionnels sont dus à l'utilisation de ciment (mortier et jointoiement des blocs).
Certains travaux tels que le ponçage, le décapage à sec ou encore le perçage ou sciage de blocs peuvent entraîner l'émission de poussières de silice. Ces poussières peuvent atteindre les alvéoles pulmonaires et être à l'origine de silicose et de cancers broncho-pulmonaires.
Certaines résines incorporées au béton peuvent également entraîner des irritations cutanées.
Certaines huiles de décoffrage sont également potentiellement cancérogènes.
Le béton mis en œuvre à l'intérieur d'un bâtiment est sans danger pour ses occupants.
C'est un matériau hygroscopique qui joue un rôle de régulateur d'humidité, ce qui a pour effet d'améliorer la qualité de l'air intérieur.
Le béton est également un matériau massif qui joue un rôle de régulation de température en limitant les surchauffes en été.
Le béton n'émet aucune substance nocive.
Certains bétons peuvent contenir une très faible teneur en radioéléments naturels (dépend de la composition).



Illustration AN.64: Plafond en béton, intégration de panneaux acoustiques



Illustration AN.65: Mise en œuvre intérieure du béton
Architecte: Bureau Calimucho

8. Le verre

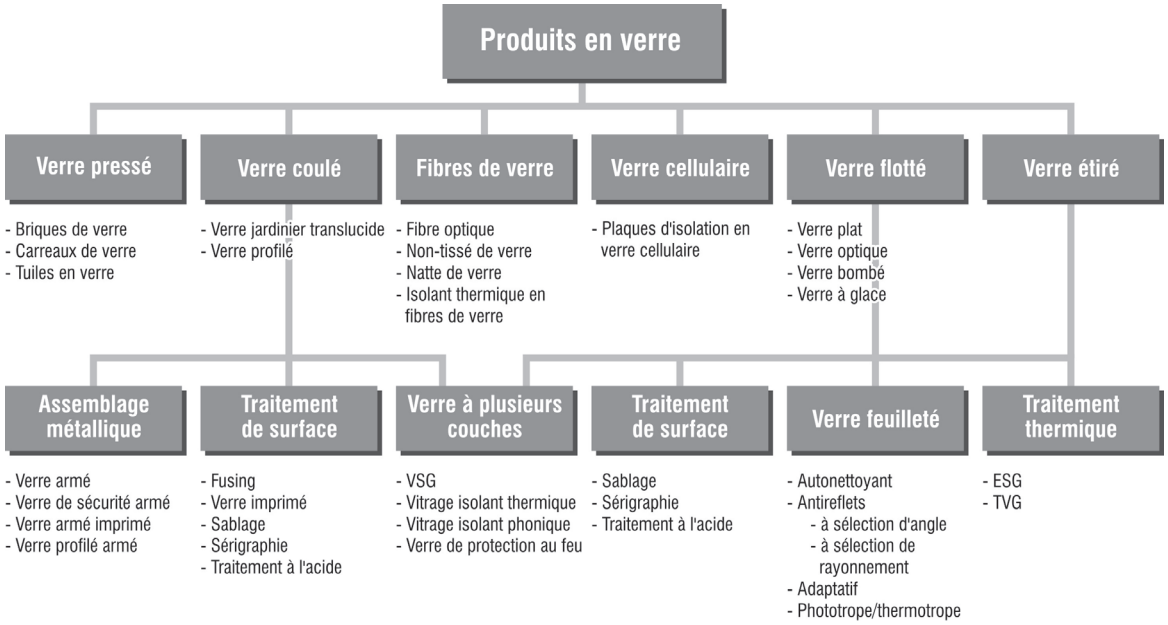


Illustration AN.66 : Descriptif des produits en verre

Avicenne disait du verre qu'il «est parmi les pierres comme un fou parmi les hommes». Une folie domestiquée, au fil des siècles, pour un matériau toujours paradoxal: si le propre de la matière est en effet d'apparaître pour affirmer sa réalité, le verre, lui, se révèle en disparaissant!» Source: [KULA 2009]



Illustration AN.67 : Mises en œuvre de produits verriers

Parmi tous les matériaux de construction, le verre occupe une place privilégiée dans l'architecture. En effet, ce matériau, déjà connu et utilisé en Mésopotamie et en Égypte 3000 ans av JC, est à l'origine d'un long processus d'évolution qui a permis à l'architecture de dépasser le stade du « mur massif et quasi aveugle » au profit d'une peau transparente et translucide. Le verre offre la possibilité d'ériger des bâtiments légers, transparents et ouverts vers l'extérieur et ce faisant, modifie les rapports entre intérieur et extérieur ainsi que la relation entre l'Homme et son habitat, entre l'Homme et la nature, entre l'homme et la lumière.
Au cours de ces dernières années, l'intérêt pour le verre en tant que matériau de construction n'a cessé d'augmenter. Une des principales raisons en est l'évolution de la technique du verre : sans rien perdre de sa transparence, le verre a acquis une plus grande résistance mécanique, une maniabilité ou « usinabilité » plus diversifiée, mais également de très bonnes propriétés physiques.
Le matériau « verre » a subi une longue évolution depuis son état naturel jusqu'aux dernières innovations pensées par l'Homme. Cette progression est riche d'éléments ; il est donc indispensable de distinguer les différents procédés de fabrication, des différents types de verre et de leurs applications respectives en passant par la connaissance de leur composition chimique.

8.1. Verre, matériau de construction

Le verre est un matériau paradoxal : c'est un matériau solide à structure liquide, un matériau cassant et rigide à température ambiante, mais extrêmement plastique lorsqu'on le chauffe…
Le verre est un solide amorphe obtenu par « figeage » d'un liquide fondu.
Le verre est fabriqué à partir de matière minérale : le sable siliceux ou sable de silice. La silice lors de la montée en température – nécessaire au processus de fabrication – va se liquéfier. Cette liquéfaction va induire une transformation physico-chimique irréversible donnant lieu à une particularité spécifique du verre : une structure atomique désordonnée qui permet la transparence du solide obtenu. En effet, dans la plupart des matériaux, à l'état solide, les atomes sont organisés entre eux suivant un agencement bien précis qui stabilise et compacte la matière (structure cristalline ou semi-cristalline). Dans le cas du verre, après fusion de la silice, le liquide se fige progressivement en gardant sa structure désordonnée (état vitreux).

Composition

La plus ancienne recette du verre est conservée à Ninive, avec les tablettes d'argile de la bibliothèque du roi assyrien Assurbanipal (668 - 626 av. J.-C.) : « *Prends 60 mesures de sable, 180 mesures de cendre de plantes marines, 5 mesures de craie et tu obtiens du verre*.»
Cette recette est en principe encore valable de nos jours, le verre étant essentiellement constitué de silice ou sable de quartz, de soude et de chaux ainsi que différents adjuvants.
La composition du verre utilisé actuellement dans le bâtiment est la suivante :

- Dioxyde de silicium (SiO_2): 69 % à 74 %
- Oxyde de calcium (CaO): 5 % à 12 %
- Oxyde de sodium (Na_2O) : 12 % à 16 %
- Oxyde de magnésium (MgO): 0 % à 6 %
- Oxyde d'aluminium (Al_2O_3): 0 % à 3 %

Ces différents composants ont une fonction bien précise dans la fabrication du verre:

- le vitrifiant : c'est la matière première de base, principalement de la silice (sous forme de sable) ou du verre recyclé;
- les fondants : ces composants permettent d'abaisser la température de fusion. La silice pure fond à des températures aux alentours de 1800 °C en mélangeant celle-ci avec des oxydes de sodium ou autres oxydes alcalins, on descend la température de fusion à 1400 °C;
- les stabilisants : l'ajout de chaux ou d'oxyde de calcium permet d'obtenir un matériau plus stable et inerte;
- les additifs : au mélange de base (silice – oxyde de sodium – oxyde de calcium), on peut adjoindre de nombreux autres composants afin d'améliorer les qualités « optiques » ou physiques du verre

Propriétés physiques

La structure chimique du verre est désordonnée. C'est cet état amorphe spécifique qui induit les principales propriétés de ce matériau.
Le verre est la seule matière minérale solide que l'on puisse produire à des dimensions et sous des formes quelconques tout en conservant sa transparence.

- Transparence

Le verre est un matériau transparent, mais il peut être opaque ou opalescent. Sa transparence est due au manque de structure moléculaire cristalline au travers de laquelle la lumière traverse sans diffusion.

- Dureté

Seuls les diamants et le carbure de tungstène le rayent. Le verre le plus dur est le verre de Bohème et le cristal est le plus tendre.

- Stabilité dimensionnelle

Le verre est un matériau isotrope, c.-à-d. qu'il garde les mêmes propriétés dans toutes les directions. C'est une matière qui n'a pas de sens.

- Densité

La densité du verre est de 2500 kg/m³, soit sensiblement la même que le béton. La densité du verre dépend des composants : si celui-ci est fortement chargé de plomb, il peut avoir une densité supérieure à 6000 kg/m³.

- Caractéristiques mécaniques et résistance.

La pâte de verre à base de silice confère à celui-ci dureté et résistance tout en le rendant cassant : à l'inverse des matériaux transformables et élastiques comme le métal, le verre casse lors d'un dépassement minime de sa limite d'élasticité.
Sa résistance à la compression est comparable à celle de l'acier (1000 N/mm²).

Tableau AN.07 : Données physiques du verre

Masse volumique	2490 kg/m³
Résistance à la traction	30 - 90 N/mm²
Résistance à la compression	> 800 N/mm²
Dureté de Mohs	6-7
Module d'élasticité	7 x 10⁴ N/mm²
Conductivité thermique	0.8 W/mK
Capacité thermique spécifique	0.23 J/kgK

Source: [HEGGER 2009]

• Caractéristiques optiques

La transmission spectrale du verre est suffisante pour les rayonnements solaires de 300 à 2500 nm. La plus grande partie du rayonnement solaire à ondes courtes traverse le verre, réchauffant ainsi les surfaces qui se trouvent derrière celui-ci. Ces surfaces réfléchissent elles-mêmes un rayonnement chaud qui ne peut plus traverser le verre. C'est ce qu'on appelle l'effet de serre et ce qui est utilisé en tant que « gains solaires » en hiver.

• Caractéristiques acoustiques

À cause de la faiblesse de sa masse, le verre est un bon conducteur acoustique. On peut cependant améliorer ses performances en travaillant avec plusieurs couches de verre et en dissociant intérieur et extérieur grâce au vide entre les verres qui réduit la transmission du bruit.
Ce vide intermédiaire peut être rempli de gaz lourd qui améliore encore l'isolation acoustique.

Propriétés thermiques

• Dilatation

Le verre est un très mauvais conducteur de chaleur. Il se brise s'il subit un brusque changement de température, car les différentes parties du verre ne se réchauffent pas en même temps.
Son coefficient de dilatation est faible, ce qui lui confère de nombreuses applications : il sert d'isolant thermique (laine de verre). On retrouve presque les mêmes coefficients que certains métaux d'où l'exécution de soudures verre-métal. Ce coefficient varie selon la composition.

• Conductivité thermique

Le verre est mauvais conducteur. On l'utilise d'ailleurs comme isolant électrique.
Ceci n'est pas le cas à chaud, car il devient conducteur à partir de 250 °C.

• Comportement au feu

Le verre est un matériau ininflammable et incombustible.
À 700 °C, il commence à devenir visqueux. De par sa faible résistance aux changements de température, il ne supporte aucune différence supérieure à 60K.

Caractéristiques chimiques

Grâce à la silice, composant principal du verre, celui-ci présente une résistance chimique élevée face aux substances agressives, à l'exception des fluorhydriques, des solutions alcalines chaudes et de l'eau. Ces derniers deviennent particulièrement dangereux lorsque le verre est longtemps exposé à de l'eau stagnante comme cela peut être le cas lorsque des vitres sont stockées à plat.

Propriétés environnementales et sanitaires

• Consommation importante de ressources énergétiques.

Le procédé de fabrication du matériau verre implique des montées en températures relativement conséquentes (entre 1400° et 1800 °C). Ces montées en températures nécessitent une consommation importante de combustibles fossiles.

• Consommation importante de ressources non énergétiques

La fabrication du matériau verre implique une consommation importante de matières premières, issues de ressources naturelles non renouvelables, mais présentes en grande quantité: silice, sable, chaux...
L'industrie verrière utilise également des déchets de verre comme vitrifiant à la place de la silice.

• Recyclage

Le matériau verre est un matériau recyclable avec de nombreuses filières: les déchets de verre sont utilisés dans d'autres secteurs industriels liés à la construction: fibres de verre, verre cellulaire, etc.

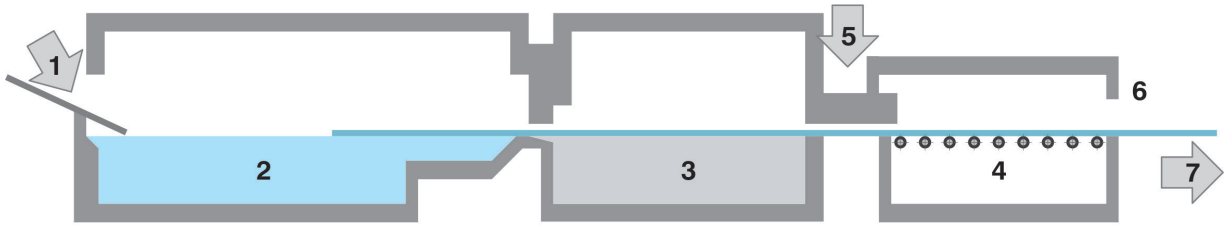
8.2. Processus de fabrication du verre : du verre naturel au matériau du 21e siècle

On relève l'utilisation de verre naturel, d'origine volcanique, pour la fabrication de lames ou de pointes de flèche dès 5000 ans av. J.-C.
À la même époque, en Mésopotamie, on découvrit que le mélange composé de silice, de chaux, de carbonate de sodium, de potasses carbonatées et d'oxydes métalliques, porté à une température élevée (1400 °C), se transformait en pâte vitreuse, opaque et facile à travailler. La fabrication du verre était alors complexe ; de ce fait, il resta pendant longtemps un matériau rare et recherché.
C'est au 2e siècle av. J.-C. que la pipe du souffleur de verre est mise au point par les Syriens. C'est une étape importante vers les techniques de fabrication du verre tel que nous le connaissons aujourd'hui. Cette technique a permis, pour la première fois dans l'histoire de l'Homme, de fabriquer des récipients creux.
À l'époque romaine, on réussit à fabriquer des vitres plates grâce à la technique du verre coulé. Le verre ainsi

obtenu était translucide, mais pas encore transparent.
Deux procédés de fabrication, issus de la technique des Syriens sans cesse améliorée, vont dominer la production du verre depuis le début du Moyen-Âge jusqu'à la fin du 19e siècle.
Il s'agit des techniques de soufflage en plateau et de soufflage en cylindre.

- Soufflage en plateau : le souffleur de verre réalise une couronne pouvant atteindre 2 mètres de diamètre
- Soufflage en cylindre : la boule de verre est façonnée en un cylindre le plus long et le plus fin possible. Ensuite, à l'aide d'une pointe en fer mouillé (et plus tard un diamant), on détache les deux bouts latéraux et on coupe le cylindre refroidi dans le sens de la longueur. On le réchauffe à nouveau et on le déploie pour obtenir un panneau de verre plat

Au 18e siècle, l'amélioration des techniques du verre coulé et soufflé permet de produire des vitres de grandes dimensions, mais ces procédés sont toujours relativement coûteux.
Ces innovations techniques, avec les techniques constructives en acier, vont donner naissance aux vastes constructions acier/verre comme les serres, les grandes coupoles transparentes, les halls de gare, les passages… Mais pas seulement, car c'est aussi le début de la préfabrication ou la production d'élément préfabriqués. Plus encore, de par les systèmes constructifs proposés et « l'ouverture » offerte par le verre, le mur de façade va de plus en plus s'émanciper de sa fonction portante.
En 1905, la technique de l'étirage est mise au point. Cette technique, essentielle pour la production de verre plat, permet d'étirer le verre en fusion encore liquide, sur des laminoirs ou à travers une buse en terre cuite et d'ensuite le refroidir. C'est grâce à ce procédé que l'on arrive pour la première fois à produire économiquement des « panneaux de verre » de grande qualité et en grande quantité.



1: enfournement des matières premières
2: bain de verre fondu
3: bain d'étain liquide (isolé)
4: canal de refroidissement
5: placement éventuel d'un revêtement
6: contrôle optique
7: verre flotté

Illustration AN.68 : Fabrication du verre float

En 1886, les blocs de verre soufflés à la bouche sont mis au point par le Français Falconnier. Ces éléments seront par la suite utilisés par des architectes connus tels que Guimard, Perret, Le Corbusier.
En 1959, l'Anglais Alastair Pilkington met au point le processus de fabrication du verre flotté, qui s'est très rapidement imposé pour la production économique de verre plat de qualité supérieure. Ce procédé est aujourd'hui utilisé dans le monde entier et assure la fabrication de la plupart des verres utilisés dans le bâtiment.

8.3. Types de verre et autres produits verriers

Verre flotté (Float Glass)

Le verre « float » est le type de verre le plus utilisé de nos jours. C'est un verre clair, de qualité supérieure et aux surfaces planes.
Sa fabrication, telle qu'illustrée par le schéma A3.74 ci-dessus, consiste à faire fondre les différents composants dans un four à une température de 1400 °C. Le verre liquide est ensuite porté à 1100 °C sur un bain d'étain. Plus léger, le verre flotte à la surface, s'étend jusqu'au bord du bain et se solidifie. La surface de l'étain fondu est extrêmement lisse, donnant au verre une planéité de surface parfaite. Des rouleaux déplacent ensuite le verre dans un canal de refroidissement, tout en veillant au maintien de l'épaisseur (entre 1,5 et 19 mm).
Les installations actuelles produisent des plaques de verre de dimensions maximales de 320 x 600 cm.
Ce type de verre est relativement facile à courber (à des températures supérieures à 640 °C).

Verre à vitre

En 1902, les Belges Émile Foucault et Émile Gobbe mettent au point un procédé de fabrication de verre plat par étirage vertical directement à partir du verre liquide. Un autre procédé de fabrication de verre plat est mis au point par Libbey Owens en 1906, par étirage horizontal. Ces deux procédés permettent de fabriquer du verre plat d'épaisseur variable. De plus, si celui-ci est transparent comme le verre flotté, il présente de légères ondulations en surface. Celles-ci sont visibles par réflexion

ou parfois même par transparence.
Ce verre est essentiellement utilisé aujourd'hui dans la rénovation du patrimoine bâti et classé.

Verre coulé (ou verre décoratif)

Schéma de fabrication
Le verre coulé est principalement utilisé sous forme décorative.
Sa fabrication consiste à faire fondre les différents composants à une température de l'ordre de 1400 °C. Le verre liquide déborde ensuite de la cuve de fusion et s'écoule à travers un ou plusieurs couples de rouleaux lamineurs qui lui confèrent la structure de surface recherchée.
Selon la configuration des surfaces des cylindres ou des tables, on peut obtenir un verre avec :
- deux surfaces lisses ;
- une surface lisse et une surface structurée ;
- deux surfaces structurées

Le verre coulé est translucide ; il ne peut pas être transparent comme le verre flotté ou le verre à vitre. La diffusion de la lumière dépend de la structure plus ou moins accentuée de la surface du verre.
Le verre coulé permet donc de faire pénétrer la lumière naturelle dans une pièce tout en préservant l'intimité de celle-ci.

Verre armé

Le verre armé est fabriqué comme le verre coulé. Cependant au cours du processus de laminage continu, des armatures ou treillis métalliques sont rajoutés dans la masse vitreuse. Ces armatures permettent d'améliorer les caractéristiques de résistance à l'effraction et à l'incendie du verre.
Le verre armé peut être poli.

Verre borosilicaté

On introduit comme composant dans la fabrication du verre de 7 à 15 % d'oxyde borique, ce qui confère au verre ainsi obtenu un coefficient de dilatation moins élevé que celui du verre flotté ou coulé ainsi qu'une résistance plus élevée aux variations de température, aux lessives alcalines et aux acides.
Le verre borosilicaté peut être actuellement fabriqué comme un verre à vitre ou flotté, mais aussi comme verre coulé et laminé.
Il est principalement utilisé pour les protections incendies.

Verre profilé en U

Le verre en U est un profilé de verre présentant une section en « u » avec des surfaces structurées. Il est fabriqué selon le processus de fabrication du verre coulé : à la sortie du four, une bande de verre est passée sur des moules de façon à ce que ses arêtes soient pliées verticalement vers le haut.
L'élément fini est livré en longues barres, pourvu ou non de treillis métalliques.
Dans le bâtiment, ces éléments sont montés en mur. Lorsqu'ils sont montés en murs, les éléments sont enfichés et insérés dans un cadre métallique profilé en U de manière à assurer la stabilité du mur.

Blocs ou carreaux de verre creux

Les carreaux ou briques de verre sont des éléments en verre creux.
Durant leur processus de fabrication, le verre en fusion est refroidi à 1200 °C et la masse obtenue est moulée en forme de coquilles qui sont ensuite soudées par paire en réchauffant les surfaces de contact.
Les carreaux peuvent être teintés et leurs surfaces peuvent avoir des structures très variées
Les dimensions standards sont de 15x15 cm et de 30x30cm pour une épaisseur variant de 8 à 10 cm.

Briques de verre

Les briques de verre sont des blocs de verre massifs fabriqués par pressage. Ces briques, à la différence



Illustration AN.69 : Briques de verre



Illustration AN.70 : Façade vitrée - Malmö - Photo: M.Outers

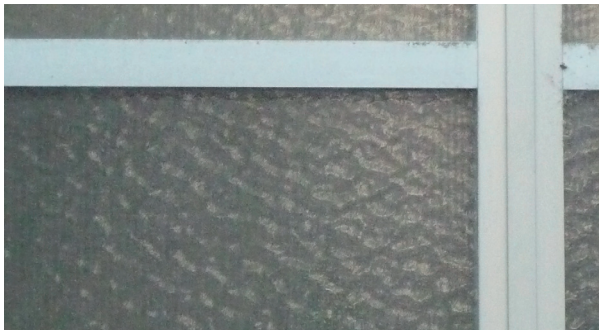


Illustration AN.71 : Verre martelé

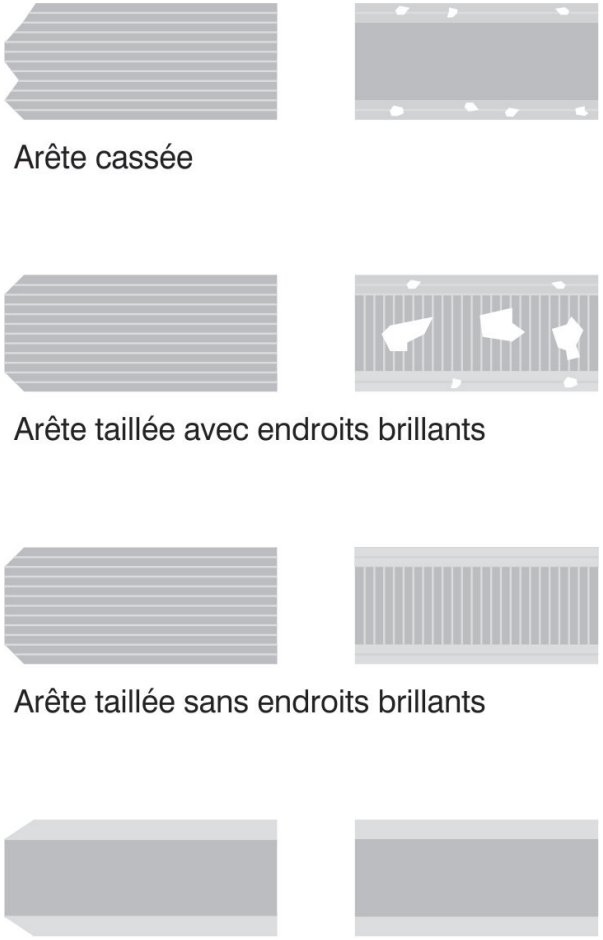


Illustration AN.72 : Traitements des arêtes du verre

des blocs creux, peuvent résister à des sollicitations statiques. Elles sont de formes variées et sont utilisées dans le bâtiment pour la réalisation de murs, de plafonds ou de sol vitrés.

Autres produits verriers

Le verre peut être utilisé pour fabriquer d'autres produits de construction, notamment des fibres de renforcement en verre, des matériaux isolants, des fibres optiques ou certains produits comme la vitrocéramique.

8.4. Affinage du verre

L'affinage du verre permet d'améliorer les qualités des angles des plaques ou vitres, de procéder à un traitement thermique (après fabrication) ou de travailler la surface du verre.

Traitement des bords/angles

Les bords d'un verre peuvent être traités de nombreuses manières différentes ; la plus simple étant de laisser l'arête de coupe telle quelle. C'est ce que l'on fait lorsque le bord du verre est dissimulé dans un cadre.
On peut également polir ou poncer les bords. Les bords d'un verre trempé sont par exemple biseautés, c.-à-d. taillés en oblique afin de ne pas être coupant.
Les différents types de bords sont décrits dans la norme européenne prEN12150. On peut notamment citer :
- bords coupés et biseautés par ponçage;
- bords poncés et mats;
- bords polis présentant une surface comparable à celle de la vitre.

Traitements thermiques

• Verre bombé

Un verre plat peut être bombé après fabrication. Pour ce faire, la vitre doit être amenée à une température de transformation afin d'être « ramollie » (640 °C). La pâte de verre est alors soit placée dans un moule, soit pressée puis refroidie lentement pour ne pas créer de contraintes internes.
Les verres bombés peuvent être refroidis selon le processus classique (lentement), mais aussi transformés en verre trempé, feuilleté ou de sécurité.
De par leur forme, les verres bombés sont plus rigides que les verres plats et ils se déforment moins sous les contraintes.

• Verre de sécurité trempé (ESG)

Le verre plat est amené à sa température de transformation (minimum 640 °C) et quand l'intégralité de la masse atteint celle-ci, on la refroidit brusquement par soufflage d'air froid ou par d'autres procédés.
Les surfaces du verre se refroidissant plus vite que le cœur, il en résulte des tensions de compression plus importantes en surface qui confèrent au matériau une résistance accrue (flexion et traction).
Quand un verre trempé thermiquement est soumis à des forces trop importantes, il casse en petits éclats dont les arêtes sont émoussées.
Du fait de sa plus grande résistance à la flexion et sa fragmentation en cas de choc, le verre trempé thermiquement est considéré comme un verre de sécurité : en cas de fracture, les éclats de verre sont en effet peu susceptibles de blessures.
De plus, contrairement au verre normal, le verre trempé thermiquement peut supporter le choc d'une personne sans se briser, à condition que la structure ou la construction qui l'intègre puisse elle-même résister à une telle contrainte.
Cependant, ce verre ne peut plus être travaillé, ni taillé, ni percé ou coupé.

• Verre partiellement trempé (TVG)

Un verre est dit partiellement trempé lorsqu'il est réchauffé jusqu'à température de transformation de toute sa masse puis refroidi, mais plus lentement. La tension

de compression superficielle est moins importante que dans le cas du verre trempé thermiquement. Les contraintes de surface sont alors juste suffisantes pour que l'on n'observe que des fractures radiales de bord à bord quand la feuille de verre se brise en cas de choc.
Le verre partiellement trempé n'est pas un verre de sécurité :
- en vitrage simple, on doit le maintenir dans un cadre afin de tirer le meilleur profit possible de son comportement à la fracture;
- il peut être utilisé pour la réalisation de verres de sécurité feuilletés où son comportement à la fracture et sa résistance élevée à la flexion seront correctement exploités.

Comme le verre trempé thermiquement, le verre partiellement trempé ne peut plus être travaillé.

• Verre trempé chimiquement

Plat ou bombé, le verre peut être trempé chimiquement par échange d'ions à la surface du verre.
Le verre est immergé dans un bain de sel fondu très chaud, immersion au cours de laquelle les ions de la surface du verre sont échangés contre des ions plus volumineux du sodium du sel fondu, ce qui confère au verre une tension de compression en surface uniquement : la zone de trempe s'étend juste sous la surface du verre.
Les bords du verre subissent également ce phénomène de trempe lors de l'immersion dans le bain de sel.
Les verres trempés chimiquement possèdent une grande résistance aux contraintes thermiques et mécaniques. Ces verres peuvent être coupés.

Traitement de surface

Le traitement de surface du verre, par la pose d'une couche spécifique sur la feuille de verre, permet de modifier son aspect esthétique ou de modifier ses propriétés.

Les différents traitements sont les suivants :

• Émaillage

L'émail est une poudre de verre teintée qui est fondue à environ 700 °C.
Pendant le processus de fabrication sur verre trempé (ESG ou VSG), un dépôt d'émail coloré est cuit sur la surface du verre. La couche d'émail peut également être déposée sur le verre par pulvérisation ou sérigraphie.
On obtient ainsi des surfaces colorées transparentes ou opaques selon l'épaisseur de la couche d'émail.

• Fusing

Dans ce procédé également appelé fusionnage, des morceaux de verre coloré sont fondus sur la surface d'une simple vitre. Ces verres ainsi traités sont normalement prévus pour l'aménagement intérieur ; ils peuvent cependant être collés à l'extérieur avec de la résine à couler sur une autre vitre en verre trempé ESG.

• Gravure à l'acide

Les surfaces d'une feuille de verre peuvent être rendues opaques par l'application d'acide. Le degré d'opacité dépend de la durée d'application : plus forte est l'attaque, plus la surface du verre deviendra rugueuse et moins le verre sera transparent.
Ces verres peuvent être bombés ou trempés.
En protégeant certaines parties, on peut réaliser des motifs ou des figures sur le vitrage.

• Sérigraphie

On peut produire des vitrages imprimés selon le procédé de la lithographie et recuits au four après l'application de pigments. Il est ainsi envisageable de projeter des graphiques ou des photographies multicolores.

• Sablage

La surface du verre peut être rendue opaque par un procédé mécanique de sablage. La surface du verre devient rugueuse et l'effet visuel obtenu est similaire à celui du verre traité à l'acide.

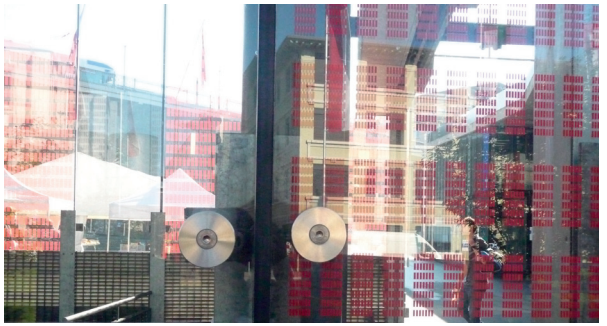


Illustration AN.73 : Verre sérigraphié



Illustration AN.74 : Verre sérigraphié

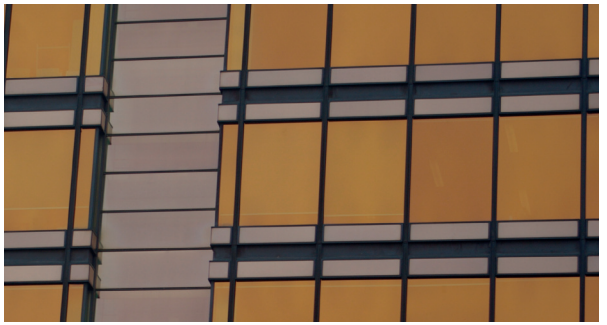


Illustration AN.75 : Verre coloré

Revêtements du verre

Il existe une grande variété de revêtements du verre. Selon le type de revêtement, sa texture et la composition de la couche, le revêtement peut être mis à l'extérieur ou à l'intérieur ou encore à l'intérieur d'un double vitrage.
Les revêtements sont classés selon les catégories suivantes :

- classe A : le film est appliqué sur la surface du verre qui est tournée vers l'extérieur et en contact direct avec les intempéries;
- classe B : le film est appliqué sur la surface du verre en contact avec l'ambiance intérieure et protégé des intempéries extérieures. Le verre revêtu peut être utilisé comme simple vitrage;
- classe C : le film n'est utilisé que dans l'espace intermédiaire d'un vitrage isolant. Le verre sur lequel celui-ci doit être placé est transporté dans un emballage spécifique et ne peut être revêtu qu'après sa mise en œuvre;
- classe D : le verre revêtu n'est utilisé que dans le cas d'un double vitrage isolant et doit y être intégré directement après sa fabrication. Ce verre ne peut être utilisé en simple vitrage;
- classe S : la surface du verre revêtue peut être utilisée à l'extérieur comme à l'intérieur et est adaptée pour répondre à des exigences particulières (vitrine de magasin par exemple).

Certains revêtements permettent aussi un traitement thermique ultérieur.
Quelques exemples de revêtement:

- les revêtements polymères ainsi que les revêtements photocatalitiques et les structures à micro-rugosité diminuent la formation de gouttes d'eau et de dépôts de poussières. Ces revêtements permettent de réaliser ou produire des verres autonettoyants;
- les revêtements à effet optique, dont l'antireflet qui diminue la réflexion des surfaces.

8.5. Vitrages composites multicouches

Les vitrages composites multicouches sont des ensembles composés de deux ou plusieurs panneaux de verre collés ensemble au moyen d'un film vitreux élastique ou au moyen d'une résine coulée.
En fonction du type de verre utilisé, la composition en plusieurs couches permet de nombreuses possibilités et réponses à des exigences spécifiques.
On peut réaliser des vitrages composites plans ou courbés (cintrés).

Verre de sécurité feuilleté (VSG)

Le verre de sécurité feuilleté est composé de minimum deux vitres et d'une couche intermédiaire élastique à laquelle les deux vitres sont fortement liées.
On emploie pour les couches intermédiaires du polyvinyl butyral (PVB), des résines coulées ou d'autres matériaux organiques ou inorganiques qui répondront avec les verres aux exigences de sécurité.
Les verres utilisés sont du verre trempé de sécurité ou du verre partiellement trempé.
Ce verre est un verre de sécurité : lorsqu'il casse ou en cas de choc, la couche intermédiaire maintient les éclats de verre et le verre répond encore à certaines exigences comme de résister au choc d'un corps humain, conserver une certaine capacité portante…
Les verres de sécurité se déclinent en plusieurs catégories répondant chacune à des utilisations dans les domaines suivants :

- verre contre le vandalisme;
- verre contre les effractions;
- verre contre les armes à feu;
- verre résistant aux explosions;

Verre coupe-feu

Les vitrages de protection incendie sont obtenus avec des films autocollants contenant un gel à teneur importante en eau. L'effet protecteur réside dans le fait que, sous l'effet de la chaleur, l'eau contenue dans le gel se transforme en vapeur d'eau. En cas de rupture de la vitre, le gel maintient les éclats de verre et diffuse la vapeur d'eau contre le feu.
Il existe deux catégories de verre coupe-feu:

- catégorie G : ces verres empêchent la propagation des flammes, des fumées et des gaz pendant un temps donné, mais pas la progression de la chaleur de l'incendie;
- catégorie F : ces verres empêchent la propagation des flammes, des fumées et des gaz pendant un temps donné, mais également la propagation de la chaleur de l'incendie.

Vitrage isolant

Le vitrage isolant est un ensemble composé de deux ou plusieurs verres avec un espace intermédiaire étanche à l'air d'une largeur de 8 mm à 24 mm.
L'espace intermédiaire peut être rempli par de l'air ou par un gaz isolant (gaz rares tels que l'argon, le xénon ou le krypton) et entouré d'un joint périphérique. Il peut également être mis en dépression.
Il existe encore d'autres possibilités d'amélioration des caractéristiques thermiques en utilisant des films supplémentaires qui sont insérés entre les vitrages ou traitant les surfaces intérieures des vitrages.
Tous les verres décrits préalablement peuvent être combinés pour constituer un vitrage isolant.
Les vitrages isolants présentent des coefficients d'isolation thermique bien supérieurs à ceux des vitrages simples.
Une valeur U de 1 à 1.1 W/m^2K est courante pour les doubles vitrages isolants.
Les triples vitrages isolants avec un remplissage de gaz rare et un revêtement peuvent atteindre des valeurs U de 0.4W/m^2K.
Ceci peut s'expliquer schématiquement par les trois

processus différents engendrés par le transfert de chaleur à travers un verre feuilleté:
- la convection c.-à-d. le transfert thermique par déplacement du gaz dans l'espace intermédiaire ;
- la transmission c.-à-d. le transfert de chaleur par rayonnement;
- le transfert de chaleur dans le verre, le verre feuilleté et l'espace intermédiaire.

• Gaz de remplissage

Des gaz rares de remplissage peuvent être utilisés pour remplir l'espace intermédiaire et ainsi améliorer l'isolation thermique : les valeurs U obtenues sont meilleures que celles obtenues par remplissage d'air. Il s'agit de gaz comme l'argon, le xénon ou le krypton. Bien que le xénon et le krypton possèdent de meilleures propriétés thermiques, l'argon est le gaz le plus couramment utilisé en raison de sa plus grande disponibilité et de la simplicité de son mode de production.

• Couches ou films métalliques

Des couches métalliques (argent ou titane par exemple) modifient les propriétés de réflexion ou d'absorption du vitrage.
Ces couches métalliques diminuent l'émissivité (rayonnement infrarouge) et conviennent essentiellement pour les protections solaires et thermiques.
Les vitrages isolants recouverts d'argent sont appelés dans le langage courant « vitrages basse émissivité » (low emissivity) c.-à-d. à faible rayonnement thermique. Ils peuvent être actuellement produits avec une couleur pratiquement neutre. Une couche ou revêtement «basse émissivité » fait baisser la valeur U d'une vitre de 3.0 à 1.6W/m^{2}K.

• Isolation acoustique

On peut améliorer nettement la protection acoustique d'un vitrage isolant par l'utilisation de verres composites intégrant des verres de différentes épaisseurs et des gaz lourds dans les vides intermédiaires. Des gaz comme l'hexafluorure de soufre (SF6), l'argon et le krypton offrent en effet une meilleure isolation acoustique que celle assurée par le remplissage d'air.
Les paramètres suivants peuvent également influencer l'isolation acoustique d'un vitrage :
- poids du vitrage (la masse atténue la transmission des bruits aériens);
- différence d'épaisseur entre les vitres (suppression du risque d'effet de résonnance);
- intégration de films PVB selon le principe de masse – ressort - masse);
- distance importante entre les vitres.

Cependant, le poids de ce type de vitrage est plus important. Il nécessite donc l'utilisation de menuiseries et d'huisseries spécifiques.

9. Les plastiques

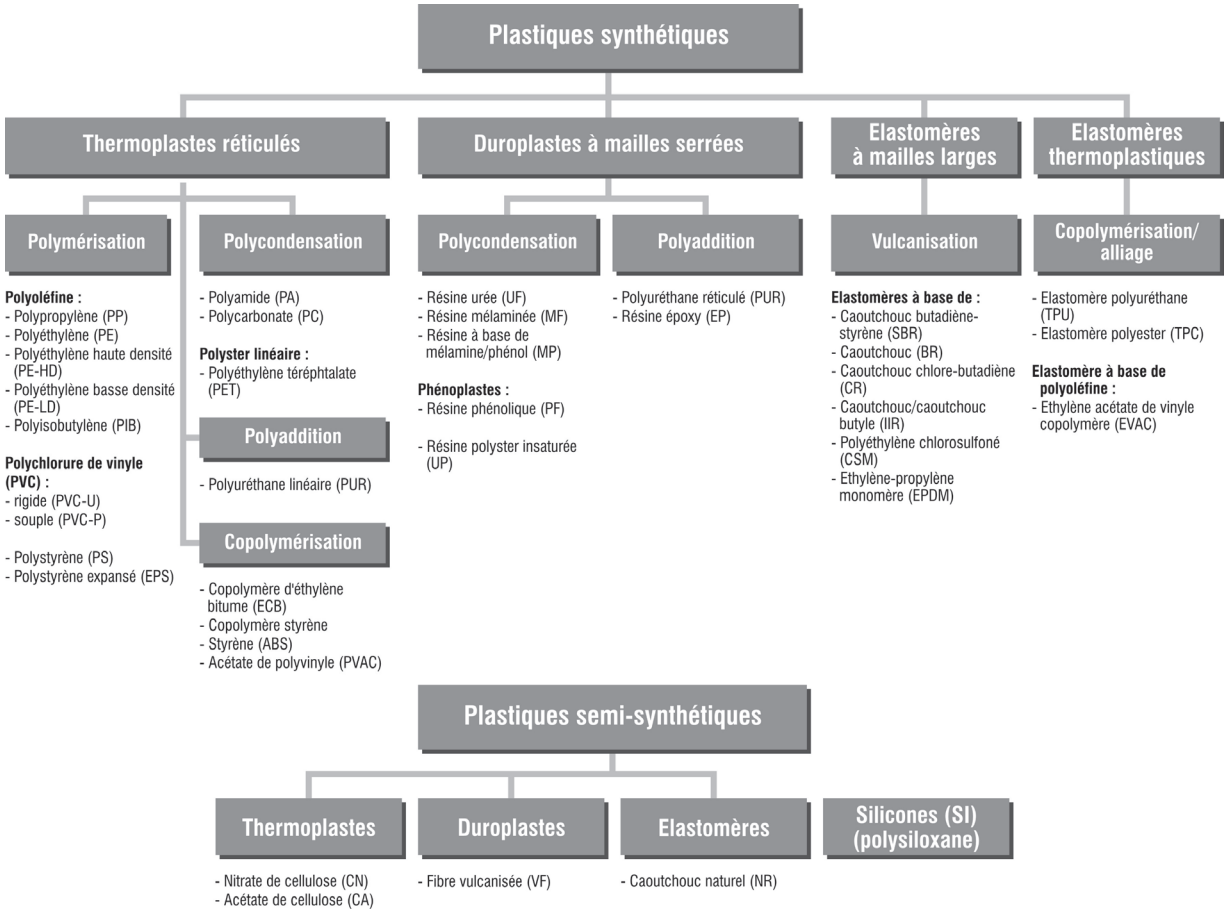


Illustration AN.76 : Descriptif des matériaux et produits plastiques

Contrairement à la plupart des autres matériaux présents dans la construction, les plastiques sont des matériaux relativement nouveaux. La fabrication de ceux-ci a débuté au milieu du 19e siècle avec la transformation chimique de matières premières naturelles et renouvelables.
Les premiers plastiques fabriqués par l'homme résultaient de la transformation chimique de polymères naturels tels le caoutchouc, la cellulose et la caséine. La première matière plastique industrielle basée sur un polymère synthétique est la Bakélite.

Dans les années 50, juste après la Seconde Guerre mondiale, l'apparition massive des plastiques va bouleverser non seulement notre vie quotidienne et notre rapport à la nature, mais également le monde des matériaux de construction.
Contrairement aux matières traditionnelles que sont le bois, la pierre, la terre et le métal que l'homme extrait et travaille, les matières plastiques (ou polymères) sont « fabriquées » par l'homme, sur base de la chimie du carbone. Ces manipulations humaines leur confèrent rapidement une image de matières « artificielles » ou de « sous-matières » qui sera renforcée par le fait que celles-ci peuvent prendre la place d'autres matériaux, notamment dans le mobilier, l'outillage et l'emballage.
Les matières plastiques sont des matières purement industrielles, elles n'ont pas subi une phase d'artisanat et/ou de manipulation.
Ce matériau, à l'aspect toujours neuf, est devenu indispensable et a provoquél'émergence d'une société de consommation et du «tout à jeter». Il est présent partout et également dans le secteur de la construction et du bâtiment: revêtements de sol, éléments de façade, isolants, étanchéités, installations techniques...
De matières de substitution jetables et bas de gamme, ils vont dans un avenir proche devenir des matériaux de plus en plus sophistiqués aux propriétés spécifiques et irremplaçables. Aujourd'hui, les polymères sont des produits de haute technologie capables de prouesses inégalées dans tous les domaines, y compris dans la construction.

9.1. Caractéristiques des plastiques

Même si chaque plastique a des propriétés spécifiques, la plupart des plastiques présentent les caractéristiques suivantes : faible densité, faible conductivité thermique, coefficient de dilatation thermique élevé, grande résistance à la traction, bonne isolation du courant électrique, résistance à l'eau et à de nombreux agents chimiques, matériaux inflammables, vieillissement aux rayons violets…

9.2. Composition chimique des plastiques

Les matières plastiques sont des matériaux constitués d'un ensemble de macromolécules (longues chaînes moléculaires) dont l'atome central est presque toujours du carbone (C).
Les matières premières nécessaires à la fabrication des plastiques sont le pétrole, le gaz naturel et le charbon. Ces matières premières fossiles proviennent de la décomposition de substances organiques. Au cours de millions d'années, le carbone (C) et l'hydrogène (H) se sont enrichis dans les fonds marins sous l'effet de pressions élevées et de hautes températures.
La distillation du pétrole en raffinerie sépare les chaînes moléculaires et produit du gaz, de l'essence, du diesel et du fuel lourd.
À partir de l'essence légère, appelée naphta, on peut par vapocraquage[23], produire des hydrocarbures non saturés et réactifs, dont de l'éthylène et du propène notamment qui sont des substances de base pour la fabrication de matières plastiques.
Il est important de souligner que ces substances peuvent aujourd'hui être obtenues à partir de matières végétales, matières premières naturelles et renouvelables, mais les processus sont relativement complexes.
Selon leur type, les plastiques contiennent souvent, outre le carbone et l'hydrogène, d'autres éléments chimiques comme de l'oxygène, du chlore, du fluor, du soufre, du silicium et de l'azote.
Le processus de fabrication consiste à lier par réaction chimique, des monomères réactifs en macromolécules en chaînes linéaires et d'ainsi créer des polymères.
Pour synthétiser des matières plastiques, on utilise des monomères, petites molécules où les atomes de carbone ont créé des doubles liaisons. Ces monomères subissent ensuite une réaction de polymérisation (polyaddition ou polycondensation) qui les lie entre eux par des liaisons covalentes c.-à-d. des liaisons simples issues de l'«ouverture » des liaisons carbone – carbone. Ces liaisons covalentes sont fortes et structurent les longues chaînes de monomères ainsi assemblés en macromolécules.
Le styrène, le propylène, l'éthylène sont quelques monomères de base fabriqués par l'industrie chimique. Une fois polymérisés, ils donneront des macromolécules de polystyrène, de polypropylène et de polyéthylène.

Polymères thermoplastiques ou thermodurcissables

Indépendamment du procédé de fabrication, on distingue également trois groupes de plastiques d'après la structure macromoléculaire et l'assemblage possible dans le matériau polymère.

- Thermoplastiques

Les thermoplastiques sont composés de longues chaînes de molécules faiblement liées entre elles par des liaisons intermoléculaires dites « Van der Waals ». Ces liaisons disparaissent sous l'effet de la chaleur et réapparaissent lors du refroidissement.

23 Le vapocraquage est un procédé pétrochimique qui consiste à obtenir, à partir d'une coupe pétrolière telle que le naphta des alcènes (éthylène, propylène) mieux valorisables. Source: Wikipedia

Les matières thermoplastiques ont ainsi la capacité de se ramollir sous l'effet de la chaleur et de durcir en se refroidissant. Ce phénomène réversible autorise une grande variété de mises en forme, de procédés de traitement et de réutilisation et permet leur recyclage : les objets sont broyés et « refondus » pour en élaborer d'autres.
Les thermoplastiques sont par ailleurs solubles dans des solvants spécifiques, ce qui permet leur utilisation comme revêtements et colles.
Quelques thermoplastiques couramment utilisés : polystyrène, polyéthylène, polypropylène, polycarbonate, polychlorure de vinyle…

• Thermodurcissables

Dans le cas des thermodurcissables, les longues chaînes de molécules sont liées entre elles par des liaisons covalentes fortes que l'action de la chaleur ne brise pas (sauf au point de destruction complet de la matière).
Les thermodurcissables durcissent sous l'action de la chaleur de manière analogue à une cuisson (pâte à tarte). Leur mise en œuvre ou en forme est irréversible une fois soumis à la chaleur. Le recyclage direct est impossible.
Les thermodurcissables ont de manière générale des propriétés mécaniques, thermiques et de structure meilleure que les thermoplastiques.
Les thermodurcissables sont durs, cassants, insolubles dans des solvants organiques.
Quelques thermodurcissables couramment utilisés :polyuréthane, époxy, polyesters insaturés…

Polymères amorphes ou cristallins

L'organisation des macromolécules peut prendre deux formes différentes. Ces deux formes de structure moléculaire auront une influence sur la transparence ou l'opacité des polymères.
Soit les chaînes de molécules sont enchevêtrées de manière irrégulière, et ce quelle que soit la nature des liaisons qui les relient. Ceci est considéré comme l'état « amorphe » de la matière et seul cet état confère une transparence au polymère.
Soit les chaînes de molécules sont bien alignées, et ce quelle que soit la nature des liaisons qui les relient. C'est l'état « cristallin » ou « semi-cristallin ». Les polymères ayant cette structure ont des propriétés chimiques et mécaniques souvent supérieures aux amorphes, mais ils restent opaques.

Les élastomères

Les élastomères constituent une famille de polymères aux propriétés d'élasticité supérieures aux autres polymères. On parle d'«hyper élasticité» lorsque ces matériaux sont capables de s'allonger de 5 à 10 fois sans se rompre et de reprendre leur forme de départ après étirement.
Les élastomères sont constitués de chaînes moléculaires à larges mailles. Ce sont des polymères à caractère amorphe ou cristallin présentant également des propriétés remarquables en amortissement et étanchéité (air, eau).
Le caoutchouc naturel est l'élastomère le plus ancien et le plus courant. On compte également parmi les élastomères certains silicones, certains polyuréthanes, les EPDM…
La plupart des élastomères sont des polymères thermodurcissables, mais certains élastomères thermoplastiques (TPE) sont apparus récemment sur le marché des plastiques.

10.3. Traitement et mise en forme

La fabrication des monomères et leur traitement pour les transformer en polymères sont effectués par les grandes industries de production de plastiques. Celles-ci livrent le polymère pur sous forme de granulat aux entreprises de post-traitement, qui mélangent le polymère pur avec des additifs (compounding). Ensuite vient la phase de mise en forme en vue d'obtenir des produits finis ou semi-finis

Additifs

Les additifs modifient de façon importante les propriétés des plastiques ainsi que leur degré de polymérisation (longueur des chaînes moléculaires) et le degré de cristallisation et de ramification (réticulation) des molécules plastiques
Parmi les additifs, on distingue :

• Les matières de charge

Les matières de charge sous forme de particules, de fibres ou de billes en matières organiques ou anorganiques permettent :
- d'améliorer la surface et de diminuer la friabilité des thermodurcissables ;
- d'influencer les propriétés d'écoulement et de retrait des thermoplastiques.

L'industrie des plastiques utilise comme matières de charge de la cellulose, de la sciure de bois, de la poudre de pierre, de la craie, du kaolin ou des billes de verre.

• Les matières de renforcement

Les matières de renforcement sont introduites pour améliorer la rigidité, la résistance mécanique et la résistance à la chaleur. Sont utilisées comme fibres de renforcement, des fibres de verre, des fibres de carbone ou encore des fibres d'aramide.

• Les colorants

Les colorants ou pigments, solubles ou non solubles, permettent de colorer la matière plastique, soit en couvrement de la matière (pigment non soluble), soit par coloration de la matière (pigment soluble).

• Les stabilisateurs

Les matières plastiques peuvent être endommagées par la chaleur, la lumière et les rayons ultra-violets.
Certains additifs agissent en tant que stabilisateurs et empêchent ainsi l'apparition de ces dommages.

• Les assouplissants ou plastifiants

Les additifs assouplissants augmentent la flexibilité des matières plastiques et ainsi leur résistance aux chocs. On distingue deux types d'assouplissants selon que ceux-ci soient chimiquement ou non liés au polymère : assouplissant extérieur (non lié) et assouplissant intérieur (chimiquement lié).

• Les produits ignifuges

Les produits ignifuges permettent de diminuer la combustibilité des plastiques.

Ils agissent soit de manière physique, en refroidissant ou en formant des couches de protection en cas d'incendie, soit de manière chimique en créant une couche de cendre ou en empêchant l'oxydation des gaz inflammables.

• Les agents moussants

Les agents moussants sont des additifs qui permettent de faire mousser ou gonfler les polymères… Pendant la fabrication des mousses, on laisse expanser les agents moussants ajoutés sous forme de liquide ou de gaz, ce qui a pour effet de faire gonfler les polymères.

Procédés de mise en forme

La première mise en forme des produits semi-finis c.-à-d. le moulage de pièces à partir de produits liquides, en poudre ou en granulats, est appelée « transformation primaire des plastiques ».

Dans le cas des thermoplastiques, le processus de mise en forme est réversible : le granulat fondu trouve sa forme et durcit une fois refroidi. Ce n'est pas le cas des thermodurcissables dont la mise en forme est irréversible.

Ces procédés de mise en forme sont l'extrusion, le calandrage, le moulage par injection, le pressage, le moulage par rotation et le formage.

L'extrusion est un procédé continu qui transforme la masse thermoplastique liquide en profilés, tubes, plaques, films ou tuyaux au moyen d'une presse à extrusion.

Les revêtements de sol et les bandes d'étanchéité (PVC) par exemple peuvent être fabriqués par calandrage, procédé qui transforme les thermoplastiques ou caoutchoucs en longues bandes au moyen de rouleaux.

9.4. Propriétés environnementales et sanitaires

Consommation de ressources non renouvelables, présentes en quantité limitée

Les polymères sont fabriqués à partir de pétrole, de gaz naturel ou de charbon. Ces matières premières sont toutes les trois des ressources non renouvelables présentes en quantité limitée (pour le pétrole et le gaz).

Fin de vie et Recyclage

Les plastiques sont des matériaux qui sont difficilement décomposés par les micro-organismes : ils ne sont pas biodégradables. De plus, entreposés dans les décharges, ces matériaux peuvent soit s'envoler s'ils restent en surface, soit, s'ils sont enfouis dans le sol, créer une couche imperméable qui empêche les gaz inflammables de décomposition des déchets de s'échapper ce qui augmente les risques d'incendie ou d'explosion.

Les déchets plastiques issus de la production des plastiques sont de manière générale réintroduits dans le cycle de fabrication, après avoir été triés et nettoyés.

Après utilisation, les déchets plastiques peuvent être traités selon quatre possibilités :

• Réutilisation

La réutilisation des plastiques est facilitée par le fait que ceux-ci sont fabriqués selon des formats ou dimensions standardisés: bouteilles recyclables ou réutilisables, pièces détachées, profilés de fenêtres…

Bien que cette filière de valorisation fonctionne relativement bien dans certains secteurs, elle est encore peu utilisée dans le secteur de la construction.

• Valorisation de la matière plastique

Les déchets plastiques après triage et nettoyage sont broyés sous forme de poudre ou granulats directement réutilisables dans les cycles de production. La structure chimique reste dans ce cas inchangée.

Les déchets plastiques qui sont valorisés par cette filière sont par exemple les déchets de fenêtres en PVC, tuyauteries en PVC. Ces déchets sont broyés et réintroduits dans le cycle de production du PVC.

De manière générale, cette valorisation engendre une perte de qualité.

• Valorisation de la matière première

La valorisation des matières premières suppose la coupure de la chaîne moléculaire des polymères par l'action de la chaleur ou de solvants. Les produits obtenus sont de substances de base (huile ou gaz) qui seront utilisées pour la fabrication de nouveaux plastiques.

Cette valorisation ne nécessite pas de tri ni de nettoyage préalable.

• Valorisation énergétique

En raison de leur teneur importante en carbone, les plastiques et les déchets plastiques ont un fort pouvoir calorifique. Ils peuvent donc être utilisés à la place de combustibles fossiles et brûlés pour produire de l'énergie. Cette valorisation est souvent utilisée dans le cas de plastiques non recyclables. Il faut cependant être attentif aux polluants atmosphériques et autres matières toxiques qui peuvent être dégagés lors de ce processus.

Pour pouvoir être recyclés, les plastiques doivent dans un premier temps être identifiés et donc identifiables. Les matières plastiques sont classées en 7 catégories que l'on reconnaît grâce au marquage repris dans le tableau A3.8 ci-contre.

La plupart des matériaux plastiques utilisés dans la construction sont recyclables, y compris le PVC, mais par manque de filières, de moyens technologiques ou d'informations, ils sont encore trop souvent mis en dé-

Tableau AN.08: Marquage des plastiques - recyclage

Marquage	Type de plastique
	Polyéthylène Terephtalate (PET). C'est actuellement le plastique le plus recyclé.
	Polyéthylène haute densité ou High Density Polyethylene (HDPE)
	Le polychlorure de vinyle (PVC). C'est le 3e plastique utilisé dans le monde (16,5 % de l'ensemble des plastiques) après les polyéthylènes (32 %) et les polypropylènes (20 %)
	Polyéthylène basse densité ou Low Density Polyethylene (LDPE).
	Polypropylène (PP)
	Polystyrène (PS
	Tout plastique autre que ceux nommés de 1 à 6, par exemple les plastiques à base de polycarbonate ou contenant plusieurs type de plastiques

charge ou incinérés.

Risques pour la santé

• Risques sanitaires du PVC

Depuis plusieurs décennies, le PVC est au centre d'un débat sur les éventuels effets sur la santé et sur l'environnement à chaque étape de son cycle de vie.
En effet, le PVC contient plusieurs substances dangereuses dont du chlorure de vinyle monomère, responsable de tumeurs du foie, des composés à base de plomb, toxiques pour la reproduction et dangereux pour l'environnement, des composés à base de cadmium dont certains sont classés cancérogène ainsi que des phtalates ayant des effets néfastes sur la santé (touchent le foie, les reins, provoquent des perturbations du système endocrinien...)
Lors de la fabrication du PVC, les ouvriers peuvent être exposés à l'émission de plusieurs de ces substances dangereuses.
Une fois mis en œuvre, les produits de construction à base de PVC peuvent émettre des phtalates, des métaux lourds et des COV.
En cas d'incendie, la combustion du PVC produit du chlorure d'hydrogène, gaz irritant à de très faibles concentrations pour les muqueuses oculaires et respiratoires. Si la concentration augmente, ce gaz peut provoquer des oedèmes pulmonaires et un décès peut survenir.

9.5. Les produits plastiques dans la construction

Le bâtiment représente après l'industrie de l'emballage un des principaux consommateurs de produits plastiques.
Les matières plastiques sont principalement utilisées dans la construction comme :
- éléments porteurs : coques, profilés;
- aménagement intérieur : mobilier, revêtement de sol et de mur, cloisons;
- enveloppe de bâtiments : éléments de façade, lanterneaux, bandes d'étanchéité, membranes…;
- installations techniques : conduites d'eau, conduite d'air, protections des câbles électriques…;
- colles;
- isolation thermique et phonique;
- protection des ouvrages et emballages.

Une sélection de quelques plastiques couramment utilisés dans le bâtiment est présenté ci-dessous :

Polyéthylène (PE) - thermoplastique

Le polyéthylène fait partie des polyoléfines et ne comprend que des hydrocarbures.
En fonction de sa densité, on distingue le polyéthylène haute densité (PE-HD) et le polyéthylène basse densité (PE-LD). Le polyéthylène est un polymère simple à travailler et économique.
Les degrés de cristallisation et de polymérisation peuvent influencer son état d'utilisation qui peut aller de raide à souple.
Dans le bâtiment, on retrouve le PE sous forme de canalisation, de bandes d'étanchéité, de film de protection et/ou de revêtement de sol.

Polypropylène (PP) - thermoplastique

Les propriétés et les usages du polypropylène sont proches de ceux du polyéthylène PE. Comme celui-ci, il fait partie des polyoléfines.
Il présente une grande résistance au vieillissement et aux agents chimiques.
Dans le bâtiment, on retrouve du polypropylène sous forme de tubes et de conduites, d'étanchéité, de film de protection…

Chlorure de polyvinyle (PVC) - thermoplastique

Les propriétés chimique et mécanique du PVC, les multiples possibilités de traitement qu'il autorise, justifient son emploi dans de nombreux domaines : canalisations,

profilés de châssis, lanterneaux, panneaux ondulés, éléments de façade, étanchéité, revêtement de sol…
On le retrouve sous forme de PVC dur (PVC-U) ou sous forme de PVC mou (PVC-P).
Il peut revêtir différents aspects : clair, transparent, opaque, teinté.
Il est difficilement inflammable et brûle mal en raison de sa forte teneur en chlore.

Polystyrène (PS) - thermoplastique

Le polystyrène est le polymère par la polymérisation des monomères de styrène.
Le polystyrène de base, appelé PS cristal, est une matière dure et cassante, pouvant être transparente ou colorée. Ses propriétés mécaniques et thermiques peuvent être modifiées par l'ajout de plastifiants.
C'est un matériau très facile à transformer, par injection ou extrusion par exemple.
Dans le bâtiment, il est principalement utilisé, après moussage, sous forme de polystyrène expansé ou extrudé, comme isolant thermique et acoustique.
Sous l'effet de forte chaleur (incendie), le polystyrène dégage du styrène qui d'après l'Agence internationale de recherche sur le cancer pourrait être cancérogène pour l'homme.

EPDM – élastomère

Les EPDM (éthylène-propylène-diène monomère) sont des polymères amorphes obtenus en polymérisant de l'éthylène dans des proportions variables
De couleur blanche, le polymère ne devient noir que par adjonction de noir de carbone, ou à cause d'une purification peu poussée (les traces de catalyseurs, d'additifs colorant la gomme sèche). L'EPDM possède une excellente résistance à l'oxydation (ozone, air), aux intempéries, à la lumière et au froid ainsi qu'une très bonne résistance aux acides
Il est utilisé en construction en tant qu'étanchéité.

Les silicones

Les silicones présentent des caractéristiques comparables aux matières plastiques bien que la molécule soit fabriquée à partir d'atomes anorganiques du silicium et non d'atomes de carbone.
En raison de leur structure chimique, les silicones sont considérées comme des polysiloxanes. Selon la longueur de la molécule obtenue, des matières du type huiles, résines ou caoutchouc se formeront avec comme propriété une excellente résistance à la chaleur et au froid.
Leur comportement hydrofuge et leur élasticité stable face à des écarts importants de température sont mis à profit dans la fabrication de bandes et de produits d'étanchéité. Les résines sont utilisées pour la fabrication de revêtements et imprégnations.
Les silicones sont également utilisées dans la fabrication de masses collantes et élastiques pour assembler et rejointoyer des éléments en verre, en céramique, en métal ou en plastique.

9.6. Plastique et innovation

Un des grands enjeux dans le domaine des matières plastiques, comme dans tous les domaines économiques d'ailleurs, est l'enjeu écologique.
Si le recyclage est souvent possible, les moyens nécessaires ne sont pas toujours – voir pas souvent – mis en œuvre pour assurer un recyclage massif des matières plastiques. Celles-ci sont donc la plupart du temps mises en décharge ou valorisées thermiquement.
En raison de cet important flux de déchets non décomposables, de l'épuisement des ressources fossiles et de la pollution de l'environnement, l'avenir des plastiques réside dans les biopolymères biodégradables: plastiques à base de maïs, de céréales, de betteraves ou de pommes de terre.
Un second enjeu dans le domaine des matières plastiques est l'innovation technologique. En effet, les matières plastiques permettent des innovations techniques et technologiques de par les associations qu'elles créent non seulement entre elles, mais aussi avec d'autres matériaux. C'est tout le domaine des matériaux composites avec notamment le mélange de polymères et de fibres.
C'est également le domaine des matériaux « changeants » ou capables d'intégrer différentes fonctions comme les cristaux liquides ou les polymères à changement de phase…

10. Les matériaux bitumineux

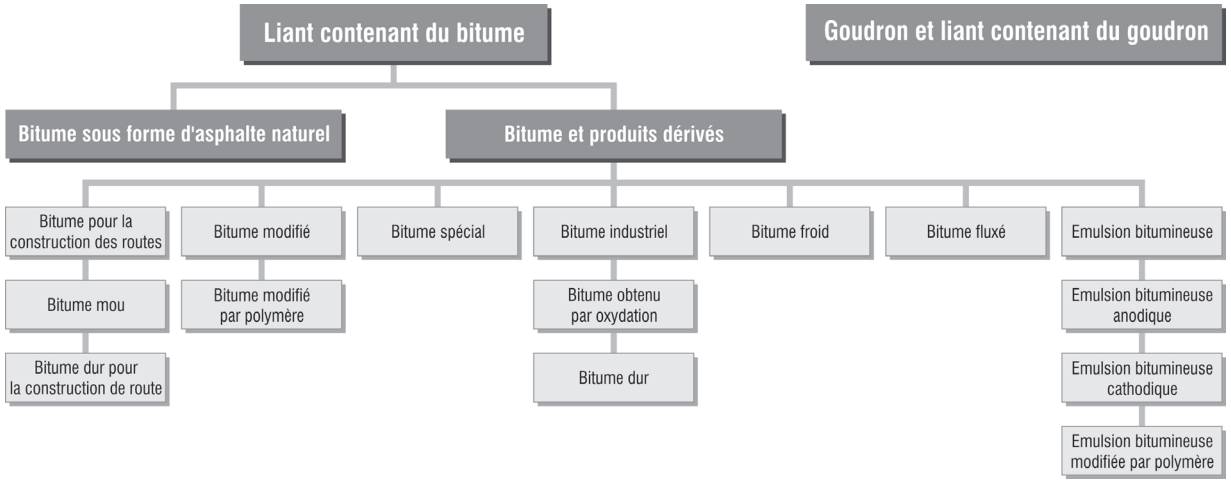


Illustration AN.77 : Descriptif des produits bitumineux

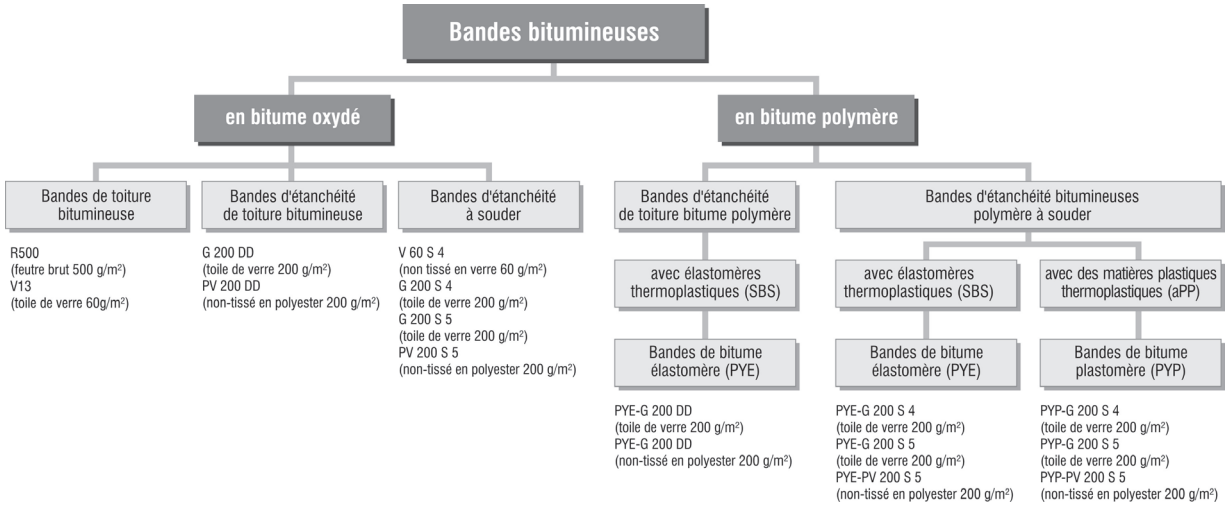


Illustration AN.78 : Descriptif des bandes bitumineuses

Les sédiments organiques d'origine océanique et l'enrichissement en carbone qui en découle sont à l'origine de la formation de pétrole, d'asphalte naturel et de bitume.
Ces trois matières doivent être considérées comme des produits de l'histoire géologique, car elles se sont formées au cours de millions d'années par la succession de trois étapes : l'accumulation de matière organique, végétale essentiellement ; sa maturation en hydrocarbures ; son emprisonnement.
Le pétrole est une roche liquide carbonée, une huile minérale composée d'hydrocarbures plus ou moins légers et de divers composés organiques piégés dans des formations géologiques particulières.
L'exploitation du pétrole fournit la quasi-totalité des carburants liquides (fuel, gazole, kérosène, essence, GPL) tandis que le naphta produit par le raffinage est à la base de la pétrochimie, dont sont issus un très grand nombre de matériaux usuels (plastiques, polymères, élastomères…) et que les fractions les plus lourdes conduisent aux bitumes, paraffines et lubrifiants.
Chaque gisement pétrolier recèle une qualité particulière de pétrole, déterminée par la proportion relative en molécules lourdes et légères, mais aussi par la quantité d'impuretés.
Le bitume est une substance composée d'un mélange d'hydrocarbures, très visqueuse – voire solide – à la température ambiante et de couleur brune ou noire. Connu depuis la plus haute Antiquité sous forme naturelle, il provient, de nos jours, presque exclusivement de la distillation des pétroles bruts.
Le mot asphalte vient du terme akkadien « asphaltu ». Il fut adopté par les Grecs sous la forme de l'adjectif «aspales » qui signifie durable.
L'asphalte est un mélange de bitume et de granulats. C'est un matériau « fermé », c'est-à-dire qu'il n'y a aucun vide.
Sous l'effet de la compression de ces deux matériaux au cours du temps par les couches supérieures, le calcaire est imprégné à cœur par le bitume (environ 12 % de bitume). Cette roche est actuellement exploitée sous forme de poudre que l'on incorpore à d'autres formules. On le trouve dans des mines ou même affleurant à la surface.

L'usage du pétrole, du bitume et de l'asphalte remonte à l'Antiquité. L'approvisionnement était cependant limité aux affleurements naturels (sur les bords de la mer Morte et de la mer Caspienne notamment) et au pétrole trouvé en creusant des puits pour trouver de l'eau potable ou de la saumure.
Le bitume était utilisé en tant que matériau d'étanchéité sous le nom de « bitume de Judée » notamment par les Égyptiens, les Hébreux et les Sumériens, mais aussi comme liant, produit pharmaceutique et cosmétologique (embaumement et conservation des momies égyptiennes), comme combustible pour les lampes à huile et dès 6000 av. J.-C. pour le calfatage des bateaux.
L'asphalte a été utilisé très tôt pour étanchéifier les jardins suspendus de Babylone, et la Bible raconte que Noé en aurait fait usage pour assurer l'étanchéité de son arche (Gn 6, 14).
Dans de nombreuses langues d'Asie et du Moyen-Orient, on retrouve la racine « naft » ou « neft » (naphte), qui, donnée comme nom à un village, indique fréquemment la présence d'hydrocarbures à proximité.
En Asie, des puits auraient été forés en Chine dès le IVe siècle avec des tiges en bambou ; au VIIe siècle, le pétrole était connu comme « eau qui brûle » au Japon.
Au IXe siècle, Al-Razi décrit la distillation du pétrole au moyen d'un alambic, produisant du pétrole lampant ; ce dernier a été utilisé par les Byzantins, puis les Vénitiens, et on peut supposer que le « feu grégeois », qui incendiait les navires ennemis, en contenait. Les Amérindiens utilisaient du pétrole pour calfater les embarcations et pour ses supposées vertus médicinales. Au début du XIXe siècle, il existait une utilisation ponctuelle du pétrole, surtout aux États-Unis. Il était vendu comme remède « miracle », ou servait dans des lampes et comme lubrifiant.
En Roumanie (Dacie), on trouve des allusions à l'exploitation du pétrole dès l'occupation romaine au 1er siècle.
En France, les premiers puits qui exploitaient surtout des sables bitumineux ont été creusés autour du village alsacien de Pechelbronn (Bas-Rhin), dont le nom veut précisément dire « puits de bitume », pour y exploiter cette ressource connue depuis le 15e siècle. Ils ont été forés dans la période 1745-1785 par Louis Pierre Ancillon de la Sablonnière, avec dix puits qui atteignent 10 à 27 m de profondeur, puis 35 en 1801, et 72 m en 1869. L'exploitation, associée à une raffinerie, perdura jusqu'aux années 1970. On y créera la Société des huiles ANTAR qui sera absorbée par ELF Aquitaine en 1970[24].

10.1. Types de bitume

Le bitume existe à l'état naturel à l'air libre sous forme de suintements (États-Unis, Israël, Mexique, Venezuela, France), résidu d'anciens gisements de pétrole dont les éléments les plus légers ont été éliminés au cours du temps par une sorte de distillation naturelle.
Le bitume peut également être obtenu par distillation du pétrole. On distingue plusieurs types de bitume obtenus après distillation :
- les bitumes de distillation (bitume pur ou mou) qui représentent le résidu non vaporisable ;
- le bitume dur, utilisé pour la construction des routes, provient du bitume de distillation que l'on réchauffe et auquel on ajoute de la vapeur d'eau ;
- les bitumes d'oxydation sont produits par soufflage d'air et d'huiles dans le bitume de distillation fondu. Ces bitumes possèdent une bonne élasticité.

24 Source: Wikipédia/ histoire du pétrole

Les bitumes purs sont traités à des températures comprises entre 150° et 220 °C. Après refroidissement de la masse, le bitume peut directement être utilisé (étanchéité, collage…).
Le bitume peut également être utilisé à froid, en solution ou en dispersion :
- une solution bitumineuse est composée de bitume et d'un distillat de pétrole, par exemple de l'essence. L'utilisation de ce type de produit nécessite un processus de prise;
- une émulsion de bitume est un mélange de bitume;
- les produits de colmatage et de rebouchage sont obtenus à partir de solutions ou de dispersions dans lesquelles on a ajouté des matières de charge.

Le bitume n'est pas un résidu de l'industrie pétrolière ; au contraire, une sélection méticuleuse de pétrole brut est nécessaire pour la fabrication de bitume.
D'après le Groupement Professionnel des Bitumes, sur les quelque 1 300 pétroles bruts recensés à ce jour, seuls à peu près 10 % sont exploitables pour fabriquer du bitume répondant aux exigences des fabricants de produits bitumineux.

Le bitume ne doit pas être confondu avec la poix ou le goudron qui sont des produits contenant des hydrocarbures aromatiques polycycliques (PAK). Les préparations à base de poix et de goudron ne sont pratiquement plus utilisées en raison des éventuels risques de cancer.

10.2. Propriétés physiques et chimiques

Les qualités physiques et chimiques du bitume en ont fait un matériau de toute première importance.
Depuis l'Antiquité, le bitume s'est avéré être un matériau de construction fiable et couramment utilisé en raison de ses deux principales propriétés :
- un fort pouvoir adhésif ou agglomérant : le bitume adhère à la majorité des matériaux usuels tels que la pierre, le béton, le bois, le métal ou le verre ;
- une totale imperméabilité à l'eau : le bitume est complètement étanche à l'eau ; il est de plus insoluble dans l'eau, mais l'on peut en obtenir des solutions dans de nombreux solvants organiques.

C'est également un matériau léger, ductile et souple. Du point de vue mécanique, il se comporte comme un matériau plastique ou élastique.
Il est pratiquement inerte vis-à-vis de la plupart des agents chimiques usuels.

10.3. Propriétés environnementales et sanitaires

Consommation de ressources naturelles et synthétiques non renouvelables et présentes en quantité limitée

Le bitume existe à l'état naturel, mais c'est principalement du bitume issu de la distillation de pétrole brut qui est utilisé pour la fabrication de produits bitumineux pour le bâtiment et le secteur routier. Le bitume issu de la distillation du pétrole peut donc être considéré comme une ressource synthétique (fabriquée par l'homme), non renouvelable et présente en quantité limitée.

Fin de vie et recyclage

Le bitume, selon son degré de pureté, peut être traité et réintroduit dans le circuit de recyclage.
Certains producteurs de bandes d'étanchéité bitumineuses réintroduisent actuellement entre 20 et 25 % de bitume recyclé dans leur cycle de production.

Toxicité

Le bitume est un mélange complexe d'hydrocarbures lourds. À la température ambiante, il n'émet strictement aucune substance. Par contre, les matériaux bitumineux en cours d'application peuvent dans certaines conditions de surchauffe émettre des fumées susceptibles de provoquer une légère irritation des yeux et des voies aériennes supérieures.
Les bitumes sont classés par le CIRC en catégorie 3 (non cancérogène pour l'homme). Certains «extraits de bitume» sont classés 2B par le CIRC (cancérogènes «possibles») dans le cas de peintures et vernis bitumeux.
L'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité) recommande cependant aux travailleurs exposés :
- le port de vêtements de protection (combinaisons, gants, et dans certains cas masque et lunettes);
- l'application de mesures d'hygiène élémentaires telles que disposer de vêtements propres, se laver les mains régulièrement, prendre une douche immédiatement après le travail.

10.4. Domaines d'utilisation

La majeure partie de la production de bitume est utilisée aujourd'hui pour l'asphalte qui sert à la construction des routes.
L'industrie du bitume produit également des bitumes obtenus par oxydation et des bitumes durs employés dans le secteur de la construction sous forme de :
- revêtements d'étanchéité;
- bandes bitumineuses;
- bandes bitumineuses polymères;
- revêtements d'étanchéité de toitures;
- plaques de bitume avec voile de verre;
- plaques ondulées bituminées;
- bardeaux et tuiles de bitume;
- produits de protection des ouvrages;
- produits pour couche d'accrochage;
- étanchéité liquide (application à chaud);
- masse à jointoyer (application à froid/chaud);
- asphalte coulé;
- chapes d'asphalte coulé;
- isolant;
- feutres de bitume;
- panneaux de liège bituminé.

Nous ne développerons ici que quelques produits bitumineux.

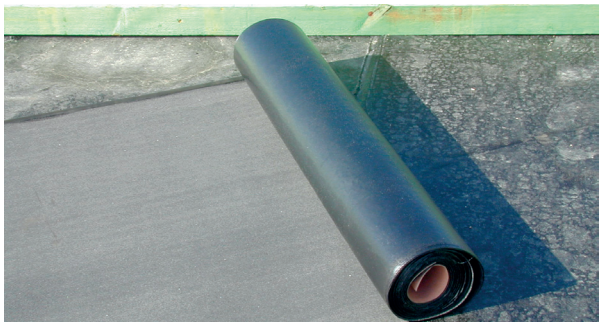


Illustration AN.79 : Mise en œuvre de bandes bitumineuses



Illustration AN.80 : Mise en œuvre de bandes bitumineuses

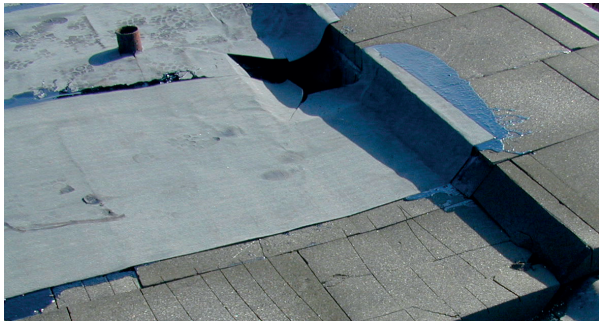


Illustration AN.81 : Mise en œuvre de bandes bitumineuses

Bandes bitumineuses

Les bandes bitumineuses sont constituées d'une couche porteuse imprégnée de bitume de distillation et, de chaque côté, d'une couche superficielle comprenant du bitume obtenu par oxydation. Ces couches superficielles assurent l'étanchéité de la bande et sa durabilité dans le temps.
L'ajout d'armatures permet de satisfaire à des exigences en termes de résistance mécanique et de résistance à l'arrachement ainsi que des exigences relatives à la solidité et à l'extensibilité.
Les armatures peuvent être des tissus de verre, des fibres de verre ou de polyester et plus rarement de la toile de jute ou du feutre brut.
Des feuilles métalliques sont également utilisées comme armature dans les pare-vapeurs, les barrières antiracines ou les sous-couches des toitures végétales.
Ces bandes bitumineuses résistant mal aux rayonnements ultraviolets, elles doivent être protégées en surface lorsqu'elles sont placées en toiture : couche de gravillons, dalles de ciment…

Bandes de bitume polymère

Dans les bandes de bitume polymère, les différentes couches (couche porteuse et couches superficielles) sont imprégnées de bitume de distillation mélangé à des matières plastiques.
Ce mélange confère aux bandes une bonne résistance à la chaleur et une meilleure résistance au vieillissement.
Une couche de protection sous forme de gravillons ou de dalles n'est pas exigée en cas de placement en toiture.
Le bitume utilisé pour ce type de bande est du bitume modifié avec :

- des élastomères thermoplastiques comme du SBS (styrène - butadiène – styrène). L'adjonction d'environ 12 % de styrène-butadiène-styrène confère au bitume des propriétés élastiques;
- des matières thermoplastiques comme de l'APP (polypropylène atactique). L'adjonction d'environ 30 % de polypropylène atactique confère au bitume des propriétés plastiques.

• Propriétés

Des essais réalisés par le CSTC montrent que
tant les bitumes polymères que les étanchéités synthétiques sont beaucoup plus durables que le bitume oxydé. En toiture, on n'observe jusqu'à présent aucune différence de qualité entre le SBS et l'APP .

11.6. Mise en œuvre

La pose de bandes bitumineuses (bitume ou bitume polymère) se fait soit en monocouche soit en multicouche (deux couches ou plus). La pose en multicouche est généralement préférée.

Pose en plusieurs couches

En présence de deux couches, la première couche, appelée sous-couche, est soit :

- collée sur toute sa surface, ponctuellement ou par bande;
- fixée mécaniquement;
- posée librement sur le support

La seconde couche, appelée couche de finition, doit être collée en quinconce sur toute la surface de la première couche.
Le collage entre les couches s'opère toujours en adhérence totale, par soudage à la flamme, au moyen de bitume chaud ou de colle à froid.

Codage de pose

Le codage se compose de deux lettres majuscules, complétées ou non d'une ou plusieurs minuscules.
La première majuscule (L, T, P ou M) indique le mode de fixation de l'ensemble de l'étanchéité sur le support :

- L : en indépendance, avec une couche de protection lourde;

- T : en adhérence totale;
- P: en adhérence partielle;
- M: fixation mécanique.

La deuxième majuscule (L, B, S, C, V ou N) renvoie à la technique de fixation de la première couche de l'étanchéité sur le support :

- L : en indépendance;
- B : collage au bitume chaud;
- S : soudage;
- C : collage à froid;
- V : fixation par vis;
- N : fixation par clous.

La lettre en minuscule (s ou c) indique la technique utilisée pour fixer la deuxième couche de l'étanchéité sur la sous-couche : s = soudage, c = collage à froid.

11. Les matériaux isolants

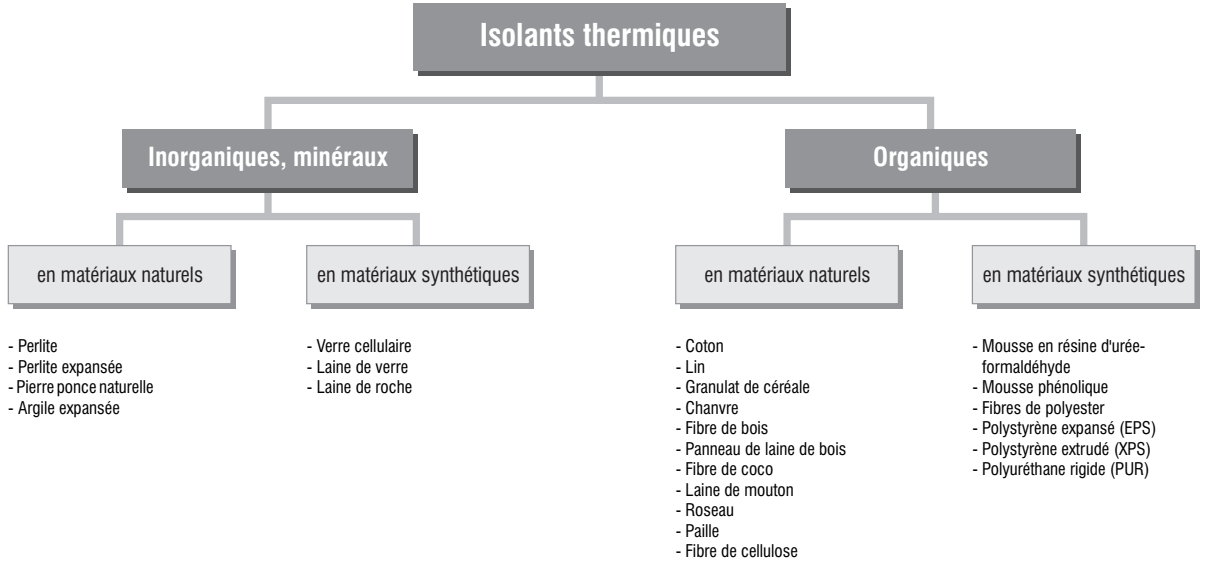


Illustration AN.82 : Descriptif des produits isolants

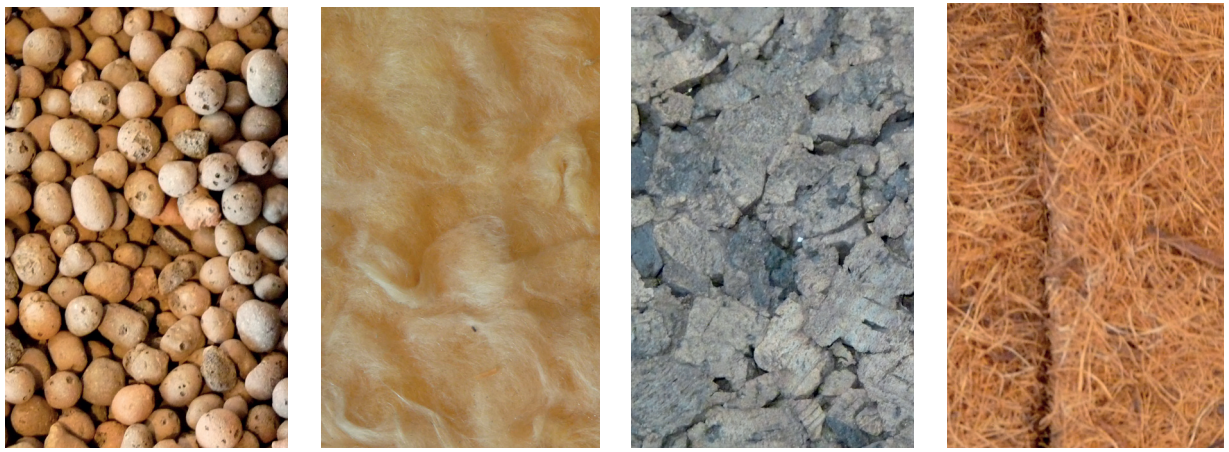


Illustration AN.83 : Matériaux isolants

En raison des enjeux climatiques et de l'accroissement des exigences en matière d'isolation thermique, le marché des matériaux d'isolation est en pleine expansion.
Les isolants en laines minérales et les isolants en mousses synthétiques dominent le marché, mais les isolants dits «naturels» ou «écologiques» prennent chaque année d'importance sur le marché des matériaux de construction. En effet, au cours de ces vingt dernières années, les isolants issus de matériaux naturels et renouvelables, tels que les matières végétales ou animales, ont été redécouverts et sont de plus en plus souvent utilisés dans l'habitat individuel.
On pousse également la recherche sur des matériaux isolants innovants très efficaces. Cette recherche est sans nul doute influencée par l'augmentation successive des épaisseurs d'isolants dans les différentes parois du bâtiment.
Les matériaux isolants sont ainsi devenus des matériaux incontournables dans la construction. C'est pour cette raison que, bien que ceux-ci soient fabriqués à partir de différentes matières premières (végétales, minérales ou plastiques), il nous a semblé nécessaire de pouvoir les décrire dans ce chapitre.

11.1. Histoire de l'isolation

Depuis toujours, l'homme a utilisé des matériaux pour créer une « barrière de protection » contre le froid (ou le chaud), contre les intempéries (ou les sécheresses) et contre une nature environnante souvent hostile. Cette barrière, comme le souligne Anne Norman[25] peut être considérée comme la troisième peau de l'être humain.
Jusqu'au début du 20e siècle, dans les climats froids et tempérés, on se contentait d'une zone « chaude » dans la maison. Cette zone était principalement délimitée par la pièce à vivre et chauffée par un poêle ou une grande cheminée. Les autres pièces, s'il y en avait, étaient peu occupées. La structure familiale intégrait les grands-parents dont une des fonctions principales était l'entretien du feu.
Dans les zones rurales, la fonction climatique du logement était intégrée à la fonction économique : les animaux vivaient à proximité des humains et le stockage du foin dans le grenier garantissait une isolation durant la période froide.
Ces modes « rustiques » de production de chaleur étaient adaptés aux murs lourds et massifs, non isolés, mais ayant une grande inertie thermique.

La Révolution industrielle et les changements en termes d'habitat ont mis fin à ces modes de fonctionnement et d' « habité ». En effet, la Révolution industrielle initiée par la découverte du charbon, la standardisation des procédés de production et de construction et la possibilité offerte par le chemin de fer d'acheminer des produits facilement et partout en Europe va entraîner un changement profond dans la relation que l'homme entretient avec les ressources naturelles (matières premières), notamment dans leur utilisation, leur transformation et leur transport.
Cette page de l'Histoire marque le déclin des modes de production et de construction locaux adaptés aux climats locaux et régionaux.
Après les deux guerres mondiales, le besoin en logements est considérable. Le besoin de reconstruction, l'urgence, l'absence de main-d'œuvre qualifiée et la prépondérance des contraintes budgétaires vont encourager la généralisation des techniques industrielles de préfabrication.
Les années « Glorieuses » d'après-guerre voient l'apparition de l'habitat pavillonnaire qui se développe en périphérie des villes et de millions d'habitats nouveaux, sans aucune considération pour le climat et l'énergie : le pétrole coule à flots et chauffe généreusement chaque logement.
Durant cette période, la croissance économique des pays industrialisés généralise également dans l'habitat l'utilisation de techniques permettant de garantir le confort des usagers en été comme en hiver, consacrant définitivement la séparation entre conception architecturale de l'habitat, techniques du bâtiment et problématique thermique.
Parallèlement, l'évolution des modes de vie entraîne une dépense énergétique croissante, non seulement dans l'habitat avec l'augmentation du nombre de pièces chauffées, de la période de chauffe et du niveau de température intérieure de confort, mais également dans nos modes de fonctionnement et de déplacement.

Il faut attendre les chocs pétroliers de 1973 et de 1979 et leurs conséquences dramatiques pour mettre fin à de cette joyeuse inconscience en suscitant la prise de conscience du caractère non renouvelable de certaines ressources naturelles et des dangers de la pollution.
Le refus du gaspillage en énergies fossiles et en matières premières a conduit certains architectes à analyser les réponses apportées par l'habitat vernaculaire aux spécificités du site et du climat. Beaucoup d'innovations apparaissent durant cette période, notamment autour du concept d'« architecture solaire » et de « solaire passif ». L'ensemble de ces analyses et innovations aboutissent à la définition des principes bioclimatiques permettant de réduire les besoins énergétiques de logement et d'assurer le confort de manière passive, grâce à un choix judicieux de l'implantation, de l'orientation, de la forme et du volume du bâti, des matériaux et de la végétation plantée à proximité

Après la prise de conscience de la « finitude » de certaines ressources naturelles ainsi que de l'augmentation de la pollution liée à la consommation des énergies fossiles, plusieurs étapes se succèdent vers une utilisation rationnelle de l'énergie dans le bâtiment et vers une

25 Source: [NORMAN 2003]

soutenabilité de l'architecture et de la construction:

- **En juin 1972**, une conférence des Nations Unies sur l'environnement humain à Stockholm expose notamment l'écodéveloppement, les interactions entre écologie et économie, le développement des pays du Sud et du Nord. Elle sera rétrospectivement qualifiée de premier Sommet de la Terre. C'est un échec relatif, avec aucun compromis clair, mais la problématique semble dès lors posée : l'environnement apparaît comme un patrimoine mondial essentiel à transmettre aux générations futures.
- **En 1983**, les Nations Unies chargent le premier ministre norvégien Gro Harlem Brundtland de mettre sur pied et de présider une commission d'experts internationaux ayant pour objectif d'analyser les détériorations de l'environnement humain et des ressources naturelles ainsi que leurs conséquences sur le plan économique et social.
- **En 1987,** après avoir établi un constat alarmant de l'état à la fois de l'environnement et du développement (social, économique, culturel et politique) au niveau planétaire, de leur interdépendance et de « l'insoutenabilité » de leur évolution, le Rapport Brundtland «**Our common future** » , propose une nouvelle orientation à la question de développement en le qualifiant de « sustainable ».

Parallèlement à ce rapport, les catastrophes telles que les famines en Afrique, les fuites de pesticides de l'usine de Bhopal en Inde (1984), la découverte du trou dans la couche d'ozone (1985) ou l'accident nucléaire de Tchernobyl (1986) ont dramatiquement participé à conscientiser l'opinion publique quant à la nécessité d'un changement radical dans nos rapports aux dimensions sociales, politiques, économiques et environnementales.

- **En juin 1992**, lors du deuxième sommet de la Terre à Rio de Janeiro, la communauté internationale propose 27 principes qui permettront de préciser la définition de développement durable faite en 1987 par Gro Harlem Brundtland. La communauté internationale se fixe également un plan d'action pour le 21e siècle – Agenda 21.

Ces deux textes majeurs ont pour but d'encadrer au niveau national et international les négociations futures relatives à l'application de la notion de développement durable.

- **En décembre 1997**, lors de la 3e Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques à Kyoto, un protocole ayant pour but de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique est établi et ouvert à ratification. Le protocole de Kyoto propose un calendrier de réduction des émissions des 6 gaz à effet de serre qui sont considérés comme la cause principale du réchauffement climatique des cinquante dernières années. Il comporte des engagements absolus de réduction des émissions pour 38 pays industrialisés, avec une réduction globale de 5,2 % des émissions de dioxyde de carbone d'ici 2012 par rapport aux émissions de 1990.
- **En 2002**, lors du Sommet de la Terre de Johannesburg plus de cent chefs d'État, plusieurs dizaines de milliers de représentants gouvernementaux et d'ONG ratifient un traité prenant position sur la conservation des ressources naturelles et de la biodiversité.
- **En 2005**, le protocole de Kyoto sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre entre en vigueur dans l'Union européenne. Ce protocole propose un calendrier de réduction des émissions des 6 gaz à effet de serre qui sont considérés comme la cause principale du réchauffement climatique des cinquante dernières années. Il comporte des engagements absolus de réduction des émissions pour 38 pays industrialisés, avec une réduction globale de 5,2 % des émissions de dioxyde de carbone d'ici 2012 par rapport aux émissions de 1990.

Le sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992 et les engagements pris par de nombreux pays en faveur du développement durable ont accéléré le processus de généralisation d'une démarche environnementale et cela dans tous les secteurs économiques et en particulier dans le secteur de la construction.

Certains pays industrialisés comme l'Allemagne, l'Autriche, la Suisse ou la Scandinavie, en terme de conception d'habitats, ont pris des mesures permettant à la fois de renforcer l'isolation et l'étanchéité de l'enveloppe extérieure des bâtiments, d'y associer des techniques performantes et d'intégrer des techniques liées aux énergies renouvelables.

En termes de conception, l'accent est mis sur la baisse importante de la consommation énergétique et sur le développement de techniques dites « renouvelables ».

Cette volonté découlant à la fois de choix industriels et politiques a permis le développement de l'habitat « passif » qui est défini par le Passivhaus Institut (Darmstadt) comme un «habitat qui atteint une température ambiante agréable sans chauffage conventionnel en hiver et sans climatisation en été ».

L'habitat passif n'est pas un type de construction déterminé, mais un standard de construction qui respecte certains critères de performances et qui permet de concilier un confort intérieur accru pour l'occupant et une baisse considérable des consommations énergétiques.

11.2. Matériaux isolants, principes, fonction et propriétés

Un matériau est dit « isolant » lorsque son coefficient de conductivité thermique à l'état sec est inférieur ou égal à 0.07 W/mK .

Dans les bâtiments construits, les isolants sont en règle générale « invisibles », cachés derrière un parement et/ou dans une coulisse lorsqu'ils sont placés à l'extérieur

de l'enveloppe ou encore derrière une plaque de second-œuvre quand ils sont placés à l'intérieur de l'enveloppe.
Ces matériaux assurent un ensemble de tâches et de fonctions qui sont résumées ci-après :
- la garantie d'un climat intérieur agréable et sain;
- la réduction des déperditions par transmission et ventilation;
- une protection contre la chaleur en été;
- une protection contre le froid et le gel en hiver;
- une protection acoustique (en fonction du type d'isolant choisi).

La qualité d'une enveloppe thermiquement bien isolée repose sur les propriétés thermiques des matériaux et des éléments qui la composent ainsi que sur leur dimensionnement et leur mise en œuvre.

Classification des isolants

Les matériaux isolants peuvent être classés en différentes familles en fonction de la matière première qui leur sert de base et en fonction du type de transformation que cette matière première a subie lors de la fabrication du produit isolant.
Selon la matière première utilisée, on distingue les isolants minéraux (inorganiques) et les isolants organiques. Selon le processus de fabrication et le type de transformations subies, on distingue les isolants naturels et les isolants synthétiques.

Les fonctions du matériau isolant : isolation thermique, acoustique et protection incendie

• Confort thermique

En plus de l'habillage et de l'activité physique, d'autres facteurs influencent la sensation de confort thermique d'une personne dans un local fermé.
Ces facteurs sont le déplacement d'air, le degré d'humidité de l'air ambiant, la température de l'air ambiant et ses variations et la température moyenne des surfaces intérieures.
Le confort thermique des occupants doit être assuré aussi bien en hiver qu'en été et cela grâce à deux stratégies « passives » :
- la stratégie du chaud en hiver et à mi- saison
- la stratégie du froid en été

Les isolants interviennent dans ces deux stratégies dans la mesure où ils assurent un rôle de filtre entre la température extérieure et la température de l'ambiance intérieure.

• Isolation thermique

La qualité d'une isolation thermique repose sur les propriétés thermiques des matériaux et éléments de construction utilisés pour la réalisation de l'enveloppe d'un bâtiment, mais également sur leur dimensionnement et la qualité de leur mise en œuvre.
En hiver ou durant la saison froide, un flux thermique permanent va de l'intérieur vers l'extérieur. L'isolation thermique d'une enveloppe peut donc être définie comme la réduction de ce flux thermique au travers de celle-ci.
Pour évaluer l'isolation thermique d'une enveloppe, on a recours à différentes mesures ou coefficients : coefficient de conductivité thermique, coefficient de transmission thermique, capacité thermique, inertie… Ces différentes mesures ont été définies au chapitre 2

• Protection contre l'humidité

La protection contre l'humidité et l'isolation thermique des bâtiments sont interdépendantes.
La présence d'eau ou de vapeur d'eau réduit considérablement la conductivité thermique des matériaux de construction.
En outre, l'humidité au sein des parois d'un bâtiment peut provoquer la corrosion de certains éléments ou matériaux, la formation de moisissures et des dégâts en cas de gel.
Dans les matériaux isolants organiques, la présence d'humidité et d'eau entraîne l'altération et/ou la destruction du matériau et donc la perte de ces performances d'isolation.

• Isolation acoustique

En termes d'isolation acoustique, on distingue dans le bâtiment la protection contre les bruits aériens et la protection contre les bruits d'impact.
Grâce à leur capacité à contenir de l'air entre les fibres, les matériaux fibreux mous sont particulièrement adaptés à la réduction et à la protection des bruits aériens.
On utilise ces matériaux notamment dans les cloisons légères de séparation, les faux plafonds, les planchers d'étage (entre gîtes de bois).
Les isolants utilisés dans la protection contre les bruits d'impact sont toujours élastiques. Ces matériaux absorbent l'onde de choc dégagée, complètement ou en grande partie.
Ces isolants sont principalement utilisés sous les chapes ou sous le revêtement de sol.

• Protection incendie

Les isolants peuvent également servir à la prévention des incendies en empêchant un échauffement trop rapide des éléments de construction, principalement les structures.
La plupart des isolants inorganiques appartiennent à la classe A (ininflammable) et les isolants organiques à la classe B (inflammable).

• Protection de la santé

Même si les isolants ne sont pas en contact direct avec l'ambiance intérieure, ils devraient toutefois contenir un minimum de matières nocives pour la santé tels que formaldéhydes (laines minérales), styrène (isolants synthétiques), isocyanates (PUR), phénol... Or la plupart

des isolants contiennent des additifs présentant pour la plupart une certaine toxicité pour l'homme (produit ignifuge, insecticide...). Cette question est reprise au chapitre 5 de la seconde partie de la présente thèse.

11.3. Choix et mise en œuvre des matériaux isolants

Les matériaux isolants peuvent être présentés sous différentes formes : panneaux rigides, matelas, feutre, laine de bourrage, matériau en vrac ou encore mousse formée sur place.
Le choix d'un isolant adapté devrait se faire en tenant compte des conditions constructives, des règles techniques et des exigences particulières à respecter. Il faut tenir compte :

- des dimensions du produit, de sa masse volumique et de ses qualités intrinsèques ;
- des propriétés de résistance (à la pression ou compression, traction, pouvoir adhésif des mousses);
- de sa stabilité dimensionnelle au froid ou à la chaleur;
- de ses propriétés thermiques (conductivité et résistance thermique, capacité d'accumulation thermique) et de ses propriétés acoustiques;
- de sa protection contre l'humidité (perméabilité à la vapeur d'eau, perméabilité à l'eau…);
- de sa protection contre l'incendie.

Ainsi que nous l'avons précédemment souligné, le choix d'un isolant devra également intégrer les priorités du développement durable c.-à-d. tenir compte de son impact sur l'environnement et sur la santé, de sa durabilité (résistance au vieillissement, résistance aux UV, résistance à une humidité trop élevée…) et aussi de son coût et de l'investissement financier engendré par sa mise en œuvre.

Assemblage

Indépendamment du choix de l'isolant, on distingue plusieurs types de fixations ou d'assemblages.
Les assemblages en vrac nécessitent en général la préparation d'un caisson dans lequel viendra se placer l'isolant, sous forme de billes, de grains ou de flocons. L'isolant en vrac peut être mis en œuvre simplement par déversement, bourrage ou insufflation.
Les assemblages mécaniques sont souvent utilisés lorsque l'isolant est placé comme remplissage d'une structure. On utilise alors des agrafes ou des clous pour fixer l'isolant après l'avoir coincé entre les montants de la structure. On peut également fixer les isolants en panneaux grâce à des chevilles d'isolation, lorsque l'isolant est placé à l'extérieur des murs existants. Les assemblages en vrac ou mécaniques sont entièrement réversibles et en théorie l'isolant peut être réutilisé, pour autant que lors du démontage du bâtiment il soit traité séparément des autres matériaux.
Les assemblages qui nécessitent l'usage d'une colle – isolants en panneaux ou en rouleaux – ou d'un liant – isolants en vrac – ne sont généralement pas réversibles. Le matériau isolant est lié à un ou plusieurs autres matériaux et son démontage ne pourra pas se faire avec autant de facilité que pour les isolants utilisés en vrac ou assemblés mécaniquement. La plupart du temps, les matériaux mis en œuvre à l'aide de colle ou d'un liant sont inutilisables après démontage.
Précisons également que les isolants en vrac sont source de moins de déchets que les isolants en panneaux ou en rouleaux : leur fabrication et leur mise en œuvre n'occasionnent jamais de perte de matière comme les déchets de coupe.
Certains matériaux isolants doivent être mis en œuvre avec un additif. Pour certains panneaux – en matière synthétique ou en verre cellulaire –, il s'agit de colle ; pour des matériaux en vrac – chanvre, argile expansée… –, un liant est parfois nécessaire pour renforcer la cohésion de l'isolant et assurer de meilleures propriétés mécaniques.
Le choix de la fixation aura donc une influence considérable sur le traitement futur de l'isolant (réutilisation, recyclage…). Cependant, il est important de souligner que bien que la plupart des matériaux soient techniquement recyclables, ces techniques sont en avance sur la pratique actuelle courante. En règle générale, les isolants minéraux sont déposés en décharge et les isolants organiques réutilisés en combustibles.

Aspects environnemental et sanitaire

Les matériaux d'isolation ont des bilans environnementaux foncièrement différents selon la nature des matières premières utilisées et le type de transformations subies. C'est pourquoi l'aspect environnemental sera repris dans la description des principaux isolants.
L'aspect santé dépend du type d'adjuvant utilisé, du choix de fixation ou d'assemblage, mais également du matériau en soi, notamment en ce qui concerne les matériaux fibreux (laines minérales, fibres végétales...) et les additifs contenus dans celui-ci. Cette question sera développée dans la seconde partie de ce travail.

11.4. Matériaux isolants

Quelques matériaux isolants seront sélectionnés et décrits ci-dessous :

Laines minérales

Lorsqu'on parle de laines minérales, on distingue les laines de roche et les laines de verre.
Les laines de verre sont constituées de verre recyclé (entre 30 et 80 %), de sable, de quartz, de feldspath, de carbonate de sodium. À cela s'ajoute entre 3 et 9 % de liants en résines artificielles ou végétales et 1 % environ de produit d'hydrophobisation à base d'huile minérale ou d'huile silicone.
Les laines de roche sont fabriquées à partir de roches volcaniques (diabase, basalte ou diorite) et des déchets de laine de roche (25 à 50 %). La part de produit d'hydrophobisation est de liants est légèrement inférieure à celle de la laine de verre.



Illustration AN.84 : Laine de roche



Illustration AN.85 : Verre cellulaire



Illustration AN.86 : Perlite expansée

Lors de la fabrication des laines minérales, les matières premières sont fondues à une température comprise entre 1300 et 1500 °C. La roche ou le verre fondu est défibré par centrifugation, soufflage et extrusion. Les fibres sont ensuite enrobées par pulvérisation de résines. La nappe ainsi constituée passe ensuite dans une étuve où la résine est durcie par polymérisation, assurant la stabilité et la tenue mécanique de l'ensemble.

• Propriétés

Les laines minérales présentent de très bonnes performances thermiques et acoustiques.

Elles ont également un très bon comportement au feu puisqu'elles sont considérées comme des matériaux incombustibles ou ininflammables (avec pare-vapeur).

Les laines minérales sont des isolants perméables à la vapeur d'eau, mais elles doivent toutefois être protégées d'une humidité trop importante qui menace à la fois leur performance thermique et leur rigidité. La laine de roche est cependant moins sensible que la laine de verre.

Les laines minérales sont imputrescibles, non consommables, mais facilement dégradables par les rongeurs.

• Présentations

- panneaux rigides ou matelas, revêtus ou non d'un pare-vapeur;
- en vrac pour insufflation;
- panneaux composites (plaque de carton-plâtre, panneaux sandwiches…);

• Mise en œuvre et utilisations

Les laines minérales sont utilisées pour l'isolation thermique des toitures, murs extérieurs, dalles et planchers, pour l'isolation acoustique contre les bruits d'impacts, mais également pour la protection contre les incendies.

La mise en œuvre des laines minérales, en tant que matériau irritant, nécessite l'usage de gants et de masques.

• Aspect environnemental et recyclage

Les laines minérales sont produites à partir de matières premières naturelles non renouvelables présentes en quantité importante et également à partir de déchets:

- le processus de fabrication des laines de verre intègre jusqu'à 60 % de déchets de verre;
- les laines de roche usagées peuvent être réduites sous forme de briquette puis réinjectées dans le processus de fabrication en tant que matières premières secondaires.

Ces dernières années, les fabricants ont considérablement réduit la demande en énergie des procédés de fabrication et, ce faisant, les émissions de polluants atmosphériques.

• Aspect santé

L'impact sanitaire des laines minérales est lié d'une part aux fibres contenues dans ce type de matériau et d'autre part au liant utilisé dans le processus de fabrication.

Les facteurs de danger des fibres proviennent à la fois de la forme de la fibre et de sa taille. Ce point est clairement expliqué au chapitre 5 de la deuxième partie de cette thèse.

Dans la plupart des laines minérales, les fibres sont liées au moyen de liant à base de résines phénoliques : phénol-urée-formaldéhyde ou phénol-formaldéhyde. Ceci a pour conséquence que les laines sont susceptibles de dégager du formaldéhyde.

Si les concentrations de formaldéhyde émis par les laines minérales restent en dessous des niveaux recommandés par l'OMS pour les personnes normales (de l'ordre de 0,0009 à 0,08 mg/m^3[26]), elles peuvent cependant dépasser les niveaux recommandés pour les personnes plus sensibles.

Certains fabricants, sensibles à cette problématique ont développé des produits avec un liant naturel sans formaldéhyde provenant de matériaux organiques natu-

26 Source: [DEOUX 2006]

rels.
En outre, les laines minérales sont irritantes pour la peau et les voies respiratoires. Elles peuvent provoquer lors de leur mise en œuvre des démangeaisons, des eczémas...

Verre cellulaire

Le verre cellulaire est produit à partir de verre recyclé (jusqu'à 70 %), de sable de quartz, de feldspath, d'oxyde de fer, de carbonate de sodium et de carbone.
Relativement similaire à la fabrication du verre, celle du verre cellulaire consiste à faire fondre à environ 1400 °C les matières premières. Après refroidissement le verre ainsi obtenu est broyé en poudre de verre à laquelle est ajouté un agent moussant (poudre de carbone) puis à nouveau chauffé. À des températures de 700° à 1000 °C, la poudre de carbone provoque un dégagement interne de CO_2 qui fait mousser le mélange liquide.

• Propriétés

Le verre cellulaire est un matériau relativement léger, à structure cellulaire fermée, étanche à la vapeur d'eau, insensible au feu (incombustible) et à l'humidité, incompressible et indéformable.
Ses performances thermiques sont moins intéressantes que celles des laines minérales.
Le verre cellulaire est imputrescible et inattaquable par les rongeurs.

• Présentations

- panneaux rigides;
- en vrac pour remplissage.

• Mise en œuvre

Le verre cellulaire est principalement utilisé pour l'isolation des éléments de construction en contact avec le sol ou soumis à des pressions élevées : isolation des murs enterrés, isolation sous radier, isolation de sols industriels, isolation des toitures plates et végétalisées.
Il est en règle générale collé au bitume, ce qui le rend impropre au recyclage.

• Aspect environnemental et recyclage

Le verre cellulaire est produit à partir de ressources naturelles non renouvelables, mais présentes en grande disponibilité et à partir de déchets de verre.
Sa fabrication nécessite une énergie importante et provoque des émissions conséquentes de polluants atmosphériques.
Le verre cellulaire est difficilement réutilisable comme isolant s'il est mélangé au bitume, mais il peut être broyé et utilisé en tant que matériau de remblai.

• Aspect santé

Le verre cellulaire en lui-même ne présente pas de danger sanitaire lors de sa mise en œuvre et de sa vie en œuvre.
Cependant, dans la plupart des cas, le verre cellulaire est collé au bitume, matériau issu du raffinage du pétrole. Lorsqu'il est chauffé, le bitume dégage des fumées nocives pour la santé. Selon , l'INRS, parmi les troubles observés, on peut citer des irritations de l'oeil, du nez, de la gorge, de la peau et des tissus respiratoires,une augmentation de l'état de fatigue, des céphalées, des nausées, des troubles du sommeil… Certains rapports mentionnent également des atteintes non malignes du poumon comme la bronchite, l'emphysème et l'asthme.
Les fumées de bitume, comme l'ensemble des dérivés pétroliers, contiennent plusieurs centaines de molécules complexes : paraffiniques, naphténiques, aromatiques, polyaromatiques…
Un certain nombre d'hydrocarbures aromatiques polycycliques ont une activité cancérogène reconnue et sont classés substances cancérogènes de catégorie 2 par l'Union européenne.
D'autres composés aromatiques, parmi lesquels certains hétérocycles ou des HAP substitués, peuvent également présenter une activité génotoxique[27].

27 source: [INRS] : fiche sur le bitume

Perlite expansée

La perlite est une roche volcanique siliceuse que l'on retrouve en Grèce, en Hongrie, en Allemagne…
Pour obtenir de la perlite expansée, on chauffe la roche, après broyage, à une température comprise entre 1000 °C et 1200 °C. À cette température la roche devient visqueuse. L'eau contenue chimiquement dans la matière est transformée en vapeur d'eau. Cette réaction fait gonfler la matière sous forme de billes en multipliant son volume par 15/20.
Les billes de perlite subissent ensuite une hydrophobisation avec des silicones ou des enrobages au bitume et/ou aux résines naturelles.

• Propriétés

La perlite expansée est un matériau relativement léger, incombustible, ouvert à la diffusion de vapeur, insoluble dans l'eau, insensible aux micro-organismes, imputrescible, inattaquable par les rongeurs et ininflammable.
Ses performances thermiques sont moins intéressantes que celles des laines minérales.

• Présentations

Les particularités d'isolation de la perlite sont connues depuis 150 ans, mais elle ne sera réellement utilisée dans le bâtiment qu'après la Seconde Guerre mondiale
La perlite expansée est présentée en vrac en tant que :
- granulat léger pour béton et mortier;
- remblai d'égalisation sous chape;
- isolation en vrac des toitures ou des planchers.

L'adjonction de liants et de fibres (organiques ou inorganiques) permet de transformer les billes de perlite expansée en panneaux.
La perlite sous forme de granulats en vrac est réutilisable et/ou recyclable.

• Aspect environnemental et recyclage

La perlite expansée est fabriquée à partir d'une ressource naturelle non renouvelable présente en grande disponibilité.
Le processus de fabrication nécessite une énergie rela-

tivement peu importante.
La perlite sous forme de granules en vrac peut être réutilisée sous forme d'isolant. Les autres produits à base de perlite sont difficilement recyclables en tant qu'isolant, mais peuvent être concassés et utilisés comme remblais.

• Aspect santé

La perlite, en tant que telle, ne présente pas de dégagement toxique pour la santé.
Par contre, les présentations bituminées ou siliconées ainsi que les panneaux liés au polyuréthane entraînent des émissions toxiques liées à ces matières.

Argile expansée

L'argile extraite de carrière est d'abord stockée pendant une année environ avant d'être utilisée.
Les billes d'argile expansée sont obtenues par la cuisson à 1100 °C de granules d'argile crue dans des fours rotatifs. L'expansion des billes est provoquée par le dégagement de gaz et de vapeur d'eau lors de la cuisson des éléments organiques contenus dans l'argile ou dans des huiles ajoutées à l'argile. Les billes ont une forme arrondie et régulière à structure cellulaire poreuse.

• Propriétés

L'argile expansée est un matériau lourd, ouvert à la diffusion de vapeur, insensible à l'eau, résistant à la compression, incombustible, insensible aux micro-organismes, imputrescible et inattaquable par les rongeurs.
Ses propriétés isolantes sont plutôt faibles par rapport aux autres isolants.
Sa perméabilité à la vapeur d'eau est variable et dépend de l'adjonction ou non de liant.

• Présentations

L'argile expansée est présentée en vrac en tant que :
- isolant pour planchers ou radiers;
- granulat pour béton ou mortier;
- granulat pour blocs de construction préfabriqués.

L'argile expansée sous forme de granulats en vrac est réutilisable et/ou recyclable.
L'argile expansée ne dégage pas d'émissions toxiques en cours d'utilisation ni en cas d'incendie.

• Aspect environnemental et recyclage

L'argile expansée est fabriquée à partir d'une ressource naturelle non renouvelable, mais présente en grande disponibilité.
Le processus de fabrication nécessite très peu d'énergie.
En fin de vie, l'argile expansée sous forme de granules en vrac peut être réutilisée comme isolant. Les autres présentations sont recyclées sous forme de remblais.

• Aspect santé

L'argile expansée ne présente pas de danger pour la santé.

Polystyrène expansé (EPS)

Le polystyrène est utilisé dans le bâtiment depuis les années 50 et occupe une place importante sur le marché des isolants.
Le polystyrène expansé est obtenu à partir de styrène, composé chimique incolore, toxique et inflammable, produit industriellement à partir du pétrole ou du gaz naturel.
Après polymérisation, le styrène est expansé au moyen de vapeur d'eau et d'agents moussants tels que le pentane, créant ainsi des billes de dimensions comprises entre 0,1 et 0,2 mm.
Après séchage, les billes (ou granulats) sont portées à une température d'environ 100 °C par vapeur d'eau dans un appareil de prémoussage qui multiplie par un facteur de 20 à 50 leur volume initial puis sont expansées de façon continue en panneaux.
Selon le domaine d'utilisation, la part du matériau d'EPS pur recyclable peut atteindre les 40 %.

• Propriétés

Le polystyrène expansé est un matériau léger (20 à 30 kg/m^3) et imputrescible, avec des performances thermiques élevées. Cependant, il ne résiste pas aux solvants, aux UV (la mousse devient cassante si elle subit un ensoleillement direct) et à la chaleur (température limite entre 75 et 85 °C).
Il présente la plupart du temps une résistance élevée à la diffusion de vapeur d'eau.
Le polystyrène expansé est non consommable, mais facilement dégradable par les rongeurs.

• Présentations

En tant que matériau isolant, le polystyrène expansé peut être utilisé sous forme de :
- granules en vrac pour insufflation ou fabrication de bétons légers;
- de panneaux simples, composites (assemblés avec une plaque de carton plâtre) ou panneaux sandwich;
- d'éléments moulés.

• Mise en œuvre

L'EPS est principalement utilisé en isolation thermique de l'ensemble des parois (murs, toiture et sol) ainsi qu'en isolation acoustique.
Il est aujourd'hui fortement utilisé en isolation extérieure de façade et recouvert d'un enduit. Dans ce cas précis, il est soit collé, soit fixé à l'aide de chevilles spécifiques, soit assemblé au moyen des deux techniques précédentes selon la hauteur du bâtiment.

• Aspect environnemental et recyclage

Le polystyrène expansé est fabriqué à partir de matières issues du raffinage du pétrole, c.-à-d. une ressource synthétique non renouvelable et présente en quantité limitée.
Le processus de fabrication nécessite une énergie importante et est relativement polluant. Le processus de fabrication utilise comme agent moussant du pentane qui lorsqu'il est émis dans l'atmosphère provoque une pollution par ozone photochimique et par effet de serre.

• Aspect santé

En présence d'une source de chaleur importante, cet

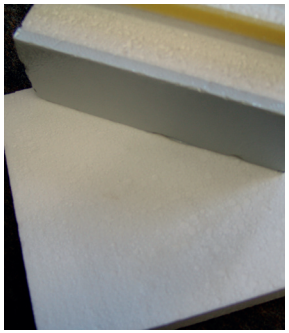



Illustration AN.87 : Polystyrène expansé (EPS), graphité ou non



Illustration AN.88 : Polystyrène extrudé (XPS)



Illustration AN.89 : Polyuréthane

isolant dégage du styrène, substance neurotoxique et cancérogène.
En cas d'incendie, le polystyrène dégage des gaz toxiques, principalement à cause des additifs retardateurs de flammes.

Polystyrène extrudé (XPS)

La composition chimique de la mousse de polystyrène extrudé est très proche de celle du polystyrène expansé (EPS).
Le granulat de polystyrène est fondu et transformé en moussant à l'aide d'un agent moussant. La mousse obtenue est mise en forme.
Après fabrication, un échange gazeux entre le dioxyde de carbone CO_2[28] et l'air ambiant se produit, lui conférant une structure à pores fermés et dont les cellules renferment de l'air.

• Propriétés

Le polystyrène extrudé est un matériau léger, imputrescible et ayant des performances d'isolation élevées.
Il possède une excellente résistance à la compression et une bonne résistance à la diffusion de vapeur d'eau grâce à sa structure à pores fermés.
Cependant le polystyrène extrudé ne résiste pas aux rayons UV, aux solvants et à la chaleur (sa température limite d'utilisation est de 75 °C).
Le polystyrène expansé est non consommable, mais facilement dégradable par les rongeurs.

• Présentations

Le polystyrène est utilisé sous forme de panneaux simples, composites ou panneaux sandwich et sous forme d'éléments moulés.

• Mise en œuvre

Le polystyrène extrudé est principalement utilisé en isolation thermique :
- isolant pour murs enterrés ou sous radiers;
- isolant de surfaces soumises à des fortes pressions;
- isolant pour rupture de ponts thermiques (bacons, linteaux…).

• Aspect environnemental et recyclage

Le polystyrène expansé est fabriqué à partir de matières issues du raffinage du pétrole, c.-à-d. une ressource synthétique non renouvelable et présente en quantité limitée.
Le processus de fabrication nécessite une énergie importante et est relativement polluant.

• Aspect santé

En présence d'une source de chaleur importante, cet isolant dégage du styrène, substance neurotoxique et cancérogène.
En cas d'incendie, le polystyrène dégage des gaz toxiques, principalement à cause des additifs retardateurs de feu.

Polyuréthane (PUR)

Les mousses de polyuréthane sont obtenues par mélange de trois composants: un polyol, un isocyanate et un agent d'expansion. Lors de la fabrication, des adjuvants sont rajoutés: des silicones comme stabilisateurs et des produits ignifugeants.
Les gaz expanseurs, à l'origine des CFC (chlorofluorcarbone) responsables de la destruction de la couche d'ozone, ont été remplacés par des gaz HCFC[29] (hydrofluorocarbones). On obtient ainsi des mousses dures

28 Depuis quelques années, le dioxyde de carbone a remplacé les hydrochlorofluorocarbones partiellement halogénés comme agent moussant. Source: [HEGGER 2009]

29 Gaz HCFC: contrairement au gaz CFC, les gaz HCFC ont des durées de vie atmosphérique beaucoup plus courtes que celles des CFC. Ceci implique qu'ils sont principalement décomposés dans la troposphère, qu'ils ont une probabilité plus faible d'atteindre la stratosphère et donc d'y détruire l'ozone. Cependant, ce sont de puissants gaz à effet de serre dans la troposphère : ils ne peuvent donc être considérés comme une alternative réellement efficace.

à cellules fermées, peu compressibles et présentant d'excellentes propriétés thermiques.

Il est important de faire remarquer que la matière première du polyuréthane peut être fabriquée à partir de matières naturelles renouvelables et végétales: betteraves sucrières, maïs, pommes de terre...

La société BASF, producteur mondial de cette matière première, a d'ailleurs mis au point un procédé de fabrication à base de maïs.

• Propriétés

La mousse de polyuréthane est un matériau de faible densité comparé à d'autres isolants (entre 30 et 40kg/m³). Elle possède une excellente conductivité thermique.

Ce matériau est imputrescible et peu/pas perméable à la vapeur d'eau. Il présente une instabilité aux solvants ainsi qu'une instabilité dans le temps et à la chaleur.

Il est non consommable, mais facilement dégradable par les rongeurs.

• Présentations

Les mousses de polyuréthane sont utilisées sous forme de :

- panneaux simples ou panneaux composés (avec une plaque de plâtre notamment);
- éléments préfabriqués (panneaux sandwich pour toitures ou planchers);
- éléments moulés;
- mousse à injecter pour le calfeutrement de cavités (huisseries notamment).

• Mise en œuvre et utilisation

Le polyuréthane est employé dans les mêmes domaines d'application que le polystyrène extrudé: isolation extérieure de murs, de toitures plates et de dalles grâce à sa bonne tenue à la compression et son insensibilité à l'eau.

Il est également fortement utilisé sous forme de mousse de calfeutrement.

• Aspect environnemental et recyclage

Les mousses polyuréthane sont fabriquées à base d'hydrocarbures, ressources synthétiques non renouvelables et présentes en quantité limitée.

Le processus de fabrication nécessite une énergie importante et est relativement polluant, les gaz HCFC étant des gaz à effet de serre et également suspectés d'être destructeurs de la couche d'ozone.

Les panneaux composites et panneaux sandwiches ne sont pas recyclables.

• Aspect santé

Les isocyanates sont issus d'un processus complexe à base de chlore et libèrent des amines aliphatiques, substances toxiques pouvant notamment provoquer des crises d'asthme.

Les émissions d'isocyanates et d'amines lors de la mise en œuvre sont importantes s'il s'agit de mousses à injecter. Ces émissions peuvent dépasser les valeurs limites autorisées.

Les panneaux durs émettent peu d'isocyanates.

En cas d'incendie, les mousses de polyuréthane dégagent, en plus des isocyanates et du monoxyde de carbone, de l'acide cyanhydrique qui, s'il est inhalé, peut entraîner la mort en quelques minutes. Les produits ignifugeants dégagent également des substances organophosphorées très toxiques pour le système nerveux[30].

Fibres de bois (WF : wood fibers)

Les panneaux de fibres de bois sont connus et fabriqués pour leurs capacités isolantes depuis 1945, mais ils ont été supplantés depuis les années 70 par les isolants minéraux et synthétiques.

Leur renouveau est venu d'Europe (Autriche, Allemagne, Suisse, Pays nordiques) depuis une quinzaine d'années avec des processus de fabrication améliorés et des gammes étendues de propositions techniques.

30 Source: [DEOUX 2006]

Les isolants en fibres de bois sont fabriqués à partir de bois résineux de petite section ou de déchets de bois résineux.

Le bois est réduit, déchiqueté et défibré puis mélangé avec de l'eau pour former une pâte. Le mélange est soit porté à une température relativement élevée suivant deux processus:

- processus humide qui fait ressortir la lignine du bois. Celle-ci, combinée à l'enchevêtrement des fibres, assure la liaison des fibres de bois;
- processus à sec qui assure la liaison des fibres par l'ajout en petites quantités de colle, de paraffine...

Les panneaux et matelas de fibres de bois liés à la lignine sont complètement compostables, ce qui n'est pas le cas si les panneaux ou les matelas sont liés à la colle.

• Propriétés

Les panneaux de fibres de bois sont des matériaux relativement lourds (entre 75kg et 270kg/m³). Ils sont hygroscopiques et relativement ouverts à la vapeur d'eau. Ils sont étanches au vent et disposent d'une bonne capacité d'accumulation thermique.

Leur performance thermique est bonne.

Les panneaux non recouverts de bitume sont réutilisables, recyclables ou susceptibles d'être compostés.

Les panneaux et matelas de fibres de bois sont inflammables et combustibles (classe E).

• Présentations

Les isolants en fibres de bois sont utilisés sous forme de :

- isolant en vrac pour insufflation ou projection;
- matelas mous;
- panneaux mi-durs;
- panneaux composites multicouches;

• Mise en œuvre et utilisation

Ce type d'isolant est utilisé pour l'isolation de murs, de planchers et de plafonds. Les matelas de fibres de bois sont principalement utilisés en isolation intérieure tandis

que les panneaux rigides sont également utilisés en isolation extérieure.
En toiture, il permet également de garantir une ambiance intérieure confortable en été vu sa capacité d'accumulation thermique.
Ces isolants sont également utilisés pour la protection contre les bruits aériens.

• Aspect environnemental et recyclage

Les panneaux et matelas de fibres de bois sont produits à partir de déchets de bois de scierie. Le bois est une ressource naturelle renouvelable et présente en très grande quantité en Europe.
Les processus de fabrication nécessitent une énergie importante, surtout dans le cas de panneaux rigides. Cependant, la plupart des fabricants utilisent en grande partie des énergies renouvelables: énergie hydraulique et biomasse, ce qui limite sensiblement la pollution atmosphérique.
En outre, la matière première est issue du bois qui est un puits naturel de carbone.
En fin de vie, les panneaux peuvent être compostés ou valorisés thermiquement.

• Aspect santé

Les panneaux de bois ne dégagent pas de matières toxiques même en cas d'incendie[31].
Les panneaux et matelas de fibres de bois ne sont pas des matériaux irritants.Ils peuvent donc être mis en œuvre sans protection.

Fibres de bois agglomérées

Les panneaux de fibres de bois agglomérées (ou fibragglos) sont des panneaux fabriqués à partir de déchets de bois résineux, rabotés et aux fibres longues.
Les fibres sont minéralisées ou enrobées de ciment, de plâtre et de ciment ou de magnésie. Après l'adjonction de liants minéraux, le mélange est mis sous pression à haute température avant d'être séché.
Un prétraitement supplémentaire des fibres de bois avec du sulfate de magnésium sert de protection contre les parasites.

• Propriétés

Les panneaux de fibres de bois agglomérées sont des matériaux rigides, relativement denses et lourds (300 à 400kg/m³). De par leur enrobage avec des liants minéraux, ils sont inertes, non inflammables, imputrescibles et résistants aux insectes, aux micro-organismes et aux rongeurs.
Leur performance thermique est faible par rapport aux autres isolants.
Les panneaux liés au ciment (panneaux gris) sont plus hygroscopiques que ceux liés à la magnésie (panneaux beiges).
Les panneaux de fibres de bois agglomérés ont une bonne capacité d'accumulation thermique, ils sont ouverts à la diffusion de vapeur d'eau et sont également de bons absorbeurs phoniques.

• Présentations

Les panneaux de fibres de bois agglomérées sont utilisés sont forme de :
- panneaux simples;
- panneaux composites, assemblés avec un isolant rapporté comme les laines minérales ou le polystyrène ou avec un matériau de finition (plaque de carton-plâtre, enduit…).

• Mise en œuvre et utilisation

Ce type de panneaux s'utilise principalement comme panneaux techniques complémentaires d'isolation :
- coffrage perdu;
- isolation en sous-face (plafonds ou sous toitures destinés à être enduits ou laissés bruts);
- aménagement intérieur / absorbant acoustique;
- plafonds suspendus / absorbant acoustique;
- support d'enduit.

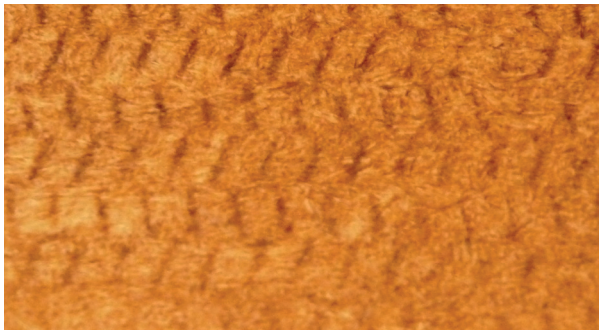


Illustration AN.90 : Matelas de fibres de bois



Illustration AN.91 : Panneaux de bois aggloméré



Illustration AN.92 : Panneaux de liège expansé

31 Sauf s'ils sont bituminés car le bitume dégage plusieurs gaz toxiques.

• Aspect environnemental et recyclage

Les panneaux agglomérés sont fabriqués à partir de déchets de bois résineux, une ressource naturelle renouvelable et présente en grande disponibilité.

L'impact environnemental de ces panneaux dépend en grande partie du liant: magnésie (ressource minérale non renouvelable peu abondante), plâtre, ciment (impact environnemental important)

Les panneaux liés au ciment demandent une énergie plus importante que ceux liés à la magnésie et au plâtre.

En fin de vie, ces panneaux ne peuvent pas être recyclés en tant qu'isolant. Ils sont la plupart du temps placés en centre d'enfouissement technique de classe 3 (déchet inerte).

• Aspect santé

Les panneaux agglomérés ne présentent pas de dégagements toxiques que ce soit à la mise en œuvre ou à l'utilisation.

Isolants en liège

Le liège expansé est utilisé depuis 150 ans en isolation thermique .

Les isolants en liège sont fabriqués à partir de l'écorce du chêne-liège provenant essentiellement du Portugal et dans une moindre mesure d'Espagne et d'Algérie.

Le démasclage ou l'enlèvement de la première écorce peut se faire une fois que l'arbre a atteint 25-30 ans d'âge. Ensuite, l'écorçage se fera tous les 9 à 10 ans, sans provoquer de risque pour l'arbre qui a une durée de vie de 150 ans. Le liège est donc une matière relativement peu abondante, d'où son prix élevé.

L'écorce est réduite en granules de liège et ensuite expansée à la vapeur d'eau sous pression à une température de 300 °C à 370 °C dans un four à autoclave. Au cours de cette opération, les granules brunissent, se dilatent (augmentation du volume de 20 à 100 %) et s'agglomèrent entre-elles grâce à la subérine, résine naturelle contenue dans l'écorce. L'aggloméré ainsi obtenu est ensuite découpé en panneaux.

D'autres liants peuvent intervenir dans la fabrication des panneaux; c'est notamment le cas du bitume.

• Propriétés

Le liège, qu'il soit en panneaux ou sous forme de granules, présente de bonnes propriétés d'isolation thermique, essentiellement dues à sa structure composée de cellules fermées qui renferment de l'air. Il a également une excellente capacité d'accumulation thermique et ses performances thermiques sont bonnes.

Le liège est un matériau isolant relativement lourd (80 à 120kg/m^3), d'une grande stabilité dimensionnelle, insensible aux micro-organismes, imputrescible et quasiment inaltérable.

Le liège expansé ne propage pas les flammes en cas d'incendie et est considéré comme « auto extinguible ».

Il est non consommable pas les rongeurs.

• Présentations

Le liège peut être utilisé sous forme de :

- granules et en vrac pour insufflation ou déversement;
- en granules pour béton léger et chape isolante;
- en panneaux simples;
- en éléments composites préfabriqués comme des éléments de structure auto-isolants, des panneaux de correction thermique et des chapes flottantes préfabriquées (planchers phoniques).

• Mise en œuvre et utilisation

Le liège est un isolant aux multiples applications thermiques et phoniques. Il peut être utilisé à l'intérieur (cloison, plancher) comme à l'extérieur (murs de façade, toitures, dalles).

• Aspect environnemental et recyclage

Les isolants en liège sont fabriqués à partir d'une ressource naturelle végétale et renouvelable, mais relativement peu abondante et locale (principalement le Portugal).

Le processus de fabrication nécessite une énergie relativement importante.

Ces isolants ont une longue durée de vie et peuvent être réutilisés dans la fabrication de nouveaux isolants sauf s'ils ont été bituminés.

• Aspect santé

Le liège expansé pur est sans effet nocif sur la santé, malgré l'odeur de la subérine[32] brûlée qui persiste pendant plusieurs mois après la fabrication.

En cas d'incendie, le liège ne dégage pas de substances toxiques.

Fibres de chanvre

Le chanvre est une plante « nettoyante ». Cette culture ne nécessite donc pas d'herbicides et laisse le sol propre pour la culture suivante.

C'est également une plante qui améliore la structure du sol et qui s'adapte bien à des terres de qualité moyenne et à des climats variés grâce à son cycle court.

Le chanvre est cultivée depuis l'arrivée des Celtes en Europe et a une longue tradition tant dans l'alimentation que dans l'industrie textile, la fabrication de cordages et autres usages techniques (fabrication du papier, d'huiles…)

Le chanvre a très peu été utilisé dans le secteur de la construction, car on le destinait souvent à des usages à plus forte valeur ajoutée.

Il est utilisé en tant que matériau d'isolation depuis les années 80 et a acquis depuis une dizaine d'années une place sur le marché de la construction « écologique ».

Les fibres de chanvre utilisées pour la fabrication d'isolants proviennent de la chènevotte, partie centrale et moelleuse de la tige de chanvre.

En fonction du type d'isolant, différents additifs sont in-

32 Subérine: la subérine est une substance cireuse, principal composant du liège. La subérine existe non seulement dans le liège mais aussi dans de nombreuses espèces végétales au niveau de la tige ou des racines



Illustration AN.93 : Laine de chanvre



Illustration AN.94 : Laine de lin



Illustration AN.95 : Matelas de cellulose

troduits dans le procédé de fabrication: silicates comme stabilisant au feu, bitume, fibres de polyester...
Les fibres de chanvre peuvent être utilisées en vrac (non traitées, traitées aux silicates ou enrobées au bitume) ou utilisées sont forme de laine (matelas et panneaux).
Dans certains produits, les fibres de chanvre sont mélangées à des fibres de lin. Les fibres de polyester servent de fibres structurelles

- Propriétés

Les isolants en chanvre sont des matériaux légers (ouate en vrac et matelas) à lourds (panneaux rigides) ayant de très bonnes propriétés d'isolation thermique et acoustique. Selon le produit, l'isolant en chanvre est considéré comme normalement ou difficilement inflammable. Il est ouvert à la diffusion de vapeur d'eau et a également une bonne capacité d'accumulation thermique.

- Aspect environnemental et recyclage

Les fibres de chanvre sont fabriquées à partir d'une ressource naturelle végétale, renouvelable, mais présente en quantité relativement limitée. Cependant, vu les qualités de la plante en termes d'agriculture, ce type de produit pourrait être encouragé.
La fabrication d'isolants en chanvre nécessite une quantité d'énergie relativement faible, mais dépend essentiellement des additifs incorporés (fibres polyester très énergivores).
En fin de vie, les isolants sont compostables sauf les produits bituminés ainsi que les produits contenant du polyester.

- Aspect santé

Les fibres de chanvre, comme les fibres de bois, de lin ou de cellulose sont des fibres végétales qui sont couramment perçues comme n'ayant aucun effet nocif sur la santé. Cependant, leur impact sanitaire est encore peu connu; ces matériaux n'ont, pour la plupart, pas été soumis à une évaluation toxicologique.
L'exposition aux fibres organiques dans l'industrie est habituellement considérée comme une exposition à des poussières. L'exposition professionnelle à ce type de poussières révèle une fréquence plus importante d'affections pulmonaires et de bronchites, mais celles-ci ne sont pas reliées à la forme fibreuse des particules, mais plutôt au mélange des produits chimiques et des micro-organismes contenus dans les particules.
Les affections respiratoires aiguës ou chroniques survenant après les expositions aux poussières organiques (chanvre, lin, coton, sisal...) sont reconnues comme maladies professionnelles depuis 1989 dans diverses activités industrielles.

Fibres de lin

Originaire d'Orient, le lin est connu en Europe depuis l'Antiquité où son utilisation comme plante textile s'est très vite généralisée.
Il fut utilisé dans l'habitat romain pour ses performances d'isolation. La plante de lin, comme celle du chanvre, ne nécessite aucun engrais ni pesticide. Elle a une période de végétation relativement courte.
Les matériaux d'isolation en lin sont fabriqués à partir des fibres courtes de la plante, sous-produit de l'industrie textile qui n'utilise que les fibres longues.
Les fibres récoltées sont séchées, grillées, cardées et transformées en fines nappes. Après adjonction de sels de bore ou de silicate de sodium pour la protection contre le feu, les différentes nappes sont, selon le fabricant, collées avec de la fécule de pomme de terre, soit thermoliées avec des fibres de liaison en polyester pour former la ouate. La matière est ensuite séchée, aérée et découpée.

- Propriétés

Les isolants en lin sont des matériaux légers (ouate en vrac et matelas) à lourds (panneaux rigides) ayant de très bonnes propriétés d'isolation thermique et acoustique. Selon le produit, l'isolant en lin est considéré comme normalement ou difficilement inflammable. Il est ouvert à la diffusion de vapeur d'eau et a également une bonne capacité d'accumulation thermique.

- Présentations

Le lin est utilisé en tant qu'isolant sous forme de :
- ouate en vrac, comme isolant de remplissage (manuellement, projection ou insufflation mécanique);
- rouleaux de laine de lin;
- panneaux semi-rigides;
- feutre de laine de lin;
- panneaux agglomérés.

• Mise en œuvre et utilisation

Les isolants en lin sont principalement utilisés comme isolant thermique et acoustique dans les structures à ossature (planchers, murs, cloisons intérieures, plafonds). La plupart du temps, ils sont placés en vrac ou en rouleaux.

• Aspect environnemental et recyclage

Les matériaux d'isolation à base de lin sont fabriqués à partir d'une ressource naturelle végétale et renouvelable qui est en réalité un sous-produit (ou déchet) de l'industrie textile.

Le processus de fabrication nécessite une énergie relativement importante. Le lin, en tant que fibre végétale, est un puits naturel de carbone, comme le bois, mais dans une moindre mesure, vu la courte période de végétation. Le bilan environnemental des isolants en lin dépend également des additifs ou adjuvants comme notamment les fibres polyester qui servent de structure.

En fin de vie, les isolants en lin sont compostables sauf s'ils sont structurés au moyen de fibres polyester.

• Aspect santé[33]

Les fibres de lin ne provoquent pas d'irritation cutanée, ni de démangeaisons lors de la pose de l'isolant.

Des affections respiratoires peuvent survenir lors de l'inhalation de poussières de lin chez les professionnels, lors de la pose de l'isolant, bien que celle-ci provoque moins de dégagement de poussières que celle de la cellulose.

Ces affections se manifestent par des essoufflements, une oppression et/ou un syndrome grippal. Ces symptômes disparaissent au bout d'une semaine.

Aucune information n'est actuellement disponible sur les effets sanitaires de l'inhalation des fibres végétales.

Fibres de cellulose

Parmi les isolants issus de matières végétales et renouvelables, les produits en fibre de cellulose détiennent actuellement la première part de marché grâce à leurs performances hygrothermiques, leur prix compétitif et leur facilité de mise en œuvre.

La laine de cellulose est utilisée comme isolant depuis 1920 aux États-Unis et en Scandinavie. Elle est apparue en Europe au milieu des années 80.

La laine de cellulose est fabriquée à partir de vieux papiers non utilisés: journaux sans encre au plomb, coupe de papiers neufs d'imprimerie…

Le papier est défibré et réduit en flocons, puis stabilisé par incorporation de divers agents de texture et ignifugeants: sels de bore, gypse, sels de sodium, de calcium[34]...

Les panneaux de cellulose sont obtenus par l'ajout de fibres de jute ou de polyester et de liants (lignine, huile de lin...).

• Propriétés

Les isolants en fibre de cellulose sont des matériaux légers (de 30 à 100kg/m³) ayant de très bonnes propriétés d'isolation thermique et acoustique.

Les fibres de cellulose sont hygroscopiques et ouvertes à la diffusion de vapeur d'eau.

Les fibres de cellulose sont insensibles aux micro-organismes, non consommables par les rongeurs et imputrescibles.

En cas d'incendie, les fibres de cellulose sont difficilement combustibles et ne provoquent pas de dégagement toxique.

• Présentations

Les isolants à base de fibres de celluloses sont utilisés sous forme de:
- laine en vrac pour déversement, remplissage à la main ou insufflation;
- panneaux mi-durs;
- panneaux composites, assemblés avec une plaque de carton-plâtre (panneaux phoniques).

• Mise en œuvre et utilisation

Les isolants en fibre de cellulose sont essentiellement utilisés en vrac, en tant qu'isolant thermique et acoustique.

L'insufflation doit être réalisée par une entreprise spécialisée et agréée: la laine est cardée et aérée avant d'être insufflée sous pression dans des caissons préalablement fermés.

La laine de cellulose peut également être projetée, soit à sec pour des applications horizontales (combles, toitures, planchers), soit humidifiée pour des applications verticales (isolation par l'intérieur de murs existants, murs à ossature…).

• Aspect environnemental et recyclage

Les flocons et panneaux de cellulose sont fabriqués à base de déchets de papier, ressource issue du recyclage et de grande disponibilité. L'utilisation de ce déchet dans la production d'isolant est moins énergivore et moins polluante que dans la production de nouveau papier[35].

Le processus de fabrication des flocons nécessite très peu d'énergie grise et est de ce fait peu polluant. Ce n'est pas le cas du processus de fabrication des panneaux qui lui est relativement énergivore.

En fin de vie, les flocons sont réutilisables. Le matériau n'est normalement pas compostable, mais certains fabricants proposent des isolants sans sels de bore afin de permettre leur compostage ou l'utilisation agricole

33 Source: [DEOUX 2006]

34 Source: [OLIVA 2001]

35 Source: [OLIVA 2001]

des déchets.
Les panneaux sont valorisables thermiquement.

• Aspect santé

La pose par soufflage ou flocage des flocons de cellulose entraîne l'émission de poussières. Il est donc recommandé de porter un masque anti-poussière et des lunettes de protection.
Actuellement quelques études expérimentales indiquent que la cellulose ne peut être considérée sans effet respiratoire.Cependant peu ou pas de données toxicologiques sont disponibles[36].
Lors de la pose, les applicateurs peuvent subir des expositions au bore relativement importantes.
Il n'y a pas d'effet sanitaire sur l'occupant, une fois que l'isolant est mis en place.

Autres matériaux isolants à base de fibres végétales ou animales

Il existe encore d'autres matériaux d'isolation tels que les fibres de coton, les fibres de noix de coco, la paille, les roseaux, la laine de mouton, les céréales…
Ces isolants ne seront pas décrits pour diverses raisons dont notamment leur très faible part de marché; leur faible commercialisation, le manque de certifications et pour certains leur écobilan peu favorable.
Cependant, divers ouvrages repris dans la bibliographie en donnent une description assez complète.

Matériaux isolants innovants

Une remarque doit également être faite sur les matériaux isolants innovants. Ces matériaux innovants ont été au départ mis au point pour des utilisations très spécifiques, notamment dans l'industrie aérospatiale, la construction nautique ou encore le transport frigorifique.On peut notamment citer:
- les aérogels : l'aérogel est un matériau solide, extrêmement léger, fortement poreux;
- les isolants minces réfléchissants : un isolant mince réfléchissant, thermoréflecteur ou multiréflecteur, est constitué, dans sa partie centrale, d'une mince couche de matériau (mousse plastique, film de polyéthylène emprisonnant des bulles d'air ou une matière fibreuse) recouverte sur une ou deux faces de feuilles réfléchissantes (aluminium);
- isolants thermiques transparents (TWD) : ces isolants font partie d'un système constitué de matériaux légers et perméables ayant un effet d'isolation thermique qui permet d'utiliser l'énergie solaire comme gains (chauffage) en liaison avec une paroi extérieure opaque.



Illustration AN.96 : Laine de mouton - Photo: bureau Calimucho



Illustration AN.97 : Béton de chaux et de chanvre

36 Source: [DEOUX 2006]

Annexe 2

Performances hygrothermiques des matériaux de construction

Matériaux et composants	Densité ρ kg/m³	Conductiv.therm λ W/mK	Chaleur spécif. C J/kgK	Capacité therm. ρC ρC KJ/m³K	Diffusivité $\lambda/\rho C$ m²/s	Effusivité $(\lambda\rho C)^{1/2}$ J/m²Ks½	Résistance à la diffusion de vapeur d'eau µ sec	 µ humide	Durée de vie an
GRANULATS									
sable de rivière/mer	*[1700 à 2200]* **2000**	2,000	*[910 à 1180]* **1000**	2000,00	1,000	2000,000	50,00	50,00	> 50
sable de carrière	*[1700 à 2200]* **2000**	2,000	*[910 à 1180]* **1000**	2000,00	1,000	2000,000	50,00	50,00	> 50
gravier de rivière/mer	*[1700 à 2200]* **2000**	2,000	*[910 à 1180]* **1000**	2000,00	1,000	2000,000	50,00	50,00	> 50
gravier de carrière	*[1700 à 2200]* **2000**	2,000	*[910 à 1180]* **1000**	2000,00	1,000	2000,000	50,00	50,00	> 50
BETON COULE ET CIMENT									
béton maigre	*[2000 à 2200]* **2000**	1,650	1000	2000,00	0,825	1816,590	100,00	60,00	> 50
béton normal armé (dalles)	2400	2,500	1000	2400,00	1,042	2449,490	130,00	80,00	> 50
béton normal armé (charges élévées)	2400	2,500	1000	2400,00	1,042	2449,490	130,00	80,00	> 50
ciment portland CEM I	*[900 à 1900]* **1250**	/	/	/	/	/			> 50
chape de compression sur hourdis	1700	1,150	1000	1700,00	0,676	1398,213	100,00	60,00	> 50
chape ciment	1700	1,150	1000	1700,00	0,676	1398,213	100,00	60,00	> 50
BETON PREFABRIQUE									
hourdis en béton	1800	1,150	1000	1800,00	0,639	1438,749	10,00	5,00	> 50
BLOCS DE MACONNERIE									
bloc de béton lourd	2400	1,900	1000	2400,00	0,792	2135,416	100,00	60,00	> 50
bloc de béton semi-lourd	2000	1,320	1000	2000,00	0,660	1624,808	100,00	60,00	> 50
bloc de béton léger (argile expansé)	1200	0,440	1000	1200,00	0,367	726,636	8,00	6,00	> 50
bloc de terre cuite plein	*[1000 à 2200]* **1000**	0,290	1000	#VALEUR!	#VALEUR!	#VALEUR!	10,00	5,00	> 50
bloc de terre cuite creux	650	0,200	1000	650,00	0,308	360,555	10,00	5,00	> 50
bloc silico-calcaire	1800	0,910	1000	1800,00	0,506	1279,844	25,00	5,00	> 50
bloc béton cellulaire	*[600 à 800]* **650**	0,200	1000	650,00	0,308	360,555	10,00	6,00	> 50

Matériaux et composants	Densité ρ kg/m^3	Conductiv.therm λ W/mK	Chaleur spécif. C J/kgK	Capacité therm. ρC ρC KJ/m^3K	Diffusivité $\lambda/\rho C$ m^2/s	Effusivité $(\lambda\rho C)^{1/2}$ $J/m^2Ks^{1/2}$	Résistance à la diffusion de vapeur d'eau µ sec	 µ humide	Durée de vie an
MORTIERS									
mortier de ciment (ciment portland)	1700	1,000	1000	1700,00	0,588	1303,840	20,00	10,00	> 50
mortier bâtard (chaux et ciment)	1800	0,800	1000	1800,00	0,444	1200,000	20,00	10,00	> 50
mortier colle	1600	0,900	1000	1600,00	0,563	1200,000	20,00	10,00	> 50
METAUX									
acier d'armatures	7800	50,000	450	3510,00	14,245	13247,641	∞	∞	> 50
profilé d'acier	7800	50,000	450	3510,00	14,245	13247,641	∞	∞	> 50
profilés d'acier inoxydable	7900	17,000	460	3634,00	4,678	7859,898	∞	∞	> 50
profilés d'aluminium (30% recycl.)	2800	160,000	880	2464,00	64,935	19855,478	∞	∞	> 50
tôle d'aluminium	2800	160,000	880	2464,00	64,935	19855,478	∞	∞	> 50
tôle d'aluminium anodisé	2800	160,000	880	2464,00	64,935	19855,478	∞	∞	> 50
tôle d'aluminium thermolaqué	2800	160,000	880	2464,00	64,935	19855,478	∞	∞	> 50
tôle d'acier zingué	7800	/	/	/	/	/	∞	∞	> 50
tôle de cuivre	8900	380,000	380	3382,00	112,360	35849,128	∞	∞	> 50
tôle de zinc	7200	110,000	380	2736,00	40,205	17348,199	∞	∞	> 50
BOIS DE STRUCTURE									
poutre bois massif résineux européen	600	0,130	1600	960,00	0,135	353,27	150,00	50,00	> 50
poutre bois massif feuillus européen	800	0,180	1600	1280,00	0,141	480,00	200,00	70,00	> 50
poutre en lamellé-collé	500	/	/	/	/	/	/	/	> 50
poutre en lamellé-collé résistant à l'eau	500	/	/	/	/	/	/	/	> 50
lattage en bois résineux européen	600	0,130	1600	960,00	0,135	353,27	150,00	50,00	30
lattage en bois feuillus européen	800	0,180	1600	1280,00	0,141	480,00	200,00	70,00	30
PANNEAUX A PARTICULES									
panneau multiplex	700	0,170	1600	1120,00	0,152	436,35	220,00	90,00	30
panneau OSB	500	0,130	1700	850,00	0,153	332,42	50,00	30,00	30
panneau MDF	800	0,180	1700	1360,00	0,132	494,77	30,00	20,00	30
panneau à particules tendre	300	0,100	1700	510,00	0,196	225,83	50,00	10,00	30
panneau à particules dur	900	0,180	1700	1530,00	0,118	524,79	50,00	20,00	30
panneau de fibres liées au bitume	300	0,050	2000	600,00	0,083	173,21	10,00	5,00	30
panneau de fibres liées au ciment	1200	0,230	1500	1800,00	0,128	643,43	50,00	30,00	30

Matériaux et composants	Densité ρ kg/m³	Conductiv.therm λ W/mK	Chaleur spécif. C J/kgK	Capacité therm. ρC ρC KJ/m³K	Diffusivité λ/ ρC m²/s	Effusivité (λρC)½ J/m²Ks½	Résistance à la diffusion de vapeur d'eau µ sec	 µ humide	Durée de vie an
BOIS DE BARDAGE									
bois de bardage résineux européen	600	0,130	1600	960,00	0,135	353,27	150,00	50,00	30
bois de bardage feuillus européen	800	0,180	1600	1280,00	0,141	480,00	200,00	70,00	30
REVETEMENT DE SOL EN BOIS									
plancher massif - résineux européen	600	0,130	1600	960,00	0,135	353,27	150,00	50,00	30
plancher massif - feuillus européen	800	0,180	1600	1280,00	0,141	480,00	200,00	70,00	30
ISOLANT THERMIQUE ET ACOUSTIQUE - base minérale									
laine de roche	*[15 à 200]* **100**	*[0,031 à 0,044]* **0,035**	1030	103,00	0,3398	60,04	2,00	1,00	30
laine de verre	*[10 à 120]* **60**	*[0,031 à 0,044]* **0,035**	1030	61,80	0,5663	46,51	2,00	1,00	30
verre cellulaire - panneaux	*[100 à 150]* **120**	[*0,038 à 0,050*] **0,040**	1000	120,00	0,3333	69,28	∞	∞	> 50
verre cellulaire - en vrac	*[130 à 150]* **130**	0,089	900	117,000	0,7607	102,04	?	?	> 50
perlite expansée - panneaux	[*140 à 240*] **145**	[*0,050 à 0,065*] **0,057**	900	130,50	0,4368	86,25	5,00	5,00	> 50
perlite expansée - en vrac	[*30 à 150*] **90**	[*0,050 à 0,065*] **0,057**	900	130,50	0,4368	86,25	2,00	2,00	> 50
billes d'argile expansée	*[200 à 400]* **300**	[*0,090 à 0,160*] **0,125**	1000	300,00	0,4167	193,65	2,00	2,00	> 50
ISOLANT THERMIQUE ET ACOUSTIQUE - base synthétique									
polystyrène expansé	*[10 à 50]* **30**	0,031 à 0,045 **0,035**	1450	43,50	0,8046	39,02	60,00	60,00	30
polystyrène expansé graphité									30
polystyrène extrudé	[*20 à 65*] **35**	0,028 à 0,038 **0,035**	1450	50,75	0,6897	42,15	150,00	150,00	30
polyuréthane - panneau	[*20 à 65*] **40**	0,023 à 0,029 **0,025**	1400	56,00	0,4464	37,42	60,00	60,00	30
mousse phénolique - panneau	[*20 à 50*] 35	0,022 à 0,038 **0,030**	1400	49,00	0,6122	38,34	50,00	50,00	30

Matériaux et composants	Densité ρ kg/m^3	Conductiv.therm λ W/mK	Chaleur spécif. C J/kgK	Capacité therm. ρC ρC KJ/m^3K	Diffusivité $\lambda/\rho C$ m^2/s	Effusivité $(\lambda\rho C)^{1/2}$ $J/m^2Ks^{1/2}$	Résistance à la diffusion de vapeur d'eau µ sec	 µ humide	Durée de vie an
ISOLANT THERMIQUE ET ACOUSTIQUE - fibres végétales									
matelas de fibres de bois	75	[*0,035 à 0,060*] **0,040**	1470	110,25	0,363	66,408	5,00	3,00	30
panneaux de fibres de bois	[*150 à 250*] **160**	[*0,040 à 0,060*] **0,040**	1470	235,20	0,170	96,995	5,00	3,00	30
matelas de cellulose	70	[*0,035 à 0,055*] **0,040**	1900	133,00	0,301	72,938	2,00	1,00	30
cellulose en vrac	[*20 à 60*] **30**	[*0,035 à 0,1*] **0,040**	1600	48,00	0,833	43,818	2,00	1,00	30
panneau de liège	120	[*0,040 à 0,050*] **0,040**	1700	204,00	0,196	90,333	30,00	5,00	30
liège en vrac	100	[*0,040 à 0,1*] **0,040**	1700	170,00	0,235	82,462	10,00	5,00	30
matelas en fibres de coco	[*50 à 140*] 100	[*0,040 à 0,060*] **0,040**	1550	155,00	0,258	78,740	2,00	1,00	30
panneau de fibres de chanvre	[*20 à 70*] **45**	[*0,040 à 0,060*] **0,040**	1550	69,75	0,573	52,820	2,00	1,00	30
panneau de fibres de lin	25	[*0,040 à 0,060*] **0,040**	1550	38,75	1,032	39,370	2,00	1,00	30
ISOLANT THERMIQUE ET ACOUSTIQUE - fibres animales									
laine de mouton	[*30 à 90*] **60**	[*0,040 à 0,1*] **0,040**	1500	90,00	0,4444	60,00	2,00	1,00	30
ETANCHEITE									
Etanchéité bitumineuse plastomère APP	1150	0,230	1000	1150,00	0,200	514,30	50000,00	50000,00	10 à 30
Etanchéité bitumineuse élastomère SBS	1150	0,230	1000	1150,00	0,200	514,30	50000,00	50000,00	10 à 30
Etanchéité résines réticulées EPDM	1200	0,250	1000	1200,00	0,208	547,72	6000,00	6000,00	10 à 30
Etanchéité résines thermoplastiques PVC	1300	0,170	900	1170,00	0,145	445,98	50000,00	50000,00	10 à 30
Voile de polyéthylène PE	950	0,330	2200	2090,00	0,158	830,48	100000,00	100000,00	10 à 30
Voile de polypropylène PP	600	0,220	1800	1080,00	0,204	487,44	10000,00	10000,00	10 à 30

Matériaux et composants	Densité ρ kg/m³	Conductiv.therm λ W/mK	Chaleur spécif. C J/kgK	Capacité therm. ρC ρC KJ/m³K	Diffusivité λ/ ρC m²/s	Effusivité (λρC)½ J/m²Ks½	Résistance à la diffusion de vapeur d'eau µ sec	 µ humide	Durée de vie an
PARE-VAPEUR									
film de polyéthylène PE	850	0,200	1000	850,00	0,235	412,31	100000,00	100000,00	30
voile de verre bitumineux	1200	0,230	1000	1200,00	0,192	525,36	50000,00	50000,00	30
bitume armé	1150	0,230	1000	1150,00	0,200	514,30	50000,00	50000,00	30
bitume polymère APP	1100	0,170	1250	1375,00	0,124	483,48	50000,00	50000,00	30
bitume armé + film aluminium	1250	0,170	1250	1562,50	0,109	515,39	50000,00	50000,00	30
FREINE-VAPEUR									
film de polyéthylène PE	850	0,200	1000	850,00	0,235	412,31	100000,00	100000,00	30
papier kraft	1200	0,170							30
PAREMENT EXTERIEUR (façade)									
brique de terre cuite	[*1000 à 2200*] **1000**	1,080	1000	1000,00	1,080	1039,23	10,00	5,00	> 50
pierre naturelle (locale ou europe)	[*2400 à 2800*] **2600**	2,300	1000	2600,00	0,8846	2445,40	variable selon le type de roche		> 50
pierre reconstituée	2000	1,700	1000	2000,00	0,850	1843,91	50,00	40,00	> 50
plaque de fibro-ciment	[*1800 à 2000*] **1800**	0,580	1050	1890,00	0,3069	1047,00	130,00	70,00	> 50
ENDUIT DE FACADE (sur isolant)									
enduit au mortier de ciment	1500	1,500	1000	1500,00	1,000	1500,00	20,00	10,00	30
enduit au mortier de chaux	1400	1,400	1000	1400,00	1,000	1400,00	20,00	10,00	30
enduit synthétique (silicones/silicates)	*[1200 à 1500]* **1200**	/	/	/	/	/	140,00	100,00	20
REVETEMENT DE TOITURE									
ardoise naturelle	2700	2,200	1000	2700,00	0,815	2437,21	1000,00	800,00	> 50
ardoise en fibro-ciment	1800	0,580	1050	1890,00	0,307	1047,00	130,00	70,00	> 50
tuile en terre cuite	*[1600 à 1800]* **1700**	1,000	800	1360,00	0,735	1166,19	40,00	30,00	> 50
tuile en béton	2100	1,500	1000	2100,00	0,714	1774,82	100,00	60,00	> 50
dalle de ciment (lestage toiture terrasse)	1900	1,400	1000	1900,00	0,737	1630,95	100,00	60,00	30

Matériaux et composants	Densité ρ kg/m³	Conductiv.therm λ W/mK	Chaleur spécif. C J/kgK	Capacité therm. ρC ρC KJ/m³K	Diffusivité λ/ ρC m²/s	Effusivité (λρC)½ J/m²Ks½	Résistance à la diffusion de vapeur d'eau µ sec	 µ humide	Durée de vie an
CLOISONNEMENT INTERIEUR									
bloc de plâtre	*[950 à 1200]* **950**	0,430	1000	950,00	0,453	639,14	10,00	4,00	30
plaque de carton plâtre	900	0,250	1000	900,00	0,278	474,34	10,00	4,00	30
plaque de fibro-plâtre	1150	0,320	1100	1265,00	0,253	636,24	19,00	5,00	30
ENDUIT INTERIEUR									
enduit au plâtre	1200	0,570	1000	1200,00	0,475	827,04	10,00	6,00	30
enduit à la chaux	1400	0,730	1000	1400,00	0,521	1010,94	10,00	6,00	30
enduit à l'argile	1800	0,800	1000	1800,00	0,444	1200,00	10,00	5,00	30
REVETEMENT DE SOL DUR									
carrelage grès cérame	2000	1,200	1000	2000,00	0,600	1549,19	∞	∞	> 50
pierre naturelle (locale ou europe)	[*2200 à 2800*] **2600**	[*1,7 à 2,3*] 2,300	1000	2600,0000	0,8846	2445,40	variable selon le type de roche		> 50
pierre reconstituée	2000	1,700	1000	2000,00	0,850	1843,91	50,00	40,00	> 50
REVETEMENT DE SOL SOUPLE									
dalle de liège	400	0,065	1500	600,00	0,108	197,48	40,00	20,00	30
linoléum	1200	0,170	1400	1680,00	0,101	534,42	1000,00	800,00	30
vinyle	1500	0,250	1400	2100,00	0,119	724,57	10000,00	10000,00	30
tapis-plain synthétique	200	0,060	1300	260,00	0,231	124,90	5,00	5,00	10

Les valeurs λ, *C,* µ*sec et* µ*humide ont été définies selon:*

1. Valeurs définies dans l'annexe A de la norme NBN 62-002

2. Valeurs définies dans la norme NBN EN 12524 "Matériaux et produits pour le bâtiment - propriétés hygrothermiques

2. Valeurs définies dans la base de données du calculateur U de la Région wallonne pour les matériaux non repris dans la norme (celui a été remplacé par l'annexe VII de l'AGW PEB)

3. Pour les matériaux non repris dans les deux outils précédents, les valeurs ont été définies selon différentes publications scientifiques dont:

- Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction, Yves COUASNET, Mémento, Le Moniteur, Paris 2007
- Construire, Atlas des matériaux, M.HEGGER, V. AUCH SCHWELK, M.FUCHS, T.ROSENKRANZ, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2009
- Guide de la construction et de la rénovation durable, publication du CRTE, téléchargeable sur le site www.crte.lu, 2009
- Passivhaus - Bauteilkatalog, Okologish bewertete Konstruktionen, 3ème édition, Springer Wien New-York, 2009