



HAL
open science

Caractérisation, mesure et évaluation des indicateurs techniques, économiques et financiers des éco-matériaux : application au secteur du bâtiment

Alex Wignacourt

► To cite this version:

Alex Wignacourt. Caractérisation, mesure et évaluation des indicateurs techniques, économiques et financiers des éco-matériaux : application au secteur du bâtiment. Autre. Ecole Centrale de Lille, 2009. Français. NNT : 2009ECLI0020 . tel-00581767

HAL Id: tel-00581767

<https://theses.hal.science/tel-00581767>

Submitted on 31 Mar 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre : 109

ECOLE CENTRALE DE LILLE

THESE

Présentée en vue
D'obtenir le grade de

DOCTEUR

En

Spécialité : Génie Industriel

Par

ALEX WIGNACOURT

DOCTORAT DELIVRE PAR L'ECOLE CENTRALE DE LILLE

Titre de la thèse :

Caractérisation, mesure et évaluation des indicateurs techniques, économiques et financiers des éco-matériaux : Application au secteur du bâtiment

Soutenue le mardi 1^{er} décembre 2009 devant le jury d'examen :

Président	André De HERDE	Professeur, Université Catholique de Louvain - Belgique
Rapporteur	Mme Agnès JULLIEN	HDR – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Nantes (LCPC)
Rapporteur	Mr Youssef DIAB	Professeur, Université de Marne la Vallée
Examineur	Mr Christian TRAISNEL	Ingénieur, Directeur CD2E, Loos en Gohelle
Directeur de thèse	M. Philippe DESHAYES	Professeur, Ecole Centrale de Lille
Co-Directeur de thèse	M. Zoubéir LAFHAJ	Professeur, Ecole Centrale de Lille

Thèse préparée dans le Laboratoire de Génie Industriel - LGIL de l'Ecole Centrale de Lille

Ecole Doctorale SPI 287 (EC Paris, EC Lille, INT Evry)

Remerciements

Ce travail a été réalisé au laboratoire de génie industriel (LGIL) de l'Ecole Centrale de Lille.

Je tiens à remercier tout particulièrement :

Mr Christian TRAISNEL, ingénieur, directeur du CD2E (Création Développement d'Eco-Entreprises), pour m'avoir donné l'opportunité depuis 2004 d'exercer le métier de consultant en éco-construction tout en effectuant un travail de recherche sur la thématique des éco-matériaux à l'Ecole Centrale de Lille. Ce travail n'aurait pu se réaliser sans son soutien constant.

Mr Philippe DESHAYES, professeur, ingénieur architecte, pour avoir dirigé et encadré mon travail de thèse et m'avoir donné l'occasion de le réaliser dans de bonnes conditions en parallèle de mes activités professionnelles.

Monsieur Zoubeir LAFHAJ, professeur, pour avoir accepté un co-encadrement ; son encadrement scientifique et son indéfectible soutien m'ont été particulièrement précieux.

Mr André De HERDE, Professeur, ingénieur architecte, Mr Youssef DIAB, professeur, et Mme Agnès JULLIEN, maître de conférences HDR, pour avoir accepté de rapporter ce mémoire de thèse.

Je remercie également François MARTY et Pierre GAUDIN pour m'avoir permis de découvrir et connaître les systèmes de construction écologique de l'entreprise Scierie Palettes du Littoral (SPL) à Audruicq (62), utilisés en exemple dans ce travail, et rejoindre l'aventure Chênelet Construction.

Je tiens à remercier tout particulièrement mon épouse et mes parents pour leur aide, leur soutien et leurs encouragements permanents ; merci encore à toi Sophie pour avoir accepté de me suivre dans la partie « application pratique » de ma thèse en auto-construisant ensemble notre maison écologique.

J'ai enfin une pensée très particulière pour mon grand père paternel qui était entrepreneur du bâtiment, artisan maçon de son état. Je me demande ce qu'il aurait pensé d'un petit fils qui préconise l'isolation des logements, la construction écologique et les énergies renouvelables...

RESUME

Les éco-matériaux, éco-préférences dans le secteur des matériaux de construction, présentent un certain nombre de caractéristiques intéressantes comparativement à des solutions techniques ou architecturales classiques. Les critères de différenciation utilisés étaient jusqu'alors souvent liés à la préservation de l'environnement et de la santé.

Mais les éco-matériaux influent également considérablement sur le paysage économique ambiant dans les métiers du BTP en terme de mobilisation d'acteurs, de réalisation de progrès technique, de gains et d'économies, d'émergence de savoir –faire nouveaux.

Ils contribuent ainsi à la création de systèmes productifs locaux (SPL) et de filières courtes génératrices d'emplois à forte valeur ajoutée tout en immobilisant de grandes quantités de carbone sur des durées importantes au sein des constructions dans lesquels ils sont utilisés.

L'objectif de cette thèse est d'étudier les caractéristiques techniques, économiques et financières présentées par ces matériaux plus respectueux de l'environnement en regroupant des informations de référence sélectionnées – indicateurs et critères d'évaluation – au sein d'un référentiel proposé.

La première partie de ce travail situe la thématique des éco-matériaux dans le contexte de la conception de bâtiments à qualité environnementale et de l'analyse en cycle de vie. Elle synthétise les différentes communautés reconnaissant ou non une définition des éco-matériaux.

Une deuxième partie précise la place des éco-matériaux au sein des systèmes de management de la qualité environnementale du bâti (SMQEB) Internationaux et Européens. Le cahier des charges d'une méthode d'aide au choix d'éco-matériaux pour la construction de bâtiments à qualité environnementale et à faible niveau de consommation énergétique y est exposé.

La troisième partie concerne la conception d'un outil d'aide à la prescription technique, économique et financière d'éco-matériaux : des familles de critères et des solutions constructives sont sélectionnés, les performances de trois solutions constructives conventionnelles et éco-construites sont analysées, comparées et pondérées. Des indicateurs environnementaux et sociétaux viennent enrichir cette analyse.

La dernière partie recentre sur un territoire d'étude la méthodologie élaborée et testée : la région Nord Pas de Calais est identifiée comme précurseur des filières de production d'éco-matériaux en France et depuis peu des filières de distribution – prescription – utilisation. Un système constructif élaboré, un rampant de toiture, est utilisé comme base pour la comparaison d'un assemblage de solutions éco-construites et conventionnelles. Les critères techniques, économiques, financiers, environnementaux et de santé utilisés sont in fine traduits en langage compréhensible : le ratio coûts / bénéfices.

Mots-clés : éco-matériaux, éco-construction, solutions constructives, référentiel de mesures, analyse en cycle de vie, systèmes productifs locaux, impact sociétal, analyse coûts / bénéfices.

ABSTRACT

Eco-materials, eco-preferences in the building construction field, have revealed a number of interesting characteristics compared with more traditional technical or architectural solutions. The criteria so far used to differentiate them were often related to the preservation of the environment or health.

But eco-materials have also had a major impact on the local economy in the building construction sector in terms of increased mobilization of actors involved, technical progress, savings and profits as well as original, new know-how's.

They have thus significantly contributed to the creation of Local Productive Systems/ LPS- and shorter with strong added value career paths while generating larger and longer term quantities of carbon in the constructions in which they had been implemented.

The main research objective has been to study the technical, economic and financial advantages of such more environmentally friendly materials by collecting selected referential information- assessment indicators and criteria- inside a proposed system of reference.

The first part of my work has been devoted to identifying eco-materials in the broader context of the conception of high environmental quality buildings and the related life cycle analysis, outlining the recognition or non recognition of an eco-material definition by the different communities.

The position of eco-materials in international and European Environmental Quality Management Systems for Buildings- SMQEB- has then been reviewed in a second part. The requirements for an eco-material selection method for the construction of high environmental quality and low energy buildings has also been exposed.

The third part of this work has consisted in designing a technical, economic and financial prescription decision tool for eco -materials: criteria patterns and constructive solutions have therefore been selected; the separate performances of three conventional and eco-built solutions have then been analyzed, compared and weighed. Environmental and societal indicators have also been taken into account to further complement this analysis.

In the final part, the main concern has been to implement this designed and tested methodology within a precise region : The Nord Pas De Calais- NPDC- region has been identified as a leading region for the production of eco-materials in France and, more recently, for their distribution- prescription-use.

An elaborate construction system - a flat roof - has been selected to compare a set of eco-built solutions with more conventional ones.

The technical, economic, financial, environmental and health criteria have in-fine been used in easily understood language: the cost/profit ratio.

Key words: eco-materials- eco-construction- constructive solutions-measurement reference systems- indicators- technical, economic and financial advantages-life cycle analysis- local productive systems- carbon assessment- societal impact- cost/profit analysis.

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES	7
LISTE DES TABLEAUX	9
INTRODUCTION GENERALE	13
1. Chapitre 1 : Les éco-matériaux / produits pour le secteur de la construction : état de l'art, positionnement dans les démarches de conception environnementale des systèmes constructifs	19
1.1 Construction et développement durable, introduction.....	19
1.1.1 Evolution des pratiques dans l'habitat	19
1.1.2 La problématique environnementale et la santé	19
1.1.3 Poids et opportunités du secteur du bâtiment	20
1.1.4 Lien avec le concept de développement durable	21
1.1.5 Vers un management durable pour les entreprises du secteur de la construction.....	22
1.2 Démarches d'analyse multicritères en cycle de vie des produits et matériaux de construction	23
1.2.1 Contexte de l'analyse multicritères : la pensée en cycle de vie.....	23
1.2.2 Outils d'analyse et d'aide au choix des matériaux et composants de construction sur la base de leurs impacts en cycle de vie.....	26
1.2.2.1 Etiquetages contrôlés certifiés ou écolabels	27
1.2.2.2 Déclarations environnementales et sanitaires « volontaires » ..	28
1.2.2.3 Attestations environnementales et sanitaires du CESAT	29
1.2.2.4 Outils informatisés disponibles.....	29
1.2.3 Approche monétaire du cycle de vie	35
1.2.4 Application aux pme – pmi : le management durable et son langage commun	37
1.3 Le concept d'éco-matériaux, définitions et collèges de pensée	39
1.3.1 L'approche ingénierale d'éco-conception	39
1.3.2 La non reconnaissance	43
1.3.3 L'approche écologiste.....	47
1.3.4 Les apports solidaires de la « green economy »	52
1.3.5 Le consensus pragmatique.....	58
2. Chapitre 2 : Référentiels internationaux de la qualité environnementale dans le bâtiment (QEB) et choix d'éco-matériaux pour la construction réhabilitation	62
2.1 Place des matériaux de construction dans les systèmes et référentiels internationaux de management de la qualité environnementale dans la construction (MQEB).....	62
2.1.1 Les éco-matériaux dans les systèmes de MQEB anglo-saxons (Grande Bretagne, USA, Canada)	67
2.1.1.1 Système de MQEB en Grande Bretagne.....	67
2.1.1.2 Système de MQEB aux Etats Unis et au Canada.....	67
2.1.2 Les éco-matériaux dans les systèmes de MQEB nord européens (Suisse, Autriche, Allemagne, Pays Bas, Belgique).....	67
2.1.2.1 Système de MQEB en Suisse.....	67
2.1.2.2 Système de MQEB en Autriche	68
2.1.2.3 Système de MQEB en Allemagne	68

2.1.2.4	Système de MQEB aux Pays Bas	68
2.1.2.5	Système de MQEB en Belgique	68
2.1.3	Les éco-matériaux dans le système de MQEB français.....	68
2.1.4	Les autres systèmes de MQEB : l'éco-construction intelligente ou la conception bioclimatique solaire passive	69
2.1.5	Comparatifs et synthèse des différentes approches	71
2.2	Cahier des charges d'une méthode simplifiée d'aide au choix d'éco-matériaux pour la construction / réhabilitation de bâtiments à qualité environnementale et à faible niveau de consommation énergétique	72
2.2.1	Introduction.....	72
2.2.2	Objectifs de la méthode et de l'outil.....	74
2.2.3	Choix des critères de performances : indicateurs et référentiel de mesure pour une aide multicritères à la décision	74
2.2.4	Choix d'une méthodologie d'analyse et d'expérimentation.....	77
2.2.4.1	Les systèmes de classification	77
2.2.4.2	Les typologies d'indicateurs	83
2.2.4.3	Les critères partagés avec les acteurs de terrain : critères techniques et économiques plutôt que critères environnementaux et sanitaires ?	88
2.2.4.4	Le langage commun monétaire basé sur le raisonnement en coûts complet en cycle de vie « life cycle costing »	90
2.2.4.5	Mesure et traduction en approche financière de management durable, ratio coûts / bénéfiques.....	107
2.2.5	Choix des systèmes constructifs : disponibilité et approvisionnement sur une zone d'étude, le Nord Pas de Calais.....	111
2.2.6	Caractéristiques pratiques de la méthodologie et de l'outil.....	114

3. Chapitre 3 : Mise au point d'un outil d'aide à la prescription technique, économique et financière d'éco-matériaux pour la construction et la réhabilitation de bâtiments... 117

3.1	Introduction	117
3.2	Bases communes de comparaison et détermination des solutions constructives	117
3.2.1	Hypothèses préliminaires.....	117
3.2.2	Matériaux, composants d'un bâtiment et solutions constructives associées : exemples de raisonnement.....	119
3.2.3	Notion d'unité fonctionnelle « UF ».....	121
3.2.4	Proposition de systèmes constructifs majeurs, en lien notamment avec les enjeux actuels de performance énergétique	122
3.3	Construction de familles de critères techniques, économiques et financiers par système constructif majeur	129
3.3.1	Hypothèses préliminaires.....	129
3.3.2	Choix des indicateurs par famille de critères et pas systèmes constructifs majeurs.....	129
3.3.3	Analyses critiques de familles de critères	137
3.3.4	Simplification des familles de critères.....	137
3.4	Evaluation d'un échantillon de solutions constructives par famille de critères simplifiés	138
3.4.1	Hypothèses préliminaires.....	138
3.4.2	Définition de solutions constructives de comparaison : 3 solutions conventionnelles et 3 solutions éco-construites.....	138
3.4.3	Comparaison des performances des solutions conventionnelles et éco- construites selon l'outil proposé	169
3.4.4	Analyses et synthèse des résultats	176

3.5 Pondération des critères techniques, économiques et financiers	177
3.5.1 Hypothèses préliminaires : détermination des types de pondération	177
3.5.2 Pondération technique, la performance thermique simple de systèmes étudiés	177
3.5.3 Pondération par les prescriptions des réglementations thermiques existantes.....	184
3.5.4 Pondération par les systèmes de management de la qualité environnementale dans la construction et les référentiels de certification basse énergie.....	186
3.5.5 Pondération par les utilisateurs finaux utilisant les systèmes constructifs étudiés et assurés pour leur mise en œuvre.....	189
3.5.6 Deux indicateurs environnementaux simplifiés : le traitement des déchets en fin de vie et son coût associé, et les émissions carbone équivalent liées aux émissions de gaz à effet de serre (GES).	193
3.5.6.1 Traitement des déchets en fin de vie et coûts associés	193
3.5.6.2 Emissions de gaz à effet de serre et coûts associés	199
3.5.7 Indicateur sociétal : les heures de travail générées par la mise sur le marché des systèmes constructifs, converties en nombre d'emplois équivalent.....	204
3.5.8 Synthèse et conclusion.....	209
3.6 Agrégation des résultats	210
3.6.1 Hypothèses préliminaires.....	210
3.6.2 Proposition d'une méthode d'agrégation : le langage commun « € » ...	213
3.6.3 Résultats de l'agrégation financière.....	214
3.7 Conclusions	214
4. Chapitre 4 : Choix d'éco-matériaux régionaux et application aux solutions constructives	216
4.1 Introduction	216
4.2 Hypothèses et choix d'éco-matériaux régionaux et application de la méthodologie à des systèmes constructifs	220
4.2.1 Identification et choix d'éco-matériaux régionaux et de systèmes constructifs traditionnels / éco-construits	220
4.2.2 Application de la méthodologie et de l'outil d'aide à la décision au système constructifs élaboré à partir d'éco-matériaux régionaux	223
4.2.3 Critères d'éco-différenciation permettant de distinguer les systèmes éco- construits des systèmes traditionnels	229
4.2.4 Analyse économique et financière.....	239
4.3 Choix et utilisation de pondérations appropriées aux systèmes constructifs rampant conventionnel à fermettes industrielles et rampant bois massif.....	243
4.4 Synthèse de résultats sur les matériaux et solutions constructives, agrégation des résultats en langage commun « € ».....	252
4.5 Eléments complémentaires et reproductibilité	254
4.6 Conclusions	258
CONCLUSION GENERALE	260
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	263
ANNEXES.....	269

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Evolution constatée de la consommation totale d'énergie commerciale (hors bois) depuis 1860 en MTep.....	20
Figure 2 : Proposition de triptyque du développement durable.....	21
Figure 3 : Le cycle de vie d'un produit, du berceau à la tombe.....	24
Figure 4 : Intégration de l'environnement dans la conception d'un produit.....	25
Figure 5 : Schéma de l'analyse en coûts complets sur le cycle de vie d'un produit / service.....	35
Figure 6 : The sustainable development and eco-design : related methodologies and concepts proposed.....	40
Figure 7 : Les trois dimensions du concept d'éco-matériaux.....	41
Figure 8 : Model conceptuel de présentation des éco-matériaux.....	42
Figure 9 : Evolution de l'usage des matériaux bois / pierre dans le temps.....	47
Figure 10 : Proposition de synthèse des familles « officielles » de la science des matériaux.....	79
Figure 11 : Proposition de classement croisée entre la science des matériaux et les usages de terrain.....	80
Figure 12 : Proposition de critères simplifiés permettant la qualification « éco » d'un matériau ou composant de construction.....	85
Figure 13 : Nombre d'heures de travail générées en fabrication, jusqu'à la mise à disposition sur le marché Suisse, par une fenêtre en bois et une fenêtre en aluminium.....	87
Figure 14 : Modèle tridimensionnel croisant les niveaux de décision avec les éléments basiques détaillés de la construction.....	94
Figure 15 : Evolution des valeurs présentes ou actuelles dans le temps, en fonction du taux d'actualisation choisi.....	96
Figure 16 : Répartition des coûts directs par postes, en € actualisés /m ² /an, Opération Habitat Social de Zuydcoote (59) portée par Habitat 62/59.....	101
Figures 17 & 18 : Calcul du coût global direct et du coût global incluant les externalités / répartition des coûts et gains en €/m ² /an entre les différents acteurs, Opération Habitat Social de Zuydcoote (59) portée par Habitat 62/59.....	101
Figures 19 : Maisons Haute Qualité Durable à Saint Denis.....	115
Figure 20 : Le système constructif ossature bois plateforme.....	118
Figure 21 : Proposition d'ordre logique des différents concepts associés à une démarche de conception de bâtiment.....	119
Figure 22 : Pertes de chaleur d'une maison individuelle non isolée.....	122
Figure 23 : Ordres de grandeurs de la surface équivalente de fuites d'air dans une maison conventionnelle et pour une maison passive, pour un renouvellement d'air de 0,8 m ³ / h/m ²	123
Figure 24 : Essai de structure d'isolation thermique, fente dans freine vapeur de 1mm devant mur isolé de 1 m ² avec 14 cm d'isolation thermique.....	124
Figure 25 : Représentation d'un mur parpaing creux maçonné ciment, bibliothèque des systèmes constructifs, sous LESOSAI 6.0.....	133
Figure 26 : Profil de condensation du mur parpaing creux maçonné ciment « brut », sous LESOSAI 6.0, Août 2008.....	133
Figure 27 : représentation d'un mur parpaing creux maçonné ciment, système « fini », bibliothèque des systèmes constructifs, sous LESOSAI 6.0.....	134
Figure 28 : Profil de condensation du mur parpaing creux maçonné ciment système « fini », sous LESOSAI 6.0, Août 2008.....	135
Figures 29 et 30 : Exemples de déconstruction / reconstruction avec remplacement des matériaux du système constructif sans respect des DTU & normes,.....	147
Figures 31 et 32 : Comparaisons environnementales simplifiées (énergie grise – bilan carbone) mur parpaing vs mur monomur terre cuite.....	150
Figures 33 et 34 : Comparaisons environnementales simplifiées (énergie grise – bilan carbone) isolation sous rampants conventionnelle vs isolation sous rampants éco-construite.....	152
Figure 35 : Comparaisons environnementales simplifiées (énergie grise – bilan carbone) des systèmes fenêtre PVC / fenêtre bois éco-certifiée.....	153
Figure 36 : Comparaisons environnementales simplifiées (énergie grise – bilan carbone) des matériaux conventionnels et d'éco-construction, pris unitairement.....	154
Figure 37 : Synthèse des évolutions des réglementations thermiques françaises depuis les années 1970 : niveaux de performances et thématiques associées.....	184
Figure 38 : Exemple de points attribués en fonction des performances thermiques globales de matériaux d'isolation des parois vitrées (menuiseries extérieures) pour l'application de la RT 2000.....	185
Figure 39 : Avantages du concept Minergie en Suisse et évaluation du rapport coût / bénéfice, Sources : Flyer Minergie en Questions, Mars 2007.....	187
Figure 40 : Déphasage thermique d'un mur de briques de terre crue en remplissage d'éléments d'ossature bois.....	188

Figure 41 : Déphasage thermique d'un mur de briques de terre cuite en remplissage d'éléments d'ossature bois.	189
Figure 42 : Croyances sur les caractéristiques des fenêtres bois et PVC, Sources : ECOFOR 2006.	190
Figure 43 : Poids accordé aux caractéristiques des fenêtres bois et PVC, sources : ECOFOR 2006.	190
Figure 44 : Quantité de déchets produits par catégorie, en fonction du type de bâtiment et ramenée au m ² de SHOB.	198
Figure 45 : Coût comparé du travail de différentes énergies en France (comprenant rendement et amortissement), en 2008.	208
Figure 46 : Proposition de coupe verticale du système constructif « rampant de toiture conventionnel type fermette industrielle ».	222
Figure 47 : Proposition de coupe verticale du système constructif « rampant de toiture bois massif cloué », type SPL Chênelet.	222
Figure 48 : Représentation d'un rampant fermettes industrielles, bibliothèque des systèmes constructifs, sous LESOSAI 6.0.	227
Figure 49 : Profil de condensation du rampant de toiture fermettes industrielles, sous LESOSAI 6.0.	227
Figure 50 : Représentation d'un rampant bois massif type SPL, bibliothèque des systèmes constructifs, sous LESOSAI 6.0.	228
Figure 51 : Profil de condensation du rampant de toiture bois massif type SPL, sous LESOSAI 6.0.	228
Figure 52 : Comparaison des contributions environnementales des matériaux du système constructif « rampant à fermettes industrielles ».	235
Figure 53 : Comparaison des contributions environnementales des matériaux du système constructif « rampant bois massif cloué ».	235
Figure 54 : Comparaison des contributions environnementales des systèmes constructifs « rampant bois massif cloué » et « rampant fermettes industrielles ».	236
Figure 55 : Comparaison des contributions environnementales des systèmes constructifs « rampant bois massif cloué » et « rampant fermettes industrielles », en tenant compte des matériaux « puits de carbone ».	239
Figure 56 : Calcul du temps de déphasage de transmission d'un flux de chaleur extérieur pour le système constructif rampant conventionnel.	245
Figure 57 : Calcul du temps de déphasage de transmission d'un flux de chaleur extérieur pour le système constructif rampant bois massif.	246
Figure 58 : Calcul de l'épaisseur de laine de verre nécessaire pour obtenir un temps de déphasage de transmission d'un flux de chaleur extérieur pour le système constructif rampant conventionnel de 11,68 heures.	247
Figure 59 : Comparaison des coûts par lots d'une maison premier prix (50 % du marché français en 2009) et d'une maison éco construite en bois, base batiprix 2009, fournitures et pose, en € TTC par m ² habitable, maison moyenne de 110 m ² habitable.	249

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Synthèse des principaux outils « logiciels » disponibles pour aider à la sélection de matériaux et composants de construction au regard de critères environnementaux et sanitaires.....	31
Tableau 2 : Synthèse des principaux outils simplifiés, donnant accès à des données « quantitatives » et « qualitatives », disponibles pour aider au choix de matériaux et composants de construction en fonction de leurs impacts environnementaux et sanitaires.....	33
Tableau 3 : Synthèse des principaux outils simplifiés, donnant accès à des données « qualitatives », disponibles pour aider au choix de matériaux et composants de construction en fonction de leurs impacts environnementaux et sanitaires.....	34
Tableau 4 : Raisonement coûts / bénéfices de la réhabilitation d'une friche industrielle	38
Tableau 5 : Grille de quotation du modèle Japonais « SAM », traduit du modèle japonais	43
Tableau 6 : Dépense énergétique et bilan carbone simplifié en phase « process », pour 4 types de matériaux de construction	48
Tableau 7 : Synthèse de l'historique comparatif de l'usage des matériaux bois et pierre.....	49
Tableau 8 : Proposition de typologie croisée pour la définition de matériaux de construction « écologiques »..	50
Tableau 9 : Proposition de comparaison des organisations internationales d'éco-construction « solidaire », impliquées dans le mouvement des technologies appropriées.	56
Tableau 10 : Répartition des domaines d'interventions des organisations internationales d'éco-construction solidaire, impliquées dans le mouvement des technologies appropriées.....	57
Tableau 11 : Historique des référentiels et outils de management de la qualité environnementale dans la construction.....	65
Tableau 12 : Energies de production (énergie grise) de quelques matériaux de construction courants et éco-matériaux.....	70
Tableau 13 : Positionnement de l'approche matériaux / éco-matériaux dans les principaux systèmes de management de la qualité environnementale dans la construction.....	71
Tableau 14 : Proposition de classement des matériaux et composants de construction par type d'usage et de matières constitutives.....	78
Tableau 15 : Les principaux matériaux de construction (voir matériaux de terrain) avec applications liées.....	81
Tableau 16 : Table d'entrée du système de classification UNICLASS, CPI	82
Tableau 17 : Proposition de classification croisée pour la comparaison de matériaux conventionnels et d'éco-matériaux au sens retenu dans notre étude.....	83
Tableau 18 : Proposition d'indicateurs pour étudier deux solutions constructives : l'une considérée comme issue de la filière éco-construction, la seconde considérée comme conventionnelle.	84
Tableau 19 : Proposition de synthèse des différentes terminologies des outils valorisant le concept de coût global au niveau international	92
Tableau 20 : Tableau non exhaustif des coûts à prendre en compte aux différentes étapes du cycle de vie d'une construction.....	95
Tableau 21 : Coûts de produits alternatifs « verts » pour la construction, comparés aux coûts de produits conventionnels	99
Tableau 22 : Comparaison du coût d'une taxation carbone liée aux émissions de GES des différents modes de chauffage pour l'habitat	103
Tableau 23 : Les principaux facteurs décourageant la construction verte aux USA, Turner Construction Company.....	104
Tableau 24 : Bénéfices financiers des écoles vertes, en \$/pied carré.....	104
Tableau 25 : Proposition de synthèse des détails des économies générées par le verdissement des écoles américaines, postes par postes, sur base de KATS, G	106
Tableau 26 : Estimation de coûts et d'économies de coûts liés au poste « operation and maintenance » dans les bâtiments publics américains	107
Tableau 27 : Exemple de plus value technique apportée par une solution verte.....	107
Tableau 28 : Coût de 10 m ² de panneaux solaires photovoltaïques en fonction de leur mise en œuvre, Cd2e, 2006.....	108
Tableau 29 : Simulations de production d'énergie et de revenus générés annuels, en Kwh pour 1 kWc installé et en €, en fonction des régions françaises.....	109
Tableau 30 : Temps de retour sur investissement pour 1 kwc ou 10 m ² de panneaux solaires photovoltaïques, en fonction de leur implantation en France.....	109
Tableau 31 : Synthèse de la démarche « coût global » sur une durée de vie typique d'une installation photovoltaïque.....	110
Tableau 32 : Proposition de liste des éco-matériaux identifiés en Nord Pas de Calais, faisant l'objet dans le cadre de notre étude de comparaison avec des matériaux conventionnels.	113

Tableau 33 : Classement du produit de construction « parpaing creux aggloméré » au sein de la hiérarchisation « Batiproducts ».....	119
Tableau 34 : classement du produit de construction « ciment / chaux » au sein de la hiérarchisation « Batiproducts ».....	120
Tableau 35 : classement du produit de construction isolant thermique en plaque (ex laine de roche) au sein de la hiérarchisation « Batiproducts ».....	120
Tableau 36 : Proposition de correspondance « déperditions thermiques majeures » / solutions constructions / Unités fonctionnelles, en vue de la détermination de systèmes constructifs majeurs.....	125
Tableau 37 : Proposition de dé-composition du système constructif « mur monomur à isolation répartie ».....	126
Tableau 38 : Proposition de systèmes constructifs majeurs correspondant aux unités fonctionnelles correspondant aux principales déperditions thermiques (cf tableau 33 page 115).....	128
Tableau 39 : Proposition d'indicateurs communs à chaque unité fonctionnelle et système constructif présenté, dans les champs techniques, économiques et financiers (liste non exhaustive).....	131
Tableau 40 : Systèmes constructifs majeurs et unités fonctionnelles.....	132
Tableau 41 : Critères techniques simples du système constructif mur parpaing maçonné ciment.....	132
Tableau 42 : Systèmes constructifs majeurs et unités fonctionnelles (cf tableau 35 page 118).....	134
Tableau 43 : Critères techniques spécifiques du mur parpaing sans isolation complémentaire rapportée (isolant thermique A2-1).....	136
Tableau 44 : Proposition de systèmes constructifs répondant aux principes de l'éco-construction, par comparaison aux systèmes conventionnels, pour les solutions constructives étudiées.....	141
Tableau 45 : Comparaison des matériaux / composants des systèmes constructifs étudiés, selon les critères « environnement, santé et management durable » simplifiés sélectionnés.....	146
Tableau 46 : Synthèse de l'analyse environnement, santé et management durable du système constructif « mur parpaing maçonné ciment ».....	149
Tableau 47 : Synthèse de l'analyse environnement, santé et management durable du système constructif « mur monomur terre cuite ».....	150
Tableau 48 : Synthèse de l'analyse environnement, santé et management durable du système constructif « isolation thermique sous rampants de toiture, laine de verre, pare vapeur et parement gypse ».....	151
Tableau 49 : Synthèse de l'analyse environnement, santé et management durable du système constructif « isolation thermique sous rampants de toiture, isolant bio-sourcé, frein vapeur et Fermacell ».....	151
Tableau 50 : Synthèse de l'analyse environnement, santé et management durable des systèmes constructifs « Ouverture de bâtiment : fenêtre PVC standard / fenêtre bois eco-certifiée.....	153
Tableau 51 : Quantification de l'énergie évitée par l'utilisation de systèmes isolants, sur maison individuelle type, en climat H1, par an et en fonction du type d'énergie utilisée pour le chauffage.....	159
Tableau 52 : Synthèse de la comparaison des contenus énergétiques de matériaux d'isolation par rapport à l'évitement d'énergie, sur la DVT des systèmes constructifs (1/2).....	160
Tableau 53 : Synthèse de la comparaison des contenus énergétiques de matériaux d'isolation par rapport à l'évitement d'énergie, sur la DVT des systèmes constructifs (2/2).....	161
Tableau 54 : Consommations énergétiques de trois maisons conçues différemment.....	161
Tableau 55 : Proposition de ratio des énergies grises non actualisées et actualisées d'un isolant conventionnel (laine minérale) et d'un isolant éco-matériaux (isolant biosourcé) sur les besoins en chauffage de trois différents types de bâtiments.....	162
Tableau 56 : Effets sur l'être humain des principales substances présentes dans les produits et matériaux de construction.....	166
Tableau 57 : Comparaison des systèmes constructifs sélectionnés selon le système de classification retenu.....	170
Tableau 58 : Décomposition des systèmes constructifs étudiés.....	170
Tableau 59 : Critères techniques des systèmes constructifs étudiés (tableau.....	171
Tableau 60 : Critères économiques des systèmes constructifs étudiés.....	172
Tableau 61 : Conditions d'éligibilité au crédit d'impôt 2006-2009 des matériaux d'isolation thermique des parois vitrées installés par un professionnel.....	174
Tableau 62 : Critères financiers des systèmes constructifs étudiés.....	175
Tableau 63 : Comparaison des coûts globaux actualisés avec ou hors crédit d'impôt matériel, des systèmes constructifs étudiés.....	176
Tableau 64 : Comparaison des performances thermiques valeurs U des systèmes constructifs étudiés.....	178
Tableau 65 : Valeurs des coefficients de transmission surfacique U_w maximum par types de classe T_h en lien avec la réglementation thermique 2000 (RT 2000).....	178
Tableau 66 : Comparaison des performances thermiques de deux systèmes constructifs « menuiseries extérieures » et évaluation des gains annuels en € générés par le changement de menuiserie (bois).....	179
Tableau 67 : Tableau des gains actualisés sur la durée de vie économique de l'investissement menuiserie Bois.....	180
Tableau 68 : Comparaison des performances thermiques de deux systèmes constructifs « menuiseries extérieures » et évaluation des gains annuels en € générés par le changement de menuiserie (PVC).....	181
Tableau 69 : Tableau des gains actualisés sur la durée de vie économique de l'investissement menuiserie PVC.....	182

Tableau 70 : Synthèse des gains annuels et temps de retour sur investissements simples et élaborés pour les deux systèmes d'isolation des parois vitrées étudiés.	183
Tableau 71 : Tableau comparatif des facteurs solaires de différents vitrages utilisés dans les menuiseries extérieures.	186
Tableau 72 : Tableau comparatif des capacités thermiques de bâtiments différents, rapportée à la surface de plancher brute.	188
Tableau 73 : Tableau comparatif des avantages / inconvénients des menuiseries bois et PVC perçus par les professionnels du bâtiment (panel de 60 professionnels du Npdc / Picardie)	192
Tableau 74 : Tableau comparatif des coûts de traitement des déchets de chantier, en fonction de l'implication « tri » de l'entrepreneur.	197
Tableau 75 : Tableau comparatif des coûts de traitement des déchets de menuiseries bois et PVC en fin de vie.	198
Tableau 76 : Pouvoir de réchauffement global équivalent au CO2 des 6 familles de gaz à effet de serre concernées par le protocole de Kyoto.	200
Tableau 77 : Equivalents carbone des principaux gaz à effet de serre retenus par le protocole de Kyoto. Sources : GIEC, 2007.	201
Tableau 78 : Mesures des pays européens appliquant des fiscalités ressemblant de près ou de loin à la taxe carbone française.	202
Tableau 79 : Simulation des augmentations de prix des biens et services liés à l'application en France d'une taxe carbone de 1500 € la tonne de carbone (400 € la tonne de CO2).	203
Tableau 80 : Simulation des augmentations de prix de deux systèmes constructifs étudiés : une menuiserie bois PEFC et une menuiserie PVC, avec l'application en France d'une taxe carbone de différents niveaux.	204
Tableau 81 : Calcul de l'indicateur d'intensité sociale (IS) à partir d'indicateurs sociaux et environnementaux sélectionnés pour deux systèmes constructifs étudiés (menuiserie bois et menuiserie PVC).	206
Tableau 82 : Rentabilité monétaire comparée de l'humain et de la machine.	207
Tableau 83 : Synthèse des pondérations étudiées et choix d'utilisation pour la comparaison des systèmes constructifs étudiés.	209
Tableau 84 : Synthèse des coûts pour les deux systèmes constructifs étudiés.	213
Tableau 85 : Synthèse des bénéfices pour les deux systèmes constructifs étudiés.	213
Tableau 86 : Ratios coûts / bénéfices pour les deux systèmes constructifs étudiés.	214
Chapitre 4 :	
Tableau 87 : Présentation synthétique des éco-matériaux présumés fabriqués en région Nord Pas de Calais.	219
Tableau 88 : Croisement des systèmes constructifs majeurs reliés aux unités fonctionnelles des principales déperditions thermiques identifiées dans un bâtiment, avec les éco-matériaux régionaux fabriqués en région Nord Pas De Calais.	220
Tableau 89 : Comparaison des systèmes constructifs selon le système de classification retenu (tableau 16 chapitre 1)	223
Tableau 90 : Proposition de décomposition du système constructif « rampant de toiture ».	225
Tableau 91 : Critères techniques des matériaux massifs des systèmes constructifs « rampant bois massif » et « rampant industriel ».	225
Tableau 92 : Critères techniques des matériaux d'étanchéité des systèmes constructifs « rampant bois massif » et « rampant industriel ».	225
Tableau 93 : Critères techniques des matériaux d'isolation thermique des systèmes constructifs « rampant bois massif » et « rampant industriel ».	226
Tableau 94 : Critères techniques des matériaux d'étanchéité à l'air isolation thermique des systèmes constructifs « rampant bois massif » et « rampant industriel ».	226
Tableau 95 : Comparaison des données environnementales pour un isolant laine de verre ep 100 mm, densité 28,5 kg/m3, entre Eco devis du KBOB en Suisse et la FDES de la base de données INIES française.	229
Tableau 96 : Synthèse de l'analyse environnement, santé et management durable du système constructif « rampant de toiture fermettes industrielles ».	231
Tableau 97 : Synthèse de l'analyse environnement, santé et management durable du système constructif « rampant de toiture bois massif cloué ».	232
Tableau 98 : Comparaison des critères de développement soutenable pour les deux systèmes constructifs étudiés.	234
Tableau 99 : Bilan carbone des matériaux du système constructif « rampant de toiture bois massif » tenant compte du stockage « puits de carbone » des matériaux bio-sourcés et renouvelables.	237
Tableau 100 : Bilan carbone des matériaux du système constructif « rampant de toiture conventionnel » tenant compte du stockage « puits de carbone » des matériaux bio-sourcés et renouvelables.	238
Tableau 101 : Critères économiques des deux systèmes constructifs analysés : rampant conventionnel et rampant bois massif.	241
Tableau 102 : Critères financiers des systèmes constructifs étudiés.	242
Tableau 103 : Comparaison du pouvoir d'isolation des deux rampants de toiture, traduit en euros économisés en fonction du mode de chauffage du logement (gaz naturel).	244

Tableau 104 : Détermination du surcoût d'épaisseur de laine de verre pour atteindre le même confort thermique d'été que 120 mm de ouate de cellulose.	247
Tableau 105 : Comparaison des coûts par lots d'une maison premier prix et d'une maison éco construite en bois, base Batiprix 2009, fournitures et pose, en € TTC par m ² habitable, maison moyenne de 110 m ² habitable.	249
Tableau 106 : Simulation des augmentations de prix de deux systèmes constructifs étudiés : un rampant de toiture conventionnel et un rampant de toiture bois, avec l'application en France d'une taxe carbone de différents niveaux.	250
Tableau 107 : Calcul de l'indicateurs d'intensité sociale (IS) à partir d'indicateurs sociaux et environnementaux sélectionnés pour deux systèmes constructifs étudiés (rampant conventionnel et rampant bois massif), par unité fonctionnelle de 1 m ² (UF=1 m ²).	251
Tableau 108 : Synthèse des pondérations étudiées et choix d'utilisation pour la comparaison des systèmes constructifs étudiés.	252
Tableau 109 : Synthèse des coûts pour les deux systèmes constructifs étudiés.	253
Tableau 110 : Synthèse des bénéfices pour les deux systèmes constructifs étudiés, par unité fonctionnelle de 1 m ² (UF=1 m ²).	254
Tableau 111 : Synthèse des durées de vie typique et des renouvellements des matériaux considérés comme « normaux » pour maintenir la performance du système constructif « rampant conventionnel » sur sa DVT.	254
Tableau 112 : comparaison des données pour le rampant de toiture conventionnel avec et sans renouvellement des matériaux sur la DVT.	256
Tableau 113 : Synthèse des coûts pour les deux systèmes constructifs étudiés, sans prise en compte des renouvellements de matériaux pour le maintien de la performance des systèmes constructifs sur la DVT.	257
Tableau 114 : Synthèse des bénéfices pour les deux systèmes constructifs étudiés, par unité fonctionnelle de 1 m ² (UF=1 m ²), et sans renouvellement des matériaux sur la DVT.	257
Tableau 115 : Synthèse des bénéfices pour les deux systèmes constructifs étudiés, par unité fonctionnelle de 1 m ² (UF=1 m ²).	258

INTRODUCTION GENERALE

La France est un pays, en matière de construction, où les contradictions les plus évidentes se côtoient : elle est à la pointe de l'ingénierie en génie civil, capable de construire des viaducs extraordinaires et de creuser des tunnels en tout genre.

Pour la construction de bâtiments et de maisons individuelles, grâce ou à cause de cela, les français pensent bénéficier de la même technologie de pointe que celle déployée dans le BTP.

La conception de ponts ou de tunnels répond pourtant à un processus complexe : des ingénieurs réfléchissent pour trouver des solutions à un problème complexe, des techniciens réalisent des tests pour vérifier les hypothèses, la réalisation est ensuite vérifiée à chaque étape en s'assurant que le cahier des charges et les prescriptions sont bien suivies. Quand ce n'est pas le cas, cela finit rapidement dans les médias : un pont qui s'effondre, une digue qui cède etc..

Cette logique de conception et de réalisation n'a pourtant rien à voir avec ce qui se pratique dans le secteur de la construction de maisons individuelles où l'empirisme règne en maître, les taux de sinistres en témoignent d'ailleurs [**SYCODES, 2009**]¹ : heureusement que les taux de sinistre en génie civil ne sont pas identiques à ceux constatés en maison individuelle

L'image de la construction de maisons dans la perception des consommateurs montre bien cet écart de monde et la différence de méthodes : retards, malfaçons, désordres, non respect des plannings, surcoût, opacité des devis etc...

En construction de maisons, les éprouvettes testées en laboratoire sont rarement réalisées, des règles valident des procédés constructifs courants. Cette logique est complètement éloignée de l'ingénierie à proprement parler.

La France présente ainsi le niveau technologique d'un pays industrialisé, et en même temps, le sous développement dans les habitudes de construction de maisons individuelles. Ceci se vérifie depuis les années 1945-1950 où de gigantesques besoins de reconstruction après guerre ont conduit à une logique de construction rapide et à moindre coût.

Les problématiques de dépense énergétique et d'émission de gaz à effet de serre ne se posaient d'ailleurs pas à cette époque.

Quand on examine le marché attentivement, on distingue la répartition suivante² :

Près de 50 % de constructions premier prix, à environ 1000 € TTC du m² habitable, 45 % des constructions sont classiques à 1400 € du m² habitable, 5 % des constructions sont luxueuses ou haut de gamme à 1800 € TTC du m² habitable.

L'ensemble abouti à un prix moyen de 1200 € TTC / m² habitable (moyenne nationale). Ainsi le prix moyen est-il plus bas que celui d'une maison moyenne gamme, comme la moitié des maisons sont construites en premier prix, le prix moyen est tiré vers le bas.

¹ SYCODES 2009, les indicateurs de l'évolution de la qualité dans la construction, observatoire de la qualité de la construction, agence qualité construction (AQC), disponible sur

http://www.qualiteconstruction.com/uploads/tx_commerceaddons/tbs09_01.pdf

² UNCMI : Union Nationale des Constructeurs de Maisons Individuelles

Il s'agit d'un prix initial qui correspond à un coût de construction instantané, qui ne prend donc pas en compte l'aspect durabilité de la construction, sur les plans techniques, économiques, financiers et environnementaux.

Dans une logique de processus de construction durable, les coûts initiaux considérés souvent comme surcoûts peuvent être considérés comme investissements sur le moyen et long terme et générer des plus values évidentes : la réduction des coûts de maintenance, une qualité d'air intérieur meilleure, des réductions drastiques de consommation d'énergie.

Aujourd'hui, une autre voie est en plein essor : la construction de maisons « écologiques » qui est devenue d'actualité, à la mode, mais également un véritable état d'esprit et un mode de vie pour bon nombre de français.

Mais construire autrement, construire « écologique » avec des matériaux de qualité, plus durables, respectueux de l'environnement et de la santé des utilisateurs (artisans, entreprises de construction, futurs occupants des logements) semble plus cher de prime abord, tout simplement parce que la marche à franchir entre le prix moyen national et le prix d'une construction efficace est très importante. Cette marge est plus souvent due aux différences de qualité de prestation et au changement des performances, qu'aux choix réellement écologiques.

La principale difficulté consiste donc à reconstruire des maisons de qualité, écologiques ou pas, mais cela s'inscrit à l'encontre de la tendance sociétale actuelle qui veut que la durée moyenne d'utilisation d'une maison baisse sans cesse et que surtout on ne construit plus aujourd'hui dans une logique patrimoniale : on ne construit plus pour léguer à ses enfants.

Comme la plupart des ménages français rêve d'habiter dans une maison individuelle qui est la forme d'urbanisation la plus gourmande en espace, la disponibilité des terrains diminue et leur prix explose.

Le budget des constructions se réduit, et le mode d'urbanisation s'américanise : D'immenses lotissements / zones pavillonnaires, des zones commerciales tentaculaires, et des voies "rapides" pour relier les unes et les autres grâce aux automobiles.

Depuis 60 ans, c'est donc la qualité des maisons qui a diminué face aux choix sociétaux gourmands en finances. Les constructions qui ont été réalisées au sortir de la seconde guerre mondiale ont été, de toutes celles construites dans notre histoire, les plus inefficaces de toutes.

Une maison traditionnelle, paysanne, non rénovée avait des performances conformes aux standards de la RT 2000 ; mais ce type de maisons a souvent été rénové en dépit du bon sens après les années 60, ce qui a dégradé fortement leur qualité et les a rendu insalubres.

Pour construire, il faut du temps de conception, de l'ingénierie, du savoir faire (l'art de l'artisan) mais aussi des matières, matériaux, produits de construction qui vont être utilisés et mise en œuvre dans les règles de l'art.

Ces matériaux de construction ont suivi la même évolution que nos procédés constructifs : l'industrialisation massive au sortir de la seconde guerre (plan Marschall d'industrialisation de la France), l'uniformisation de leur usage (la prédominance du procédé bloc béton dans les années 60) et leur sourcing sur de grandes distances qui marque la fin des approvisionnements en matière locale.

Nous sommes globalement passé d'une économie de la construction qui valorise les matières, matériaux, produits fabriqués très localement, peu énergétivores, peu chers et la main d'œuvre des artisans / fabricants plutôt que le prix du matériau en tant que tel, à une économie de la construction qui favorise la production industrielle et standardisée de masse dans laquelle la part « marketing et commerciale » supplante la valeur ajoutée produite par l'heure de travail humain.

La qualité globale de ces matériaux de construction, d'un point de vue technique, environnementale ou de santé a suivi cette tendance, en contribuant à la production de logements peu coûteux, mal isolés (passoires thermiques et humides).

C'est l'apogée du système parpaing / laine de verre / placo ou polystyrène / placo généralisé partout en France depuis les années 80, date des premières réglementations thermiques.

Un mouvement d'architectes / maîtres d'œuvre proches de l'éco-construction et de la baubiologie allemande (biologie de la construction) a certes essayé d'inverser la tendance ces 30 dernières années (1978-2008) en contribuant notamment à concevoir et construire des maisons écologiques à l'aide de matériaux de qualité, locaux, à faible empreinte écologique et peu coûteux, pour des clients éco-convaincus.

Leur effort a certes eu le mérite de stimuler le débat et de montrer que d'autres choix et méthodes de construction sont possibles, mais l'effet de masse sur le marché de la maison individuelle ne s'est pas produit.

En France, le tournant vient des années 2000, avec l'émergence d'un marché de l'éco-construction, des éco-matériaux et produits pour une construction de qualité, un peu plus chères mais plus respectueuse de l'environnement et de la santé des occupants.

Plus récemment le Grenelle de l'environnement et les orientations de son groupe de travail n°1 ont contribué à changer la donne : toutes les maisons neuves construites après 2010 devront intégrer une ingénierie de conception à basse consommation d'énergie (label BBC HPE 2005).

Plutôt écologiques et valorisant les matériaux bio-sourcés, leur qualité globale devra forcément évoluer pour atteindre une performance thermique d'enveloppe exemplaire. Les niveaux de prix de référence de la construction vont eux aussi évoluer : le prix d'une maison de base à basse consommation d'énergie sera plus élevé que celui d'une maison de base traditionnelle.

Quelques évènements et dates « clés » facilitent la compréhension de l'émergence de ce marché :

& 2005 : le CD2E (www.cd2e.com), agence d'aide à la création et au développement d'éco-entreprises lance en Nord Pas de Calais le premier outil web français d'aide à la prescription et l'utilisation d'éco-matériaux pour une construction de qualité et à basse consommation d'énergie. Une définition pragmatique et simplifiée d'un éco-matériau est mise en ligne.

& 2007-2008 : les grandes surfaces de bricolage (GSB) dont les deux marques leader en France, élaborent les premières stratégies de référencement de gammes d'éco-solutions pour l'habitat, la décoration, le design, le bricolage, la construction. La mutation de l'offre vers les solutions vertes est enclenchée, des équipes dédiées « D&D » sont créées en lien direct avec les directions commerciales, du marketing de l'offre et des achats.

& Mai 2008 : la première formation de technicien commercial spécialisé en vente d'éco-matériaux et d'éco-solutions pour l'habitat ouvre ses portes dans le département de la Drôme. Ce projet pilote porté par la chambre de commerce et d'industries locale doit permettre d'alimenter les nombreux négoce professionnels de la région Rhône alpes confrontés à une explosion des demandes de clients en éco-matériaux

& Février 2009, le premier magasin du concept KBANE³ dédié à la vente et la mise en œuvre d'éco-matériaux ouvre ses portes dans la métropole Lilloise, dans le rayon des solutions pour l'isolation des murs et toitures, un petit écriteau mentionne « ne cherchez pas de laine de verre, ici nous n'en vendons pas »

& Avril 2009 : un ancien cadre commercial d'une société de fabrication d'écrans de sous toiture crée une plate forme de vente d'éco-solutions pour les professionnels de la construction, sur une base web en ligne sur internet, le concept « SALOLA environnement ». les négoce professionnels spécialisés bois référencent partout en France des éco-matériaux pour l'isolation thermique des bâtiments. Certains négoce spécialisés développent des concepts dédiés uniquement ciblés « vente d'éco-matériaux » Par exemple le concept batimieux porté par AGEKA www.batimieux.fr .

L'éco-construction devient donc, plus qu'une tendance, une mode ou un épi-phénomène, un « marché » qui comme tout marché, repose sur un couple « offre / demande ». Ce couple offre demande utilise pour se positionner et faire vivre ce marché une approche d'une certaine qualité environnementale des solutions, matériaux, produits, systèmes de production d'énergie, une approche des éco-matériaux et éco-produits pour la construction.

Hier niée ou dénigrée car ne représentant pas un marché digne d'intérêt (les maisons écologiques d'auto-constructeurs convaincus), aujourd'hui la thématique « éco-matériaux et éco-produits » pour une meilleure construction devient complètement d'actualité.

C'est en partant de ce constat, en vivant l'évolution du marché de l'éco-construction et des éco-matériaux au jour le jour depuis 2004, que s'est posée la problématique suivante : comment caractériser autrement que par des indicateurs environnementaux et de santé, la performance d'éco-matériaux, présentés comme « meilleurs », par comparaison à des matériaux considérés comme traditionnels (au sens assurabilité) ou conventionnels ?

Ce travail de thèse est donc dédié intégralement à la problématique des éco-matériaux pour la construction, il est divisé en quatre parties :

Un premier chapitre positionne la thématique en présentant un état de l'art des éco-matériaux au niveau international et des outils et méthodologies existants destinés à éco-différencier un matériau, un système constructif ou un bâtiment par rapport à un autre.

Le deuxième chapitre permet d'appréhender la place accordée aux éco-matériaux et éco-produits pour la construction de bâtiment, par les principaux systèmes de management de la qualité environnementale dans la construction ou labels de consommation basse énergie (SMQEB) du type de la HQE en France ou de la démarche Minergie en Suisse.

Le troisième chapitre pose les bases d'une méthode innovante permettant d'analyser, caractériser, classer et évaluer des matériaux et produits de construction, sous l'angle de trois familles de critères techniques, économiques et financiers, en vue de les présenter en tant qu'éco-matériaux.

³ Kbane, la maison durable www.kbane.com

Une validation de cette méthodologie est proposée sur un système constructif simple remplissant plusieurs fonctions majeures par rapport aux principaux axes de conception d'un bâtiment, une menuiserie extérieure.

Le raisonnement doit aboutir au final à l'agrégation des critères analysés sous la forme d'un langage commun, compréhensible par la plupart des acteurs du secteur de la construction, particulièrement ceux qui ne sont pas au fait de l'ingénierie de l'éco-conception ou de la conception environnementale.

Le dernier chapitre réalise un focus par rapport à un territoire type d'étude, le Nord Pas de Calais. L'identification de 16 fabricants locaux d'éco-matériaux facilite l'application de la méthodologie créée et testée à un éco-matériau fabriqué sur ce territoire, et utilisé au sein d'un système constructif plus complexe, remplissant une fonction majeure au sein de la performance notamment thermique d'une construction, un rampant de toiture.

La méthodologie présentée doit être reproductible pour faciliter son application à un grand nombre d'éco-matériaux et éco-produits rentrant dans la conception de systèmes constructifs relevant de l'éco-construction et de la basse énergie, et considérés comme « plus chers » que les systèmes constructifs de la construction traditionnelle.

CHAPITRE 1

Les éco-matériaux / produits pour le secteur de la construction, état de l'art et positionnement dans les démarches de conception environnementale des systèmes constructifs.

Chapitre 1 : Les éco-matériaux / éco-produits pour le secteur de la construction, état de l'art et positionnement dans les démarches de conception environnementale des systèmes constructifs.

1.1 Construction et développement durable, introduction

1.1.1 Evolution des pratiques dans l'habitat

Jusqu'au milieu du vingtième siècle, la majorité des habitants des pays développés habitaient en milieu rural, dans des constructions réalisées selon les traditions régionales, les savoir faire des artisans et les matériaux disponibles localement.

Sans remonter à la fonction première du logement, les habitants passaient souvent plus de temps à l'extérieur qu'à l'intérieur, sans se poser la question de savoir si leur habitat était mal isolé, mal ventilé, sain ou non, consommant peu ou beaucoup d'énergie.

Que ce soit en construction neuve ou en rénovation, la plupart des matériaux de construction proposés par les négoce actuels n'existaient pas il y a à peine un siècle ; ces nouveaux matériaux ont, en quelques décennies, complètement remplacé les matériaux locaux disponibles en grande quantité.

Quelques exemples sont particulièrement révélateurs :

En Europe, la destruction massive des bâtiments au cours des deux guerres mondiales propulsa sur le marché des techniques et matériaux reproductibles, faciles à produire en grande quantité et rapides d'emploi, mais dont on n'a pu à l'époque, dans l'urgence, évaluer l'impact en termes techniques (durabilité fonctionnelle), environnementaux et sanitaires.

En France, jusqu'au début du 20ème siècle, 50 000 charpentiers aguerris aux techniques de construction bois « colombages », « pan de bois », « charpentes chevillées tenons mortaises » exerçaient leurs talents avant d'être envoyés au front renforcer les fonds de tranchées. Après guerre, les maçons Italiens et Portugais volontaires pour « reconstruire le pays » généralisent le recours à la maçonnerie, « filière humide », avec, suite à l'injection de capitaux du plan Marshall, l'utilisation de blocs béton prêt à l'emploi, le fameux « aggloméré de ciment creux » reconnu comme technique traditionnelle.

1.1.2 La problématique environnementale et la santé

Au XXI^{ème} siècle, l'impact du « cadre de vie » sur la santé est établi, d'autant que la majorité de la population habite en ville et travaille dans des locaux mal ventilés, éclairés artificiellement, souvent climatisés. Autant d'endroits « clos » où les habitants sont enfermés...

Mais le bruit, les matières polluantes, la mauvaise qualité de l'air intérieur, l'épuisement des ressources naturelles, la consommation galopante d'énergie font également partie du quotidien et représentent des enjeux réels et globaux pour les pays industrialisés, alors que les pays dits en voie de développement ne rêvent que d'égaliser nos modes de vies occidentaux, [VINCENT FOURRIER, 2006]¹.

L'un des indicateurs de l'impact global de l'homme sur la planète est le réchauffement climatique provoqué par les émissions de gaz à effets de serre d'origine anthropique [GIEC, 2007]². La quasi-totalité de nos rejets de gaz à effet de serre (dont le CO₂) est reconnue comme issue de nos consommations énergétiques qui n'ont cessé de croître depuis 1860, sous l'effet conjugué de la croissance démographique et de la croissance économique

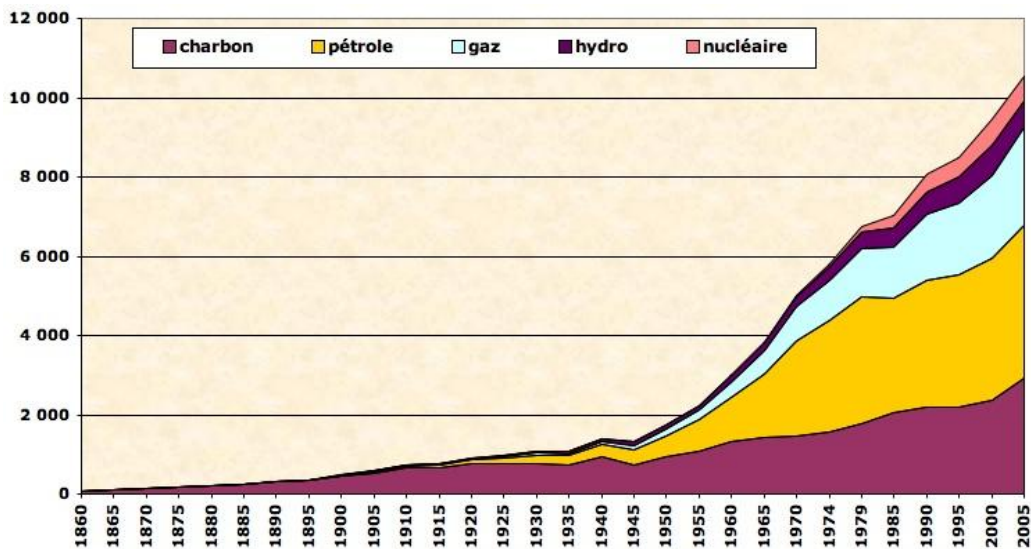


Figure 1 : Evolution constatée de la consommation totale d'énergie commerciale (hors bois) depuis 1860 en MTep [MARLAND, 2003]³.

La croissance économique tend à faire augmenter la consommation d'énergie responsable de la majorité des problèmes environnementaux actuels : à tous ses stades de transformation, l'énergie est source d'impacts parmi lesquels le réchauffement climatique (majoritairement dû aux émissions de CO₂) dont l'origine anthropique est aujourd'hui bien établie.

Pour le GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernementaux sur l'Evolution du Climat), afin de limiter les répercussions humaines du changement climatique, il faut réduire de moitié les émissions de gaz à effet de serre (GES) au niveau planétaire d'ici à 2050, ce qui, compte tenu de la marge de manœuvre réduite des pays en voie de développement, implique de réduire par 4 les émissions de GES des pays industrialisés (le facteur 4).

1.1.3 Poids et opportunités du secteur du bâtiment

Le secteur du bâtiment est directement concerné puisque gros consommateur d'énergie ; près de 46 % de la consommation totale (70 millions de Tep), le plus gros consommateur d'énergie en France, et parallèlement l'un des plus gros émetteurs de gaz à effet de serre, soit 25 % des émissions totales (120 millions de tonnes de CO₂). Réputé lent à évoluer, ce secteur ne part pas « favori » car pénalisé par le flux annuel de construction (300 000 par an en France), le stock existant (30 millions de logements et 800 millions de m² de bâtiments tertiaires chauffés) et la durée de vie moyenne « longue » des bâtiments (50 à 100 ans) [ADEME, 2006]⁴.

Dans le double contexte du réchauffement climatique et de la pénurie inéluctable en énergie fossile et en ressources non renouvelables, la réduction des consommations du secteur du bâtiment est une priorité [SIDLER, 2007]⁵.

Ce secteur est celui sur lequel il est le plus facile d'agir à la fois techniquement et rapidement : il est peut-être le seul à offrir des possibilités de progrès suffisamment fortes pour répondre aux engagements de réduction des émissions de GES :

La maîtrise des impacts environnementaux concerne à la fois l'enveloppe et les équipements d'un bâtiment ; le recours aux matériaux fabriqués à partir de matières premières renouvelables peut être une réponse au problème d'épuisement des ressources naturelles

[COLLET, 2004]⁶. Les bâtiments peuvent enfin utiliser plusieurs sources d'énergie, dont les énergies renouvelables. Ces énergies peuvent être combinées et, le cas échéant, changées plusieurs fois sur la durée de vie du bâtiment.

De plus, les travaux d'amélioration des performances énergétiques des bâtiments peuvent être programmés sur plusieurs années, évolution qui renforcera à chaque fois la valeur patrimoniale du bien. Enfin les occupants des bâtiments ont des comportements d'usage relativement constants au cours du temps et leurs besoins évoluent sur des cycles longs, sans rupture brutale, et peuvent être anticipés raisonnablement.

Récemment, suite au « Grenelle de l'Environnement », une consultation¹ indique que 45 millions de Français rêvent d'une maison plus « écologique », même si le nombre de constructions considérées comme telles ne représente que 5 % des réalisations nationales.

Pour ces éco-consommateurs potentiels [GUIGNARD, 2006]⁷, la maison écologique représente une construction respectueuse de l'environnement (43 % des réponses), une construction qui utilise des matériaux naturels, recyclables, locaux, écologiques, non polluants (35 % des réponses) et enfin une construction dans laquelle l'énergie est maîtrisée (23 % des réponses).

La même étude indique que pour 58 % des personnes ayant un projet de construction neuve, la construction écologique ou éco-construction est associée aux matériaux « bois, terre, chanvre, laine de mouton, produits « naturels », etc. ; », et 30 % d'entre elles évoquent rapidement une technique ou une technologie permettant de réaliser des économies sur la dépense énergétique.

1.1.4 Lien avec le concept de développement durable

Derrière ces préoccupations environnementales, se profile le concept de développement durable défini au début des années 1990 comme un développement qui « satisfait les besoins d'aujourd'hui sans compromettre le développement des générations futures » [BRUNTLAND, 1987]⁸.

Souvent présenté sous la forme d'un tryptique, le concept de développement durable évoque un équilibre parétien transgénérationnel qui se réfère aux capacités de l'environnement à répondre aux besoins actuels et futurs. Dans cette approche, l'environnement est un critère de performance parmi trois, s'ajoutant à des préoccupations sociales et économiques.

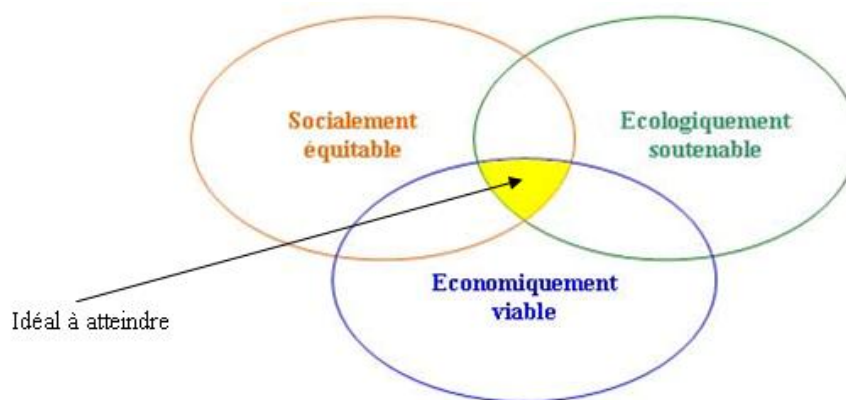


Figure 2 : Proposition de tryptique du développement durable.

¹ Sondage TNS – Sofres, Novembre 2007.

Le développement durable, traduction imparfaite du terme anglais « *sustainable* » (soutenable) part d'un bon sentiment pour souhaiter l'épanouissement du genre humain mais au final, ce concept ne présente pas forcément d'intérêt pour mieux y parvenir.

La traduction concrète la plus fréquente est, selon les cas de figure, une « *auberge espagnole* » dans laquelle chacun met ce qu'il veut [JANCOVICI, 2002]⁹, en considérant notamment qu'une évolution négative sur le plan environnemental est compensée par une évolution positive sur le plan économique, pour parvenir à quelque chose de neutre.

Tout un chacun peut y piocher la justification sociale ou économique d'un comportement qui au regard de critères environnementaux objectivement mesurables (une occupation d'espace, une consommation d'eau et d'énergie, un nombre de jours de pluie par an, un taux d'espèces en sursis etc..) soit manifestement « non durable »: l'existence de rapports de développement durable pour les sociétés du CAC 40 ne signifie pas que leurs rédacteurs ont une activité durable, quand bien même il peut exister des individus au sein de cette société qui espèrent que ce puisse être le cas.

Dans le champ environnemental, il est pourtant possible de se doter d'un langage commun et d'un objectif de manière univoque, de définir ce qui est durable et ce qui ne l'est pas : est manifestement "non-durable" tout comportement étroitement dépendant de ressources qui seront indisponibles d'ici quelques décennies.

Dans le champ économique, qu'est-ce qu'un Produit Intérieur Brut (PIB) ou un chiffre d'affaires « durable » ou « soutenable » ?

Dans le domaine sociétal, il existe peu d'exemples d'égalité parfaite entre membres d'une communauté animale ou humaine dans le monde, ce qui n'a jamais empêché la "durabilité ».

Ceci ne signifie pas pour autant qu'il faille se désintéresser des limites du système car pour toute ressource limitée, le choix est de gérer par soi même une inéluctable décroissance ou d'attendre que la régulation se fasse naturellement...l'histoire a montré que la seconde option était plus néfaste que la première.

La vraie bonne question pourrait bien, dans ce cas, être « *quand arrivera la décroissance d'une consommation de ressource non durable ?* » et non « *est-ce qu'elle arrivera ?* » [JANCOVICI, 2002].

1.1.5 Vers un management durable pour les entreprises du secteur de la construction

Pour les acteurs de la construction, il est intéressant de se référer au terme anglo-saxon de « glocalisation » [GOBIN, C 2006]¹⁰, contraction de globalisation et de localisation. Si les échanges économiques se démultiplient et deviennent globaux, les objets échangés sont eux bien créés localement. Cette balance entre les flux marchands et l'inscription locale de la production est essentielle pour l'avenir des métiers du BTP.

Trois exigences sont reconnues et considérées comme incontournables : Tout d'abord le poids des utilisateurs finaux qui est de plus en plus prépondérant dans les décisions. La construction n'est certes pas encore directement exposée mais les travaux en direct pour l'entretien du patrimoine privé ne cessent néanmoins de croître. Ensuite les investisseurs qui introduisent les critères de respect de l'environnement et de déontologie sociale pour sélectionner les entreprises dans lesquelles ils sont susceptibles de prendre des participations. Enfin les entreprises qui sont progressivement tenues de jouer un rôle social au sein de la collectivité et non plus d'être des acteurs économiques centrés sur la recherche du seul profit immédiat.

Comme pour d'autres secteurs de l'économie, la notion de service se dégage: La construction doit d'abord permettre aux utilisateurs finaux de mener leurs activités dans les meilleures conditions.

Le bâti devient ainsi un vecteur de la compétitivité économique. Aux moyens techniques retenus pour construire, on associe le niveau des performances d'usage accessibles.

Ceci n'est pas neutre pour les intervenants du secteur : fournir une performance d'usage suppose une maîtrise globale de la réponse vis-à-vis du marché. Cette intégration nécessite d'autres modes de travail, comme l'ingénierie concourante et la prise en compte du cycle de vie du produit. Et garantir une performance, c'est aussi reconnaître les effets d'obsolescence et de vieillissement. Dès lors, sous la pression de la concurrence, il est probable que le niveau des exigences ira croissant rendant caducs un certain nombre de produits. La durée de vie devient ainsi un paramètre très important des décisions.

1.2 Démarches d'analyse multicritères en cycle de vie des produits et matériaux de construction

1.2.1 Contexte de l'analyse multicritères: la pensée en cycle de vie

La norme française NF P01-010 [AFNOR, 2005]¹¹ définit assez précisément un bâtiment comme étant un assemblage de produits de construction, un processus actif qui génère des flux entrants et sortants, tout au long de son cycle de vie (notamment en vie en œuvre), et un lieu de vie pour les occupants mais également [LEMAIRE, 2006]¹² un lieu d'implantation et une implication de nombreux acteurs responsables de sa construction et de son utilisation.

Selon la nomenclature en vigueur, les matériaux ou composants de construction sont issus d'un secteur industriel situé en aval de l'extraction, et en amont du bâtiment et des travaux publics. Ces matériaux sont destinés à trois principaux marchés: les constructions neuves, l'entretien / rénovation du parc de bâtiments et les travaux publics [SESSI, 2003]¹³.

Le cycle de vie d'un matériau de construction et d'un bâtiment est une notion directement empruntée à ce qui existe de plus simple : le cycle de la matière.

La matière qui constitue notre environnement construit s'inscrit dans un cycle dont l'origine en même temps que l'aboutissement est la nature. La nature procure ainsi la totalité de nos ressources et reçoit la totalité de nos déchets.

Les phases opérationnelles du « cycle de vie d'un bâtiment » sont connues et décrites par ordre « chronologique » [CHATAGNON, 1999]¹⁴ et [ADEME, 2002] ; elles impliquent chaque fois de nombreux acteurs : la phase préparation, la phase conception, la phase consultation des entreprises, la phase chantier, la phase utilisation / exploitation, la phase fin de vie.

Le cycle de vie qui retient notre attention concerne d'avantage l'aspect « fonctionnel », qui comporte 5 étapes, selon la norme NF P01-020 [AFNOR, 2005]¹⁵ :

- 1. fabrication des éléments constitutifs
- 2. construction
- 3. vie en œuvre
- 4. adaptation, transformation, réhabilitation
- 5. fin de vie

Chacune de ces phases est potentiellement responsable d'impacts environnementaux et sanitaires [KUR, 2004]. La fabrication des éléments constitutifs et la construction d'un bâtiment renvoient directement au cycle de vie des matériaux et composants de construction

« extraction – transport – fabrication – transport - mise en œuvre – vie en œuvre - élimination / recyclage ».

Toujours selon la norme NFP01-020, les impacts environnementaux et sanitaires d'un bâtiment sont d'ailleurs classés en deux catégories : ceux principalement liés aux produits et matériaux de construction et ceux qui y sont partiellement liés.

Les impacts principalement liés aux matériaux et composants sont : les consommations d'énergies et de matières premières, en phase fabrication, adaptation / transformation / fin de vie et recyclage, les émissions de polluants dans l'air, l'eau et le sol en phase de vie en œuvre et la production de déchets pour la fabrication, construction, adaptation / transformation et fin de vie.

Les impacts environnementaux et sanitaires plus partiellement liés aux matériaux et composants sont : les consommations d'énergie et les émissions de déchets pendant la phase construction, qui peut dépendre des habitudes et savoir faire des entreprises de mise en œuvre, les consommations d'énergie et d'eau lors de la vie en œuvre du bâtiment, la production de déchets d'activités lors de la vie en œuvre du bâtiment, et les émissions liées à l'utilisation d'appareils électroménagers lors de la vie en œuvre du bâtiment.

Ainsi, le choix des matériaux et composants de construction conditionne les impacts globaux environnementaux et sanitaires d'un bâtiment sur la totalité de son cycle de vie ; il est donc logique de s'intéresser aux impacts environnementaux et sanitaires de ces matériaux. Mais d'autres choix techniques, économiques, financiers, sociétaux, architecturaux, vont également influencer le comportement des acteurs du bâtiment, et par conséquent les impacts environnementaux et sanitaires pendant le cycle de vie du bâtiment.

Du fait de la durée de vie des composants et du système constructif « bâtiment », l'évaluation objective des impacts d'un produit, matériau de construction, système constructif intermédiaire ou système constructif complet ne peut se faire qu'en utilisant une méthodologie multi-critères, multi-étapes et multi-acteurs qui prend en compte le cycle de vie complet, du « berceau à la tombe », la méthodologie dite d'« analyse en cycle de vie » (ACV).

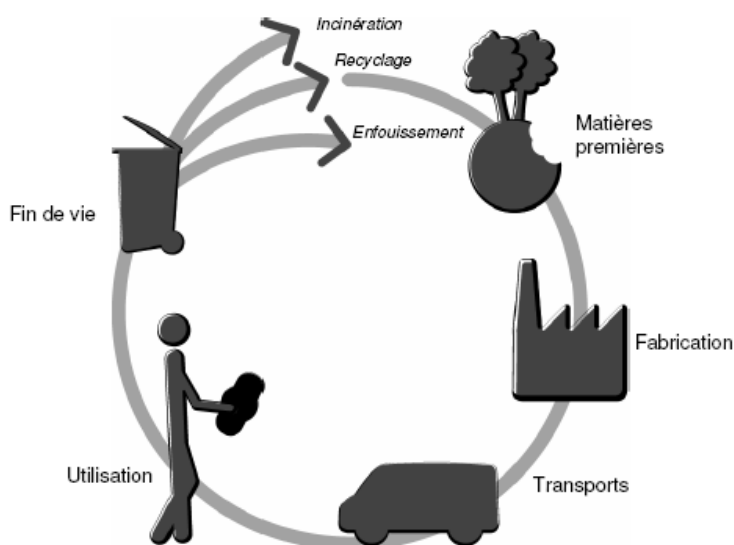


Figure 3 : Le cycle de vie d'un produit, du berceau à la tombe, [EVEA CONSEIL]¹.

¹ EVEA CONSEIL, éco-conception de produits et services, www.evea-conseil.com

Les critères permettant d'analyser la performance d'un matériau ou composant de construction peuvent être regroupés en 6 familles distinctes [WIGNACOURT, 2005]¹⁶ :

- les **critères techniques** : performance technique, fonctionnelle, durabilité technique, qualité architecturale, facilité d'entretien.
- les **critères économiques** : coûts d'investissement, coûts différés (entretien remplacement), coûts évités (santé, productivité, déconstruction en fin de vie, transports).
- les **critères financiers** : financement des coûts d'investissement, temps de retour sur investissement (ROI), ratio coûts / bénéfiques, valeurs d'actualisation monétaire.
- les **critères environnementaux** : économie de ressources (matières, énergies), maîtrise des risques sur l'environnement (flux et émissions).
- les **critères de santé** : maîtrise des risques sur la santé (personnels en phase production, artisans, occupants des bâtiments).
- les **critères sociétaux** : impacts sur l'économie locale, heures de main d'œuvre générées par un produit avant sa commercialisation, heures de travail générées par la mise en œuvre.

L'analyse en cycle de vie permet de connaître les impacts associés aux produits en hiérarchisant les priorités d'amélioration.

Les produits peuvent être ensuite pensés ou repensés en phase de conception en intégrant l'environnement le plus en amont possible ; c'est ce qu'on appelle l'éco-conception ou « *Design for environment* » [SWEATMAN & SIMON, 1996]¹⁷ : les critères traditionnels de faisabilité technique, les attentes des clients et la maîtrise des coûts sont ainsi enrichis de l'approche « environnementale ».

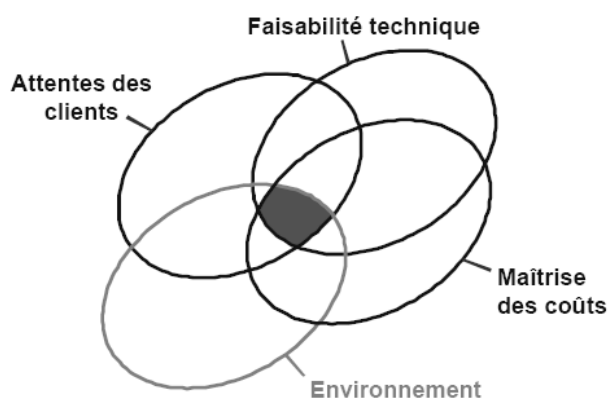


Figure 4 : Intégration de l'environnement dans la conception d'un produit, [AFNOR, 2003]¹⁸

L'éco-conception inclut ainsi plusieurs types de conception :

- La conception en vue d'optimiser l'efficacité énergétique,
- La conception en vue d'optimiser la production,
- La conception en vue du recyclage, qui regroupe,
 - La conception facilitant la récupération,
 - La conception facilitant le désassemblage,
 - La conception facilitant la réparation, la maintenance, la réutilisation, la dépollution.

Cette prise en compte de l'environnement dans les phases d'éco-conception de produits ou services, peu développée jusque dans les années 1995, principalement à cause des investissements nécessaires et des temps de retours sur investissement jugés trop longs

[**GRAEDEL & ALLENBY, 1996**]¹⁹, est aujourd'hui bien développée non seulement dans les pays anglo-saxons mais également en Chine, en Corée du Sud et au Japon.

La France, qui marquait encore en retard il y a peu de temps, s'illustre de plus en plus, notamment grâce aux efforts de quelques entreprises¹.

Le recensement récent par l'AFNOR (Association Française de Normalisation) des démarches existantes et outils développés, ainsi que leur analyse à travers une grille de lecture ont permis d'évaluer le niveau de maturité des différents secteurs rencontrés au regard de l'éco-conception (principalement équipementiers pour les véhicules, plasturgie, D3E, emballages en matières plastiques, mécanique et ameublement).

Ils ne présentent cependant pas tous le même niveau d'appropriation de l'éco-conception et rares sont les secteurs qui ont développé des outils couvrant la totalité de la démarche d'éco-conception et ses différentes phases [**AFNOR, 2005**]²⁰.

Un des secteurs les moins avancés en France en matière d'éco-conception de produits est celui des matériaux de construction pour le bâtiment ou la voirie.

Les analyses en cycle de vie exhaustives ou sélectives des produits et matériaux de construction permettant de renseigner les fiches de déclaration environnementales et sanitaires selon la norme NF P 01-010, volets 1&2 [**AFNOR, 2005**]²¹ sont encore peu répandues, au regard des 101 fiches disponibles au 19/02/2008 sur la base de données grand public du CSTB (Comité Scientifique et Technique du Bâtiment) – INIES².

Les résultats de ces déclarations environnementales sont pourtant essentiels pour évaluer les impacts d'un bâtiment : les produits et matériaux sont associés les uns avec les autres pour constituer des systèmes constructifs (ou solutions constructives), eux mêmes associés entre eux pour définir le système constructif global qu'est le bâtiment.

Les résultats d'une analyse en cycle vie peuvent être restreints volontairement, « simplifiés » et ramenés à un mono-indicateur facilitant la compréhension : les émissions de gaz à effet de serre (en équivalents Carbone) obtenus par la méthode dite du bilan carbone [**ADEME, 2003**]²² ou le ratio coûts / bénéfices issu d'une analyse en coût global ou coûts complets (Life Cycle Costing) : tenir compte des dépenses initiales et des dépenses futures ainsi que des avantages (économies) ou inconvénients (pertes) pendant une période [**WIGNACOURT, 2004**]²³.

Appliqué au bâtiment, le calcul du coût global en cycle de vie ainsi permet d'évaluer plusieurs solutions d'investissement à partir du coût initial, des dépenses d'exploitation et d'entretien pour la durée de vie économique de l'ouvrage, des dépenses de nouvelle affectation ou de recyclage en fin de vie. [**KATS, 2003**]²⁴.

1.2.2 Outils d'analyse et d'aide au choix des matériaux et composants de construction sur la base de leurs impacts en cycle de vie

Pour répondre à la demande de prise en compte des impacts environnementaux et sanitaires des matériaux et composants de construction permettant de proposer des solutions

¹ En 2006, quatre entreprises ont été récompensées pour les efforts qu'elles ont entrepris en matière d'éco-conception de produits : les produits solaires WELEDA, les planches de bord éco-conçues de RENAULT, l'assurance « Verte » du groupe d'assurances MAAF et l'éponge naturelle Aqua Fonda de FRANCE CHITINE.

² INIES : base de données française de référence sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits et matériaux de construction, disponible sur www.inies.fr

constructives pour réaliser un bâtiment, un certain nombre de démarches et outils sont développés, ayant tous comme base commune l'éco-conception / l'analyse en cycle de vie et l'approche multi-critères. On trouve parmi ceux-ci : les étiquetages contrôlés « certifiés » ou « écolabels », les déclarations environnementales et l'attestation du CESAT (commission environnement – santé des avis techniques du CSTB).

1.2.2.1 Etiquetages contrôlés certifiés ou écolabels.

Selon la terminologie « ISO » (international standard for organisations), l'offre de produits plus respectueux de l'environnement s'exprime à travers l'étiquetage environnemental de trois types différents : type I, II et III.

Les normes internationales de l'ISO fournissent ainsi :

- des principes généraux qui guident les déclarations et les étiquetages environnementaux, ISO 14 020.
- des principes et des procédures pour la certification de la qualité environnementale des produits (étiquetages de types I « écolabels officiels » ISO 14024.
- des termes, symboles et méthodes utilisables par les organismes pour la déclaration des aspects environnementaux des produits et services (étiquetages de type II ou auto-déclarations environnementales) norme ISO 14 021.
- des recommandations pour la pratique des étiquetages informatifs, informations standardisées pour les consommateurs (étiquetages de type III ou éco-profil) norme ISO 14025 et française NF P01-010.

Les écolabels sont des labels environnementaux attribués à des produits ayant une moindre incidence sur l'environnement ; ils définissent des critères et des niveaux d'exigences.

Ceux-ci sont considérés comme des instruments économiques modérés permettant aux consommateurs de prendre des décisions d'achats en fonction de critères environnementaux [MEDD, 2005]²⁵. Ils peuvent inciter les fabricants à mettre au point et lancer sur le marché des produits plus respectueux de l'environnement et plus acceptables pour la société, notamment afin de convaincre une clientèle éco-sensibilisée et la conserver.

Parmi les plus connus, on trouve la marque « NF ENVIRONNEMENT » et l'écolabel européen peu adaptés au secteur des produits et matériaux de construction, comme en atteste le faible nombre de produits « éco-certifiés » (peintures, vernis, enduits et revêtements de sols durs NF 130) : 15 fabricants engagés et 6 marques « distributeurs » [AFNOR, 2008]²⁶.

Ces écolabels concernent surtout les produits de grande consommation : le produit analysé doit être conforme à des critères écologiques et d'aptitude à l'usage qui dépendent de chaque famille de produits. Il est soumis à une analyse simplifiée en cycle de vie et les critères d'appréciation sont partagés entre divers représentants du monde industriel, d'associations de consommateurs et de protection de l'environnement, des pouvoirs publics, de distributeurs...

Les critères de sélection dépendent de chaque famille de produits et ne semblent pas répondre à une approche « produit » susceptible d'abonder à une évaluation globale d'un bâtiment. [LEMAIRE, 2006]. On reproche notamment aux écolabels d'être sélectifs dans le sens où 30 % au maximum des produits d'une même famille présents sur le marché au moment de la sélection des critères doivent pouvoir répondre aux exigences fixées par l'écolabel.

Cette sélectivité « risquerait » d'aboutir à une liste noire de produits qui ne permettraient pas aux concepteurs d'ouvrages d'effectuer leur propre hiérarchisation de leur priorité environnementale et sanitaire, ainsi que leur propre choix des produits.

Même si ces formats présentent des lacunes, ils ont cependant le mérite d'exister depuis un certain nombre d'années et d'être utilisés comme clé d'entrée pour l'aide à la sélection et la prescription de produits et matériaux plus « verts » que d'autres; ces labels ont en tout cas été largement utilisés sur les premières réalisations expérimentales dites à « Haute Qualité Environnementale » en France depuis 1995 [**Conseil Régional Nord Pas de Calais, 2005**].

1.2.2.2 Déclarations environnementales et sanitaires « volontaires »

Au niveau international des normes ont été élaborées pour proposer un format commun de déclaration pour les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits et matériaux de construction : ISO DIS 21 930 en 2005, NEN 8006 et NF P01-010 en 2004.

Pour la France, la norme NF P01-010 [**AFNOR, 2005**] propose un format national de déclaration qui, pour être validé, doit être vérifié par un auditeur externe (vérification du contenu et de sa réalisation par le programme FDE&S de l'AFNOR) membre du comité : respect des règles spécifiques au cadre normatif et vérification des résultats issues des ACV réalisées.

L'outil de communication de cette norme passe par les fiches de déclaration environnementales et sanitaires (FDES) mises à disposition des « acteurs » du marché de la construction sur un site internet gratuit, la base de données « INIES » [**CSTB, 2005**]²⁷ gérée par le CSTB (centre scientifique et technique du bâtiment). La norme fournit des listes non exhaustives de flux relatifs à la consommation des ressources naturelles, aux émissions dans l'air, l'eau, le sol et à la production de déchets, analysés sur le cycle de vie complet.

Elle précise également dix catégories d'impacts environnementaux représentatives des matériaux et composants de construction, avec des indicateurs d'évaluation, des unités, le moyen d'obtenir les données et les méthodes de calcul.

Elle présente enfin des informations utiles à l'évaluation sanitaire ainsi qu'à l'appréciation de la contribution de ce dernier au confort, ce qui est plus ou moins subjectif. Les dix catégories d'impact identifiées comme pertinentes pour évaluer la contribution d'un matériau ou composant à la qualité environnementale globale d'un ouvrage constructif (un bâtiment) sont les suivantes :

1. Consommations de ressources énergétiques : MJ / UF (unité fonctionnelle)
2. L'indicateur d'épuisement de ressources naturelles (ADP) : Equivalent antimoinés (Sb)
3. La consommation d'eau : Litres / UF
4. La production de déchets solides : Kg / UF
5. Le changement de climat : Eq CO₂ / UF
6. L'acidification de l'atmosphère : Eq SO₂ / UF
7. La pollution de l'air : m³ / UF
8. La pollution de l'eau : m³ / UF
9. La destruction de l'ozone stratosphérique : Kg CFC / HCFC / UF
10. La formation d'ozone photochimique : Kg Eq éthylène / UF

Pour l'évaluation des informations liées au risque sanitaire dans l'air du matériau, les informations suivantes doivent être fournies : monoxyde de carbone, poussières, ozone, fibres, COV (composés organiques volatils), rayonnements, particules viables, non viables etc...

La contribution à la qualité de l'eau est, par exemple, appréciée par rapport à la résistance aux biocides, les propriétés organoleptiques, l'aptitude au contact de l'eau potable etc..

Même si les catégories d'impacts environnementaux semblent ne pas constituer une famille cohérente de critères, la norme précise les données à identifier pour s'assurer de la qualité environnementale des produits. Des travaux d'harmonisation sont en cours entre cette norme et le projet ISO DIS 21930.

1.2.2.3 Attestations environnementales et sanitaires du CESAT

Le CESAT est le « Comité Environnement Santé » des Avis Techniques (ATec).

Créé en 2003, ce Comité permet d'intégrer les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits examinés dans la procédure d'Avis Technique : tout nouveau produit mis sur le marché qui n'est pas « traditionnel » (non décrit par une norme) peut bénéficier d'un Avis Technique (ATec) ; celui-ci n'est pas obligatoire mais constitue une référence quasi-incontournable pour décider les maîtres d'ouvrage à utiliser un nouveau matériau. Un avis technique est en général indispensable pour obtenir des assureurs la garantie décennale (spécificité française).

Composé de spécialistes de l'environnement et de la santé, le CESAT développe une attestation environnementale et sanitaire basée sur le format de NF P01-010 pour les aspects environnementaux, et pour la partie « santé », sur l'évaluation des émissions chimiques, radioactives, olfactives, ainsi que l'aptitude des produits à favoriser la présence de micro-organismes ou non.

Cette attestation environnementale vient ainsi compléter l'appréciation de l'aptitude à l'emploi d'un produit ou système innovant (avis technique) pour mettre en valeur ses caractéristiques environnementales et sanitaires ; elle est uniquement disponible pour les produits déjà titulaires d'un avis technique. Pour obtenir l'attestation du CESAT, certaines informations doivent obligatoirement être fournies et/ou étudiées, contrairement aux informations sanitaires de NF P01-010 et des FDES.

1.2.2.4 Outils informatisés disponibles

Ces démarches permettant de prendre en compte l'environnement et la santé dans les opérations de construction et pour le choix des matériaux et composants mettent en évidence des formats multicritères précis de déclaration, qui tiennent également compte a priori de règles techniques.

Généralement, en France, celui qui commande un bâtiment, le maître d'ouvrage, porte l'intégration de l'environnement et de la santé dans les opérations qu'il mène; il faut donc avoir accès rapidement aux bonnes informations. Le développement de la base INIES semble être une première étape vers la mise à disposition et la simplification d'accès à ces données, notamment pour les maîtres d'ouvrage, les concepteurs, les artisans.

Cette étape n'est pas suffisante [LEMAIRE, 2006] : assembler des données permet de simplifier l'accès mais pas de rendre leur utilisation efficace et rigoureuse; même si la base INIES existe, elle ne constitue pas pour l'instant une aide au choix des produits de construction.

Des outils informatisés remplissant partiellement cette fonction existent au niveau international.

Les outils opérationnels dédiés au bâtiment (système complet) sont beaucoup plus nombreux que ceux dédiés uniquement aux matériaux et composants de construction. Ceux qui s'y consacrent n'ont pas forcément la même approche, ne considèrent pas les mêmes impacts et ne les agrègent pas de la même manière.

Une synthèse qui s'appuie sur une typologie définie [CHATAGNON, 1999] peut être réalisée, elle propose une analyse par rubrique, dont cinq sont pertinentes : la fonction, l'échelle, les critères, l'agrégation et les résultats.

Ces rubriques sont complétées par le type d'analyse, les méthodes utilisées, le nombre de matériaux référencés ainsi que le recours à une typologie de classement des informations.

Seuls sont repris les outils dédiés soit uniquement aux matériaux et composants de construction, soit partiellement ; les outils identifiés comme dédiés complètement au bâtiment dans une approche globale ne sont pas mentionnés car trop nombreux.

Ils peuvent néanmoins être identifiés auprès des mêmes « sources » (EQUER, GREENCALC, PAPOOSE, GB TOOL, ENVEST, ESCALE...)

Tous ces outils s'adressent principalement aux maîtres d'ouvrages et aux concepteurs, en phase « conception ».

Les impacts environnementaux des différents outils ne sont pas directement mentionnés car ils sont souvent identiques et cette précision n'apporte pas un intérêt majeur pour la comparaison effectuée. Globalement, il s'agit des impacts sur le réchauffement global (Global Warming Potential), la consommation (eau, énergie, ressources), la pollution de l'air, la pollution de l'eau et la pollution des sols.

Les impacts assimilés au confort sanitaire concernent la qualité de l'air intérieur et parfois le confort.

Les critères techniques sont souvent liés à la durabilité fonctionnelle.

Logiciels informatiques d'analyse et d'aide au choix des matériaux et composants de construction sur base de leurs impacts en cycle de vie												
recensement international (non exhaustif)												
Nom	pays d'origine	type d'analyse	méthodes utilisées		fonction principale	échelle	critères	agrégation	résultats	matériaux	classement	
			1	2							O/N	type
BEES "Building for Environmental and Economic Sustainability"	USA	performance environnementale et évaluation économique	LCA 14040	ASTM Standard Life cycle cost	comparaison et aide au choix	matériaux	12 indicateurs d'impacts environnementaux et 2 critères économiques	aucune	valeurs quantitatives des indicateurs	230	O	Uniformat II
Lisa "LCA in Sustainable architecture"	Australie	performance environnementale et évaluation économique	LCA	LCI Database Australie	évaluation de la qualité environnementale, comparaison et aide au choix	matériaux et bâtiment	7 indicateurs d'impacts environnementaux	totale par indicateur	valeurs quantitatives des indicateurs	NC	N	
Gabi 4	Allemagne	performance environnementale, reporting, évaluation économique, management du risque, analyse sociétale	LCA 14040	Eco indicator 95, Eco indicator 99, la méthode de pénurie biologique UBP	projection modulaire du cycle de vie d'un produit	matériaux et composants	A minima, 11 indicateurs environnementaux, prix disponibles pour 200 substances du marché, 6 indicateurs techniques	Partielle (bilans avancés)	valeurs quantitatives des indicateurs	NC	N	
Eco calculator for assemblies	Canada	performance environnementale	LCA 14040	NC	évaluation de la qualité environnementale, comparaison et aide au choix	solution constructive	5 critères environnementaux	totale par indicateur, pour chaque matériau / composant, par solution constructive et pour le système bâtiment	valeurs quantitatives des indicateurs	101	N	
Ecobat	Suisse	performance environnementale	LCA 14040	Base de données Eco invent	évaluation des impacts environnementaux	matériaux, solutions constructives et bâtiment	4 indicateurs agrégés, mais évaluation possible aux trois niveaux "matériaux", "solution constructive" et "bâtiment"	totale par indicateurs	valeurs agrégées quantitatives des indicateurs + note par indicateur	62	N	
Umberto	Allemagne	analyse en cycle de vie et performance économique	LCA 14040	Eco invent database + NREL LCI Database	évaluation des impacts environnementaux par modélisation graphique des « process »	matériaux et composants		totale par "process"	valeurs agrégées quantitatives	650 "process" disponibles sur matériaux et composants	N	

Tableau 1 : Synthèse des principaux outils « logiciels » disponibles pour aider à la sélection de matériaux et composants de construction au regard de critères environnementaux et sanitaires. [Building energy software tools directory, US Department of Energy], [CHATAGNON, 1999], [PEUPOURTIER, 2005]²⁸, [CHEVALIER, 2003]²⁹.

Tous ces outils – logiciels sont fondés sur une approche multicritères (environnementaux, sanitaires) voire économique.

Néanmoins, d'un point de vue pratique, ces outils ne sont pas adaptés aux acteurs de terrain de la construction, notamment en ce qui concerne la facilité d'utilisation et la compréhension des termes employés.

Un acteur sans un minimum de connaissances environnementales et sanitaire peut rapidement s'y perdre et interpréter différemment les résultats.

Sans aller (par choix) jusqu'au niveau de l'évaluation globale du bâtiment, peu d'outils permettent de comparer directement des choix constructifs (ce que nous appelons les « solutions constructives ») en remontant jusqu'aux composants / matériaux constitutifs de ces choix constructifs.

Peu d'outils s'intéressent aux matériaux et composants directement, que ce soit au niveau de l'échelle d'évaluation (qui est plutôt celle du bâtiment), ou au niveau des impacts environnementaux et sanitaires qui correspondent souvent aux impacts liés à la vie en œuvre du bâtiment, donc essentiellement aux consommations d'énergie et aux rejets de GES liés à cette phase.

Pourtant la contribution relative des matériaux et composants du bâtiment aux impacts globaux du bâtiment devient de plus en plus importante, pouvant avoisiner 15 % à minima [BARTELS, 2003]³⁰.

Les matériaux et composants de construction correspondent néanmoins au contenu en « impact » du bâtiment, et influencent considérablement les émissions de celui-ci lors de sa vie en œuvre : un isolant « isole » par aptitude à sa fonction première (isoler) mais peut évoluer techniquement négativement : tassement, absorption d'humidité, dégâts liés à des facteurs externes ; il nécessite alors un remplacement qui induit un coût économique et environnemental non négligeable.

Autre exemple : les réglementations actuelles obligent à revoir tous les 5 ans (réglementation thermique) les niveaux de performance minimale pour l'isolation des composants essentiels d'un bâtiment. Certaines démarches qui semblent novatrices pour les pays en retard (la France en fait partie) poussent jusqu'à réduire de manière draconienne les consommations d'énergie ; on parle d'habitat « passif » (15 kwh/m²/an en besoins de chauffage) et/ou à énergie positive (un bâtiment qui produit plus d'énergie qu'il n'en consomme).

Avec ce type de bâtiments et de matériaux adaptés, on repositionne le curseur de la dépense énergétique non plus sur le bâtiment pendant son cycle de vie mais sur les composants et systèmes utilisés pour construire le bâtiment puisque le bâtiment ne consomme pratiquement plus d'énergie.

Il existe pourtant des outils plus accessibles qui synthétisent et simplifient l'accès aux informations essentielles « multicritères » à prendre en compte pour qualifier et choisir un matériau / composant en fonction de ses performances et impacts; ils sont souvent accessibles directement sur internet afin de veiller à une large consultation et simplifier les procédures de mise à jour.

Il est possible de distinguer deux familles de types d'outils :

- ceux donnant accès à des données environnementales « quantitatives » (énergie grise en kwh ou MJ, contenu carbone en kg Eq CO₂, durée de vie typique du matériau, coûts réels) et « qualitatives » (appréciation et commentaires complémentaires, correspondance à l'une des cibles d'un référentiel « SMQE » lié).
- ceux donnant accès à des données uniquement « qualitatives ».

Ils sont souvent issus de travaux proposés par des organismes privés ou publics basés à l'étranger et repris dans les tableaux ci-après :

Données quantitatives et qualitatives

Nom	Pays	Types de critères	échelle	Nb de matériaux / composants	Originalités	Accessibilité
Minesota building material database	USA	8 familles de critères, 6 critères par famille	Matériau, composant ou système	155	<ul style="list-style-type: none"> - données sur la durabilité technique des matériaux - analyse économique « fine » : coûts des matériaux, coûts de la mise en œuvre, premiers « coûts » (investissement initial) et coûts complets en cycle de vie. - se base sur deux logiciels spécialisés « ATHENA » et « BEES » - possibilité de comparer des matériaux au sein d'une même famille (ex isolation ouate de cellulose), affichage sous forme de tableaux facilement exploitables 	Gratuite, sur www.buildingmaterials.umn.edu/index.html
Catalogue construction	Suisse	Trois indicateurs environnementaux, 3 étapes du cycle de vie	Matériau, composant ou système	150 composants de construction disponibles	<p>Outil développé dans le cadre du programme de recherche "Technologie du bâtiment" en Suisse. Le financement est assuré par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) et l'association eco-bau.</p> <ul style="list-style-type: none"> - catalogue « dynamique » de renseignement sur les produits de construction - trois indicateurs environnementaux simplifiés : énergie primaire fossile, énergie primaire totale, et indicateurs Eco 99. - trois étapes du cycle de vie : fabrication / rénovation / élimination 	<p>Gratuite pour les modules standart http://www.catalogueconstruction.ch/1.asp?lng=FR</p> <p>Les modules d'accès aux données environnementales et de coûts (simulation de devis possible) sont payantes. (modules 2-3-4-5)</p>
Eco-devis	Suisse	Critères et indicateurs sélectionnés comme représentatifs de chaque famille de matériaux / composants	Matériaux, composants ou système	37 « systèmes constructifs » disponibles et analysés, avec pour chaque système de nombreux matériaux et composants sous constitutifs.	<ul style="list-style-type: none"> - mise en évidence par un graphique des prestations intéressantes d'un point de vue écologique » - outil simplifié dédié aux concepteurs permettant de reconnaître les matériaux et composants les moins impactants pour l'environnement - critères simplifiés sélectionnés en fonction de la famille de produits : ex pour les composants de sous toiture, (Eco- devis CAN 363), données d'énergie grise et « interprétations » (« écologiquement relativement intéressant » ou « écologiquement intéressant »...) 	<p>Consultation gratuite pour tous les modules</p> <p>www.ecodevis.ch/francais</p>

Tableau 2 : Synthèse des principaux outils simplifiés, donnant accès à des données « quantitatives » et « qualitatives », disponibles pour aider au choix de matériaux et composants de construction en fonction de leurs impacts environnementaux et sanitaires. [Building energy software tools directory, US Department of Energy], [MINERGIE, 2007].

Données qualitatives

Nom	Pays	Types de critères	échelle	Nb de matériaux / composants	Originalités	Accessibilité
Greenspec – National Green Specification	Grande Bretagne	Techniques et environnementaux : mention des résultats issus de BRE Eco-points et BRE « Environmental profile » ; mise en évidence de la correspondance des produits avec les critères simplifiés environnementaux	Matériaux et composants, systèmes constructifs	Plus de 1100 matériaux et composants de construction, les résultats d'analyses environnementales (résultats BRE ou correspondance critères simplifiés) ne sont pas tous disponibles.	<ul style="list-style-type: none"> - Guides « matériaux » disponibles par famille de matériaux / composants, avec les « + » et les «-» - guides conception, permettant de passer du matériau / composant au système constructif et au bâtiment : guide « low carbon house » disponible, feuille de calcul « waste costs » dédiée au calcul des économies générées sur le cycle de vie, par la mise en place d'une gestion des déchets de construction - guide « durabilité et analyse en coûts complets » : publication de quelques éléments relatifs à la durabilité technique des matériaux et composants de construction : à minima durée de vie estimée en phase conception et coûts initiaux. Lien avec la base de données en ligne « construction durability database » www.componentlife.com (guide payant) 	Gratuite, www.greenspec.co.uk
Ecospecifier	Australie	Techniques, économiques, environnementaux ; 6 familles de critères « environnementaux »	Matériaux, composants et systèmes constructifs	3200 matériaux , composants, technologies répertoriées, dans plus de 400 catégories	<ul style="list-style-type: none"> - 6 guides techniques disponibles, permettant d'approfondir les bénéfiques techniques des éco-solutions présentées - Etudes de cas pour 7 types de constructions disponibles - liens vers les principaux logiciels d'ACV disponibles, le questionnaire « <i>environmental performance datasheet</i> » permettant de réaliser les évaluations environnementales, liens vers outils de « green design », notamment GB Tool issu du « green building challenge » 	Payant, www.ecospecifier.org Mais accès gratuit à 5 % des informations disponibles sur les matériaux référencés, guides, études de cas, questionnaires
Material explorer	Pays Bas	Clé d'entrée « design » (fonctionnalité et esthétique) ; « typologie de matière », perception « sensorielle » et approche technique	Matériaux, composants	1500 matériaux et composants référencés, 30 000 architectes et designers membres, reliée à un « <i>knowledge center</i> » for material innovation »	<ul style="list-style-type: none"> - Outil spécifique pour les architectes et designers - 4 clés d'entrée « environnementales » pour sélectionner les éco-matériaux : par « matière » bois – pierres naturelles – autres naturels, par critère technique « renouvelable ou non », par « sourcing » ou localisation géographique (pays d'origine) - pas de guides conception disponibles mais nombreux articles venant compléter l'approche « matériaux » 	Gratuite, après inscription www.materialexplorer.com/background.html
Base de données des éco-matériaux	France	Clé d'entrée technique et environnementale : 5 critères principaux de qualification environnementale ; 18 critères complémentaires, dont 14 critères qualitatifs	Matériaux, composants, systèmes	100 matériaux et composants référencés	<ul style="list-style-type: none"> - Fiches de données environnementales et sanitaires (sur modèle FDES de la norme NF P01-010) venant compléter la fiche technique - Guides de choix « matériaux » (10 guides disponibles) et systèmes (7 catégories) - Guide de choix à venir « <i>Durabilité et analyse en coûts complets</i> » 	Gratuite, www.cd2e.com rubrique « base de données des éco-matériaux »

Tableau 3 : Synthèse des principaux outils simplifiés, donnant accès à des données « qualitatives », disponibles pour aider au choix de matériaux et composants de construction en fonction de leurs impacts environnementaux et sanitaires, [CD2E, 2005].

1.2.3 Approche monétaire du cycle de vie

Parmi les outils présentant des données quantitatives et qualitatives, seuls deux d'entre eux donnent accès à des données économiques précises et un début de réflexion en coûts complets en cycle de vie (life cycle costing - LCC) ; il s'agit de la base de données « *Minnesota building material database* » dans laquelle les coûts initiaux, les coûts de remplacement et les coûts totaux (life cycle cost) sont présentés mais pas toujours disponibles pour tous les produits au sein d'une même famille ; et de la base de données « *Greenspec, national greenspecification* » dans laquelle les coûts d'installation (premiers coûts – “first costs”), les coûts sur 60 ans (durée de vie fixée en fonction du code national pour la construction) ainsi que la durée de vie typique du matériau / composant, y sont présentés.

Ni l'une ni l'autre ne donne cependant accès à des indicateurs financiers agglomérés du type « temps de retour sur investissement » ou ratio « coûts / bénéfices » : le temps de retour sur investissement est le temps considéré comme nécessaire pour valoriser d'un point de vue monétaire les « économies » engendrées par une nouvelle solution par rapport à une solution considérée « de référence » [DGEMP, 2007]³¹. C'est aussi la durée en temps nécessaire pour récupérer à minima un investissement initial.

Ce temps de ROI s'inscrit dans une démarche plus globale appelée « coût global » ou « prise en considération de l'ensemble des coûts attribuables à toutes les étapes de la vie d'un produit ou service » [KATS & CAPITAL, 2003]³²



Figure 5 : Schéma de l'analyse en coûts complets sur le cycle de vie d'un produit / service. [BUYERZONE, 2006]¹.

Le coût global en tant qu'analyse est une notion générale qui s'applique à toutes les méthodes² tenant compte des dépenses initiales et des dépenses futures de même que des avantages (économies) d'un investissement pendant une période. [WIGNACOURT, 2004]³³

Ces méthodes diffèrent par leur application qui dépend de l'objet de l'investissement.

Appliqué au secteur du bâtiment, le calcul du coût global permet d'évaluer plusieurs solutions d'investissement (solutions techniques) à partir du coût initial et des dépenses d'exploitation et d'entretien pour la durée de vie économique du système constructif, de l'ouvrage [STERNER, 2002]³⁴.

Pour les nouveaux systèmes, le calcul du coût global permet le classement hiérarchique des solutions sur le plan de la conception, de l'emplacement et des matériaux, fondé sur le coût total de la durée de vie.

¹ BUYERZONE, www.buyerzone.com

² Ces méthodes comprennent: le coût global en tant que méthode de calcul, le rapport coûts/avantages ou investissements/économies, le taux de rendement interne et le délai de récupération.

Dans le cas de systèmes existants, cette méthode permet :

1. de comparer le coût global et les économies réalisées entre la réhabilitation d'un système constructif et/ou un réaménagement foncier, c'est-à-dire la démolition et la reconstruction du bâtiment

2. de déterminer dans quelle mesure un procédé ou un ensemble de procédés d'amélioration doit être appliqué de manière à réaliser le maximum d'économies, compte tenu de certaines contraintes budgétaires, du niveau de confort souhaité...

3. de déterminer quelle méthode doit être employée pour réhabiliter ou améliorer le système de façon à assurer le maximum d'économies à partir d'un niveau donné de dépenses d'investissement.

L'équation fondamentale du coût global peut s'écrire ainsi :

Coût global = coût initial¹ + coûts différés² (dépenses d'exploitation, d'entretien, de réparation ou de remplacement mais aussi les coûts liés à l'utilisation) – **valeur de récupération** (valeur d'un bien au terme de sa vie utile ou de la période d'étude) – **coût évités** (coûts « économisés » par rapport à une solution considérée « conventionnelle »).

Même si le raisonnement en coût global fait l'objet d'un intérêt croissant dans tous les secteurs de production de biens et services, notamment dans un contexte environnemental de plus en plus présent (raisonnement en cycle de vie), son utilisation et plus largement sa transposition dans le secteur de la construction étaient encore limitées dans les années 2000 [LARSSON & CLARK, 2000]³⁵.

En France, la traduction d'une étude américaine [KATS & CAPITAL, 2003]^{xxviii}, mise à disposition par un centre de ressources sur la qualité environnementale du bâti [SELLIER, 2004]³⁶, a permis de passer du concept à la pratique en donnant des chiffres précis d'investissements, d'économies réalisées et de temps de retour sur investissement pour des solutions (matériaux, composants, technologies) peu utilisées car considérées jusqu'alors comme trop chères et peu rentables.

L'analyse multicritères en cycle de vie est donc indispensable pour qualifier un matériau ou composant de construction sur toute sa durée de vie ; mais, compte tenu des nouveaux enjeux liés à la préservation de l'environnement, des ressources et de la qualité de la santé humaine, les cinq familles de critères permettant d'effectuer un choix entre plusieurs matériaux peuvent être positionnées au même rang : la durabilité fonctionnelle ou le choix esthétique deviennent ainsi aussi important que l'énergie grise dépensée en phase « process » ou le taux de matière recyclée valorisée.

¹ **Coût initial** : le coût initial comprend toutes les dépenses d'investissement ayant un rapport direct avec le projet, y compris le prix du terrain, le coût de la conception, du raccordement aux services et de la construction.

² **Coût différés** : les coûts différés peuvent être divisés en deux catégories - les dépenses énergétiques d'exploitation pour refroidir, chauffer et éclairer le bâtiment - les dépenses d'entretien comprenant les frais de réparation et de remplacement. On peut inclure dans les coûts d'entretien les coûts liés à l'utilisation (les frais qui découlent d'une modification de l'usage d'un bâtiment ou d'une modification ou de l'amélioration des installations mécaniques et électriques) de même que les coûts de modifications nécessaires pour que le bâtiment soit conforme aux nouveaux codes et normes.

1.2.4 Application aux PME-PMI : le management durable et son langage commun

Afin de rendre plus explicite¹ le développement durable auprès des acteurs des entreprises et organisations, notamment ceux² du secteur du bâtiment, une solution permet de l'intégrer dans leur conditionnement intellectuel et culturel ambiant : le passage du macro économique (la planète) au micro-économique (l'entreprise) en développant des outils de mesure compréhensibles par tous : par exemple, les indicateurs financiers de développement durable ou plutôt de management durable.

Le management durable peut se définir de façon simple et pragmatique : « résoudre et financer les problèmes du passé de telle sorte que les solutions du présent ne deviennent pas les problèmes du futur » [De BACKER, 2006]³⁷.

Le développement durable, considéré comme un ensemble de management économique, social et environnemental peut, en dernière analyse, avoir un socle unique d'indicateurs, celui des indicateurs financiers.

La transition du concept de développement durable vers le management durable aide à clarifier les idées des « opérationnels de la gestion », par l'utilisation d'indicateurs simples mais qui couvrent à la fois le domaine social, environnemental, économique de l'entreprise ou de l'organisation.

Ce passage peut se faire en adoptant les outils de management courants, que sont les outils de mesure financière et en adoptant une comptabilité environnementale qui a du mal à voir le jour car ce qui vient de la nature a du mal à être comptabilisé³.

Pour autant, comme l'habitat, les matières premières, la nourriture, l'énergie, l'eau, l'air, les déchets ont depuis toujours fait l'objet de troc, donc de comptabilité; le même constat s'impose aussi aux services sociaux.

Chaque décision opérée dans l'entreprise peut ainsi être rationalisée selon un concept simplificateur mais concret « coûts / bénéfices », y compris pour des retombées potentielles en termes d'impacts environnementaux et sociaux : l'évaluation permanente du passif environnemental, social et économique mais aussi des progrès réalisés, peut faire l'objet de ce bilan coûts / bénéfices.

En exemple, la remise en état d'une ancienne friche industrielle dédiée à la construction d'habitat et de bâtiments « publics » :

- le terrain : anciennement occupé par un concessionnaire automobile : garage de 1200 m², atelier d'emballage avec dalle béton de 3000 m² et buanderie industrielle de 3200 m²

¹ Au-delà du « plus explicite », il manque dans la définition du concept de développement durable proposée par le rapport Brundtland, 4 chaînons essentiels : la dimension temps, financière, technologique et idéologique. Un exemple, le chaînon technologique : le principe de précaution condamne toute recherche technologique qui ne puisse garantir de son caractère « inoffensif », d'où l'obligation pour le chercheur de démontrer l'innocuité des finalités de sa recherche avant de la commencer. La première application connue dans l'histoire de l'énergie solaire est celle qu'Archimède captait dans des miroirs concaves en vue d'incendier les vaisseaux romains qui assiégeaient la Sicile. Le même principe de miroirs concaves en Sicile est à la base de la première centrale solaire à l'échelle industrielle inventée en 1984 produisant 20 MW soit l'équivalent de 12500 Tep....

² Les acteurs du secteur du bâtiment sont regroupés en 5 familles : les utilisateurs finaux (en général étrangers au processus de construction sauf exception), la société civile (collectivité), le monde productif toutes corporations confondues (des études de faisabilité jusqu'à la démolition), la main d'œuvre (entreprises de construction), et les industriels qui assurent l'approvisionnement en matériaux et composants.

³ Pourquoi une OPEP de l'eau serait-elle plus absurde qu'une OPEP du pétrole ? Les pays producteurs de pétrole ne produisent, en fait, rien, se contentant de faire pomper par des multinationales étrangères les réserves dont ils ont la chance de disposer « naturellement » ; que se passerait-il si demain la Suisse se contentait de facturer le m³ d'eau qui coule de « ses » Alpes dans le Rhône ?

- valorisation du terrain en l'état : 1000 € du m²x7500 m² soit 7 500 000 €
- projet développé par la municipalité : inclusion du terrain dans le PLU 2005-2030, prévoyant : une zone mixte d'habitat, d'espaces verts, d'équipements sensibles...

Le raisonnement « rationalisation financière » à suivre pourrait être le suivant :

1. identifier des pollutions du passé,
2. identifier des utilisations, notamment « sensibles » prévues du terrain,
3. réaliser d'une étude détaillée des risques (EDR) pour identifier les mesures de remédiation à adopter,
4. définir les méthodes de dépollution,
5. estimer le coût de la dépollution,
6. estimer les terrains après dépollution,
7. réaliser un tableau de bord, un planning prévisionnel, l'immobilisation des terrains pendant les opérations de dépollution / remédiation.

	Valeur d'origine	Valeur des immobilisations	Remédiation	Valeur finale
Valeur	7 500 000 €	1 875 000 €	2 250 000 €	3 375 000 €
Actions décidées	Remédiation en vue du PLU « terrains sensibles »	Immobilisation des terrains pendant 5 ans	Evacuation des terres polluées en décharge classe I	Vente des terrains dépollués
Coûts / bénéfices	7 500 000 €	5 625 000 €	3 375 000 €	3 375 000 €
Bilan	7 500 000 €			3 375 000 €

Tableau 4 : Raisonnement coûts / bénéfices de la réhabilitation d'une friche industrielle.

Autre exemple d'application dans le secteur du bâtiment : le désamiantage de Bâtiments d'universités ; l'indicateur financier concerne :

- l'évaluation du coût de restauration
- l'amortissement du coût de restauration à long terme (20 ans)
- l'évaluation des coûts d'entretien, de maintenance et de fonctionnement
- l'évaluation des ressources d'exploitation
- l'évaluation des impacts économiques induits (tourisme, commerce, formation, éducation)
- le calcul des risques environnementaux (détérioration du milieu culturel et naturel, pollution...) et l'évaluation du coût de remédiation
- le calcul des risques sociaux induits et l'évaluation du coût des mesures correctives et préventives
- le tableau de bord prévisionnel à long terme

Le passage d'indicateurs macro-économiques à des indicateurs micro-économiques est très souvent possible pour le gestionnaire d'entreprise, de l'organisation ou d'une collectivité. L'entité de mesure sur laquelle sont fondés ces indicateurs devient alors l'unité monétaire (1 euro ou 1 dollar).

Le risque d'une comptabilisation de la réalité sociale, économique et environnementale est que celle-ci ne concerne que l'organisation elle-même, dans le confinement de son périmètre économique.

Réduire le fonctionnement d'une entreprise à ses performances financières à l'intérieur de son périmètre économique est un raisonnement opposé à l'esprit et à la pratique du management durable.

Mais à défaut d'exprimer les réalités techniques, sociales et environnementales en termes financiers, il est possible de tomber dans le piège d'une comptabilisation simpliste de sa propre « responsabilité », sans vision calculée des retombées d'impacts, par exemple sociaux et environnementaux.

En reprenant la maxime du développement durable « *think global, act local* » [BROWER, 1969]³⁸ (pensez au niveau global, agissez au niveau local), il est possible de présenter celle du management durable « *think local, count global* » (pensez localement, comptez globalement).

1.3 Le concept d'éco-matériaux : définitions et collèges de pensée

Le concept d'éco-matériaux / éco-produits utilisés dans le secteur de la programmation et de la construction de bâtiments dits à « *qualité environnementale* », fait l'objet d'approches, d'interprétations et donc de définitions différentes.

Au delà de la définition d'un éco-matériau comme étant un produit conçu à partir de ressources naturelles et renouvelables (tous les produits et matériaux de construction manufacturés sont issus de ressources « naturelles »), il est possible de présenter plusieurs définitions des éco-matériaux / éco-produits assez inhabituelles ou en tout cas peu connues.

Des recherches représentatives des différentes tendances au niveau international permettent de proposer cinq approches différentes, parfois complémentaires, du concept d'éco-matériau / éco-produit :

- 1- une approche très technique de type « ingénierale » ou industrielle basée sur les principes de l'éco-conception de produits et services,
- 2- une approche « négativiste » de non reconnaissance de la thématique, en tout cas dans le secteur de la construction,
- 3- une approche solidaire de type « économique » issue du mouvement des technologies alternatives et de la « green economy »,
- 4- une approche purement environnementaliste de type « écologiste »,
- 5- Et enfin, une approche de type « pragmatique », synthèse des approches 1-3-4, basée sur l'accessibilité d'une information pertinente mais vulgarisée pour la cible « client »

1.3.1 L'Approche ingénierale d'éco-conception

L'approche de l'éco-conception, déjà présentée précédemment (paragraphe 1.2.1) permet d'introduire les éco-produits ou éco-services comme la résultante de démarches scientifiques de caractérisation d'impacts (analyses en cycle de vie) et/ou de conception / re-conception de produits qui intègrent l'environnement le plus en amont possible (éco-design).

L'introduction de la terminologie « *eco-materials* », comme matériaux « *designed by environmental life cycle engineering and superior to conventional materials in term of LCA (Life Cycle Assessment)* » a été proposée pour la première fois au Japon au début des années 1990 [HALADA-YAMAMOTO, 2001]³⁹.

Cette définition emprunte largement aux termes anglo-saxons « *environmentally friendly materials* » et « *environmentally preferable materials* » des principes du cycle de vie des années 1970 et de l'écologie industrielle du début des années 1980.

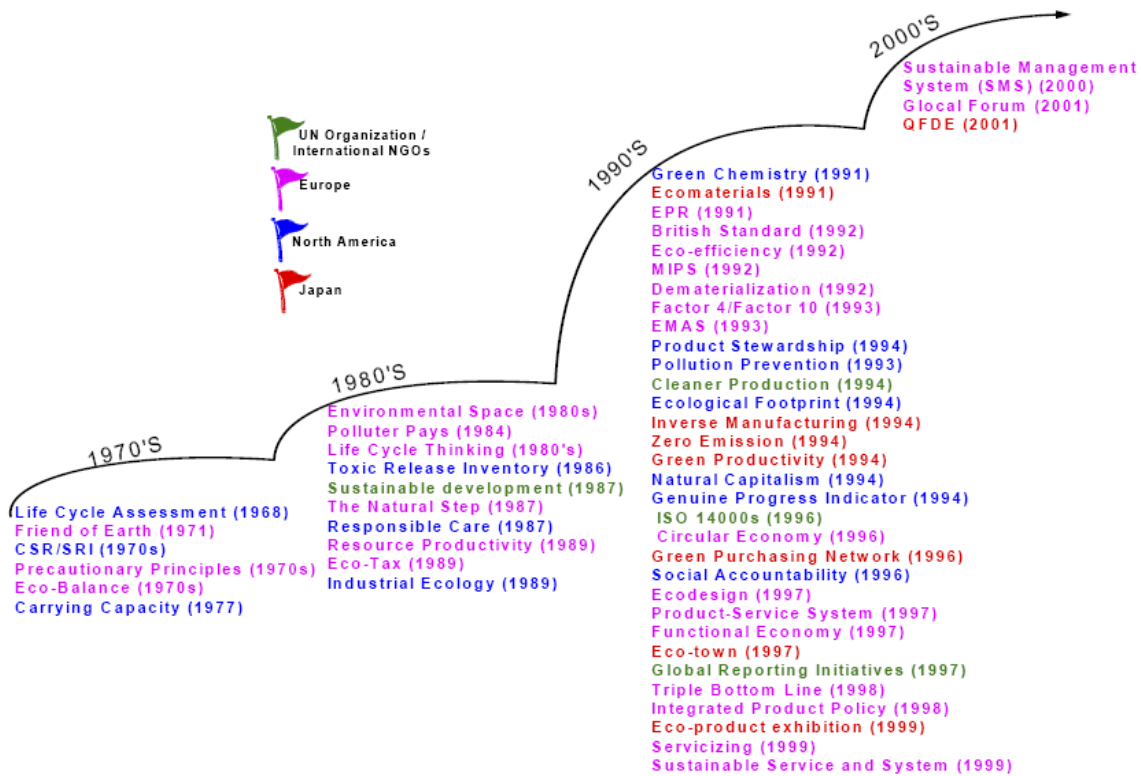


Figure 6 : « The sustainable development and eco-design : related methodologies and concepts proposed » [HALADA-YAMAMOTO, 2001].

La figure 6 montre que les problématiques d'analyse en cycle de vie et d'éco-bilan sont originaires du « life cycle thinking » émergent dans les années 1970 dans les pays d'Amérique du Nord ; dans le même temps, le principe de précaution fait son apparition en Europe, permettant de passer d'une philosophie curative de remédiation des problèmes constatés à une logique préventive d'anticipation des problèmes avant qu'ils ne se produisent.

Pendant que la transposition du « life cycle thinking » nord américain s'effectuait en Europe (1980), l'ère de l'écologie industrielle prenait son ampleur outre-atlantique, avec la caractérisation des émissions toxiques par inventaire pour les gros industriels (1986), obligation réglementaire.

La responsabilité des producteurs de problèmes environnementaux et sanitaires est ensuite définie et mise en pratique en Europe avec les éco-taxes (1989) et le fameux principe « pollueur- payeur » (1984).

Au niveau international, le concept de développement soutenable, traduit en France par « développement durable » fait son apparition (1987).

Les « éco-matériaux » apparaissent pour la première fois au Japon au tout début des années 1990 (1991) avant même les contraintes normatives, (British standards, EMAS, ISO) et des thèses d'éco-efficacité mêlant développement technique, économique, social et environnemental ; également avant les théories de décroissance (dématérialisation (1992) et facteur 4 (1993)).

La définition « industrielle » des éco-matériaux trouve ainsi ses fondements dans les théories d'éco-bilans / analyses en cycle de vie en Amérique du Nord mais aussi dans celles de responsabilité du type « pollueur payeur » en Europe, des années 1970-1980.

A partir de cette approche « industrielle », le concept d'éco-matériaux a été représenté en trois dimensions, comme le meilleur « compromis » entre des propriétés fonctionnelles, des avantages écologiques et des aspects socio-économiques.

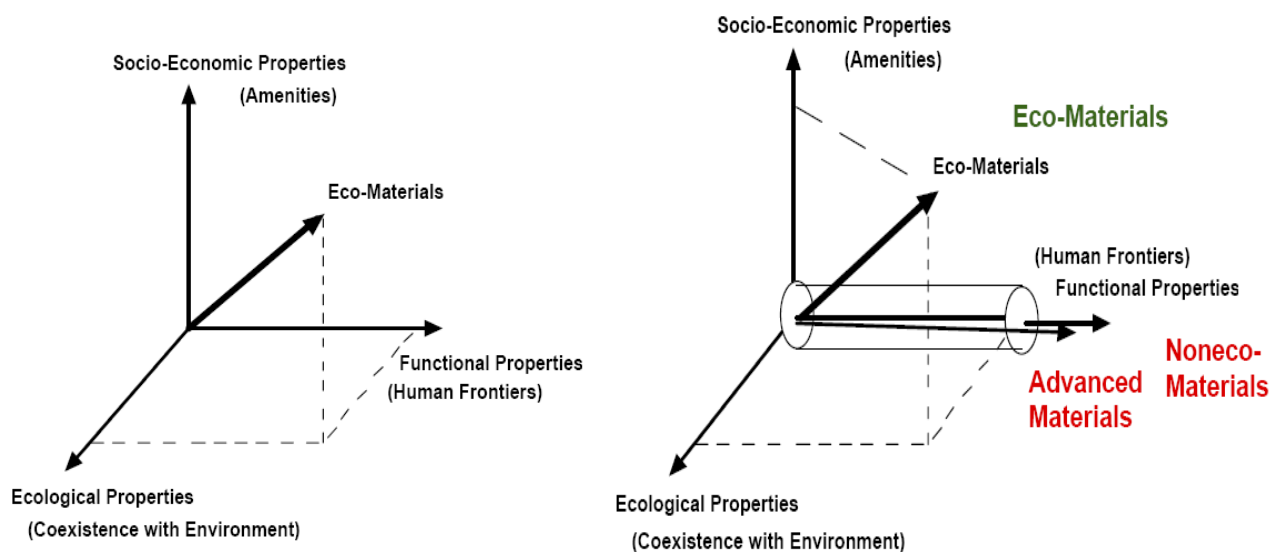


Figure 7 : « Les trois dimensions du concept d'éco-matériaux »
[HALADA-YAMAMOTO, 2001].

Cette représentation tri-dimensionnelle présente des propriétés fonctionnelles, socio-économiques et écologiques ; l'idée développée est qu'un développement technologique majeur qui ne tient aucunement compte des aspects socio-économiques et écologiques ne permet pas de caractériser à lui seul un matériau en tant qu'éco-matériau (advanced materials / non eco-matériaux), la résultante « éco » est bien le meilleur compromis entre les trois dimensions.

Les données qualitatives sont facilement descriptibles et caractérisables tandis que les données quantitatives sont plus difficiles et relèvent d'une méthode en cycle de vie – LCA. (voir logiciels d'analyse qualitative et quantitative, paragraphe 1.2.2.4)

Un autre modèle sur les éco-matériaux, relativement proche de cette représentation tri-dimensionnelle, a été présenté au Japon.

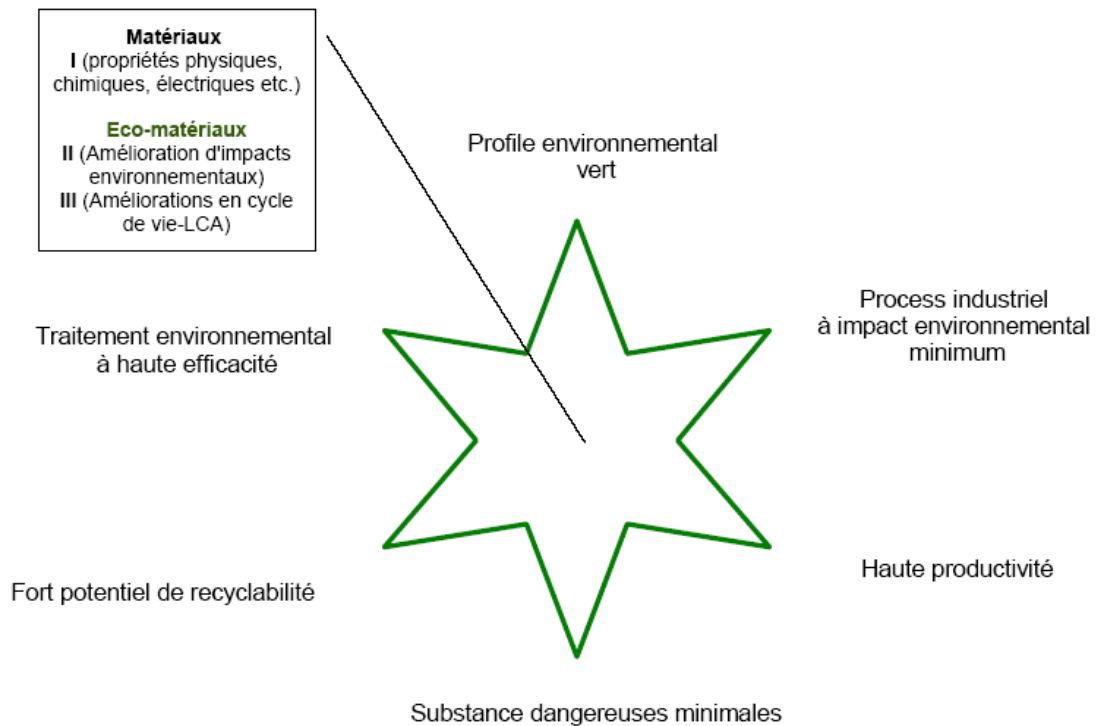


Figure 8 : Model conceptuel de présentation des éco-matériaux, [Japan Eco-Materials Forum, 2004].

Ce modèle conceptuel présente :

- des **pré-requis incontournables** (I) qui incluent l'optimisation des propriétés physiques et chimiques, « intrinsèques ».
- des **conditions nécessaires** (II) telles que l'amélioration significative des impacts environnementaux, sans impacts négatifs induits sur le cycle de vie global.
- une **disponibilité et un accès complet** aux données environnementales (III) sur le cycle de vie global.

Ces deux représentations conceptuelles de l'approche de la définition « ingénierale et industrielle » des éco-matériaux permettent de poser les bases de l'évaluation qualitative et quantitative en cycle de vie.

Parallèlement, les précurseurs japonais se sont intéressés à une méthodologie d'évaluation des impacts environnementaux et sanitaires par comptabilité environnementale, avec attribution d'éco-points.

Cette approche est particulièrement novatrice car elle permet, au moyen de 12 indicateurs triés, de jauger et d'évaluer les matériaux et composants, en vue d'une utilisation « éco » directement par les consommateurs finaux : architectes, « designers », prescripteurs, concepteurs de produits...pas forcément spécialistes des analyses en cycle de vie.

Un logiciel d'évaluation « SAM » et ses indicateurs permettent d'effectuer cette comptabilité en s'appuyant sur un coefficient de calcul « α »¹, pouvant être représenté comme suit :

$$\ll \alpha \gg = \sum(\text{Eco-efficacité}) \times (\text{Masse des prélèvements de ressources}) / \text{Durée de Vie}$$

¹ $\alpha = (\text{consommation} / \text{utilisation} / \text{réparation}) \times (\text{ressources exhaustives} + \text{ressources recyclables} + \text{ressources énergétiques} + \text{Pollutions (air - eau - sol)} + \text{traitement des déchets}) / \text{durée de vie}$

On aboutit ainsi à une classification des éco-matériaux selon 4 classes, représentant chacune des valeurs limites maxi-mini d'éco-points :

Classe	MIII-points	Description
A	600-1000	Ce matériau peut être utilisé sur le long terme pour atteindre les objectifs de développement soutenable
B	400-599	Ce matériau peut être utilisé mais en portant une attention particulière à certains de ses impacts. Il devrait être remplacé par un matériau de classe A ou « dématérialisé » au plus vite, dans la mesure du possible
C	200-399	Ce matériau devrait être remplacé par un autre de classe B ou A
D	0-199	Ce matériau ne devrait pas être utilisé du tout

Tableau 5 : Grille de notation du modèle Japonais « SAM », traduit du modèle japonais, [Japan Eco-Materials Forum, 2004].

La particularité du modèle japonais, par rapport aux autres logiciels disponibles (voir paragraphe 1.2.2.4), est d'avoir introduit historiquement le concept même des éco-matériaux tout en proposant un modèle d'analyse en cycle de vie qualitatif et quantitatif permettant de comptabiliser en « éco-points » les impacts des critères analysés.

L'approche légitime d'emblée la terminologie « éco-matériaux » qui n'est donc pas sous jacente mais bien considérée comme un élément incontournable.

Un seul autre modèle présente d'emblée la terminologie « éco-matériaux », le Twin-model / Green Calc Néerlandais du NIBE¹, en poussant même jusqu'à une approche « monétaire » des impacts environnementaux, la méthode des « *Hidden environmental costs* »², ou méthode comparative des coûts cachés.

1.3.2 La non reconnaissance des éco-matériaux

En France, les éco-matériaux dans le secteur de la construction se caractérisent par une situation particulièrement ambiguë, conflictuelle et polémique.

Alors qu'au niveau européen et international, l'existence même d'éco-matériaux, tous secteurs confondus, présentant des caractéristiques environnementales³ et sanitaires⁴ supérieures à des matériaux dits « classiques » ou « conventionnels », est connue et reconnue par les acteurs du bâtiment (manufacturiers, bureaux d'études techniques, laboratoires de recherche et développement et utilisateurs finaux), sur le territoire hexagonal, le terme semble banni.

Les démarches, méthodologies et outils de l'éco-conception / eco-design existent pourtant (voir approche ingénierale paragraphe 1.3.1), notamment dans le secteur de la

¹ NIBE, disponible sur <http://www.nibe.org/html-uk/audits.htm>

² Méthode des coût cachés environnementaux, « Hidden Environmental Costs », disponible sur <http://www.greencalc.com/en-milieukosten.html>

³ Moindre prélèvement de ressources, faible contenu énergétique, matières premières renouvelables, recyclabilité en fin de vie...

⁴ Santé des prescripteurs, metteurs en oeuvre, utilisateurs

construction avec l'implication de grands groupes industriels dans les démarches de communication environnementale type Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires (FDES), créées et validées scientifiquement par l'Association Française de Normalisation (AFNOR) et le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB).

Les acteurs principaux du secteur des matériaux de la construction, l'Association des Industries des Produits de Construction (AIMCC)¹, le CSTB, l'AFNOR et l'Association pour la promotion de la Haute Qualité Environnementale (HQE^{®2}) dans la construction sont regroupés au sein d'un collège de pensée majoritaire qui ne reconnaît pas l'existence d'éco-préférences dans le secteur des matériaux et produits de construction [CONSIGNY, 2002]⁴⁰ ; le référentiel national de qualité environnemental dans la construction présente pourtant une cible dédiée au choix des matériaux de construction contribuant à un moindre impact environnemental et sanitaire global du bâtiment « cible n° 2 choix intégré des produits et procédés de construction ³ ».

Le référentiel HQE[®] présente pour chaque cible des niveaux d'exigence, indicateurs opérationnels et unités inspirés en grande partie des indicateurs utilisés dans les démarches d'analyses en cycle de vie ou d'éco-conception de produits: par exemple, la quantité de ressources naturelles non énergétiques consommées sur l'ensemble du cycle de vie des matériaux ou encore la part de matériaux vierges renouvelables.

La non reconnaissance de la terminologie « éco-matériaux » ne tient pas dans les méthodes, outils et critères disponibles pour analyser les matériaux et produits en cycle de vie mais dans l'approche d'évaluation des performances soutenue par le fondateur de la démarche HQE[®], l'association des industriels manufacturiers de matériaux de construction (AIMCC).

Dans une position ancienne réactualisée en avril 2006⁴, l'AIMCC et l'association HQE[®] présentent les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits comme des paramètres différents d'un produit à un autre, au même titre que les critères techniques, financiers ou économiques traditionnels.

Le choix des produits et matériaux de construction est ainsi essentiellement basé sur l'aptitude à l'usage, c'est à dire la capacité à remplir une fonction dans des conditions fixées préalablement, libre choix étant laissé au consommateur final de sélectionner lui-même des produits plus ou moins impactants.

Il appartient ainsi « aux gens de l'art » (les concepteurs, prescripteurs, utilisateurs...) de « *choisir les produits de construction dont les caractéristiques techniques, économiques, environnementales et sanitaires permettent, moyennant une mise en œuvre conforme aux règles de l'art ou aux prescriptions du fabricant, d'obtenir la qualité visée de l'ouvrage sur les plans technique, environnemental et sanitaire, dans le cadre d'un budget imparti.* » [Association HQE, 2007]⁵.

L'association prend également position contre la création de bases de données ou « listes noires » de bons ou mauvais produits, évalués scientifiquement en cycle de vie, selon un référentiel normatif reconnu ou non et/ou dont les impacts pourraient être comptabilisés monétairement : « *Il n'existe pas de liste de produits de construction « HQE[®] » et il serait*

1 AIMCC, disponible sur <http://www.aimcc.org/>

2 Association HQE, disponible sur <http://www.assohqe.org/>

3 Référentiel HQE disponible sur http://www.assohqe.org/documents_referentiels.php

4 Position AIMCC n°1-06, disponible sur <http://www.aimcc.org>

5 Le choix des produits de construction dans la démarche HQE, position du 06.11.07, disponible sur www.assohqe.org/documents_choix_des_produits.php

logique qu'il n'en existe jamais », rappelant qu'elle regroupe plus de 80 organisations professionnelles de fabricants de produits et d'équipements pour la construction qui représentent un chiffre d'affaires annuel de plus de 30 milliards € réalisé par près de 7000 entreprises et environ 210 000 personnes.

L'AFNOR et le CSTB ont travaillé quant à eux sur le référentiel normatif NF P 01-010 permettant aux fabricants fournisseurs de déclarer les impacts environnementaux et sanitaires de leurs produits et matériaux de construction sous un cadre et une méthodologie communs.

La commission de normalisation AFNOR P01E¹ et ses experts suivent la position AIMCC-Association HQE[®] : « *Le choix des produits de construction est un point fort de la démarche HQE[®], la qualité environnementale d'un produit ne pouvant s'apprécier réellement que par rapport à un projet et à sa place dans le projet* ».

Il s'agit ici de l'un des éléments clé de distinction entre les approches anglo-saxonnes de qualité environnementale dans la construction dites mixtes (produits et systèmes), et l'approche française dite « système ». Leurs caractéristiques seront présentées ultérieurement, notamment la place et le type de l'évaluation des produits et matériaux de construction dans les référentiels internationaux de type SMQE.

C'est ce qu'on considère en quelque sorte comme le « paradoxe français » : un système de déclaration des données environnementales et sanitaires des produits et matériaux de construction est mis en place et normalisé, sur base d'ACV, en admettant qu'il puisse exister des impacts différents d'un matériau ou d'un produit à l'autre qui méritent d'être évalués, mais on estime au final que seule la mise en oeuvre au sein d'un système constructif permet d'appréhender et de juger de la performance globale du matériau, en évitant toute comparaison de performances (listes noires) et en laissant libre choix aux consommateurs finaux de se fixer eux-mêmes les niveaux et donc d'effectuer des choix.

A l'occasion de l'une des dernières assises de la HQE[®], en 2006, un responsable de la division « développement durable » du CSTB déclarait que les FDES remplies par les industriels étaient « *perçues comme trop complexes pour permettre des comparaisons et proposer des variantes* »².

La simplification était ainsi à l'ordre du jour des programmes de travail sur 2007-2008 et passait par la mise au point de logiciels d'appréciation de l'impact majeur du matériau ou composant dans l'ouvrage : les caractéristiques environnementales et sanitaires seraient ainsi limitées à 4 ou 5 considérées comme « majeures » pour faciliter leur appropriation par les utilisateurs finaux.

Certains industriels ont travaillé d'ailleurs à la mise au point de « fiches système » concernant des parties d'ouvrage, permettant de valoriser l'apport individuel de chaque matériau ou composant, mais au sein d'un système constructif. Un logiciel « ELODIE » devant faciliter l'exploitation des FDES est prévu et devrait être disponible gratuitement en ligne sur internet³.

Des définitions des éco-matériaux pour le secteur de la construction sont tout de même diffusées au niveau national et portées par des organismes « influents » ou impliqués dans la construction durable :

¹ Commission de normalisation P01E, disponible sur <http://www.afnor.fr/construction.asp>

² Communiqué de presse de l'association HQE, disponible sur <http://www.actu-environnement.com/ae/news/1615.php4>

³ Logiciel Elodie, disponible sur www.cstb.fr/actualites/webzine/editions/mai-2007/elodie-pour-mesurer-l-impact-environnemental-des-batiments.html

- celle de l'ADEME (Agence pour la Maîtrise de l'Environnement et l'Energie) disponible sur l'innovathèque du CTBA¹ (Centre Technique du Bois et de l'Ameublement), qui évoque clairement les éco-matériaux : « *Tout matériau qui entraîne moins d'impacts sur l'environnement, tout au long de son cycle de vie et conserve ses performances lors de son utilisation. On comprend par impact toute dégradation de notre environnement, liée soit à l'utilisation de ressources ou de matières non renouvelables (pétrole, charbon, plastiques) soit en entraînant des rejets néfastes (déchets, pollution de l'air, de l'eau et des sols)* ».
- celle du programme de recherche « Agrice² » (Agriculture pour la Chimie et l'Energie) qui parle de « biomatériaux » : « *Les biomatériaux sont des matériaux composés à majorité de matières premières d'origine agricole dont les produits générés au cours de la dégradation, de la combustion ou du recyclage ne provoquent pas de dommages à l'environnement. Dans le débat actuel sur le développement durable, les biomatériaux peuvent jouer un rôle non négligeable, en termes de protection des ressources, d'optimisation du système de gestion des déchets et de création d'emplois notamment en milieu rural* ».
- celle de l'action collective « Entreprises et construction durable³ » pilotée par le cabinet en stratégies de développement durable « Utopies⁴ », qui regroupe 18 grandes entreprises françaises, dont le groupe Accord, Bouygues, Lafarge, Gaz de France et la SNCF. Les éco-matériaux sont présentés comme : « *Tout produit qui génère moins d'impacts sur l'environnement tout au long de son cycle de vie et qui conserve ses performances lors de son utilisation* ».
- au niveau européen, une plate forme technologique⁵ préconise le recours aux solutions alternatives aux matériaux conventionnels pour inscrire l'industrie du BTP dans la perspective du développement durable, ces matériaux « alternatifs » étant à chercher dans de nouvelles approches d'éco-conception [ESCADEILLAS, 2006]⁴¹.
- suite au Grenelle de l'environnement⁶, les conclusions du groupe de travail numéro 1 « lutter contre les changements climatiques et maîtriser l'énergie » proposent, outre d'engager un ambitieux programme de réhabilitation énergétique des logements existants pour réduire de 20 % leur consommation à 5 ans, de concevoir des modes de production innovants et efficaces en énergie dans l'industrie. Il est notamment préconisé d'incorporer des bio-produits basés sur la chimie du végétal. Le lien avec des matériaux « éco » se fait ici sur la matière première primaire ou secondaire.
- Enfin, un organe de développement de la Chambre de Commerce et d'Industrie de la Drôme – Néopolis- propose la première formation de technico-commercial « vendeur conseiller en éco-matériaux », pour former à la vente des conseillers spécialisés en matériaux écologiques (connaissance des produits, applications et mise en œuvre, conception d'argumentaires de vente dédiés) et répondre ainsi à la demande croissante en personnel qualifié émanant des nouveaux négoce spécialisés (il s'en crée en moyenne nationale 1 tous les 4 mois en France en 2007-2008. [CD2E, 2007]⁴²

¹ Innovathèque, disponible sur <http://www.innovatheque.fr>

² Agrice, disponible sur http://www.ademe.fr/partenaires/agrice/htdocs/action_biomat.htm

³ Entreprises et construction durable, disponible sur <http://www.constructiondurable.com>

⁴ Utopies, disponible sur <http://www.utopies.com/indexhtml.htm>

⁵ Plate forme technologique européenne de la construction www.ectp.org

⁶ Grenelle de l'environnement, synthèse des propositions du groupe de travail n°1 voir www.legrenelle-environnement.fr/grenelle-environnement/spip.php?article172

Les manufacturiers de produits et matériaux de construction, regroupés au sein de l'AIMCC, ne reconnaissent ainsi pas ou peu l'existence d'éco-préférences tandis que leurs partenaires de recherche et de développement historiques affichent la terminologie. Une marge de progrès existe donc.

Un autre collège de pensée, minoritaire celui-ci, regroupant notamment des architectes « libres penseurs » issus des courants de la « baubiologie » (bio-construction) des années 1970, reconnaît et défend quant à lui l'existence de matériaux et produits meilleurs que d'autres d'un point de vue environnemental et sanitaires, en les qualifiant de « bio-produits » ou « produits sains », « écologiques » ou encore « éco-biologiques »

Il s'agit ici de la troisième catégorie de définition, la définition « écologique »

1.3.3 L'approche écologiste

A l'approche ingénierale de type Analyse en Cycle de Vie - LCA (Life Cycle Analysis) et aux définitions scientifiques et industrielles des éco-matériaux succède l'approche purement environnementaliste dite « écologique » des produits et matériaux de construction.

Quel qu'il soit, un matériau ou composant de construction est toujours constitué de matière première, primaire (première extraction, première utilisation) ou secondaire (recyclage, ré-utilisation).

Historiquement, les typologies de constructions ont toujours reflété le type et les spécificités des matières disponibles localement, offertes par le milieu naturel. C'est d'ailleurs ce qui a fait jusqu'au milieu du siècle dernier, l'originalité architecturale du patrimoine bâti de chaque région Française.

Le Plan Marshall des années 1950, contribua ensuite à l'uniformité et la standardisation reproductible, à bas coûts : unités de production de blocs béton à base granulaire, concentration mal pensée de l'habitat...

D'un point de vue « process », le meilleur des éco-matériaux serait celui valorisant une matière première locale non transformée (ou la moins possible) n'ayant subi presque aucune transformation par l'homme.

Un historique [ZIJLSTRA, 2005]⁴³ de l'usage de matériaux et composants très anciens, considérés comme « biologiques » ou « écologiques » permet de voyager de la préhistoire jusqu'à nos jours, en s'appuyant sur deux exemples comparés en parallèle, le bois et la pierre.

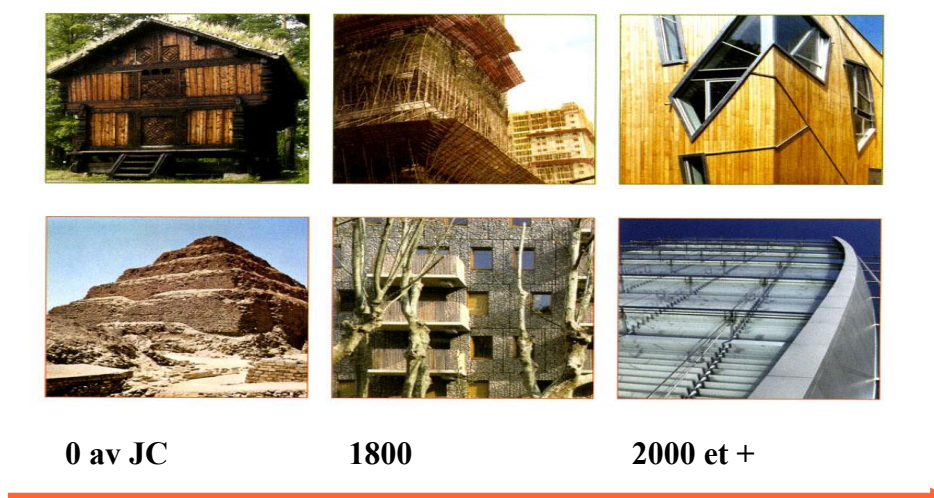


Figure 9 : Evolution de l'usage des matériaux bois / pierre dans le temps,

[ZIJLSTRA, 2005].

Le bois, éco-matériau par excellence, puisqu'il a la particularité de se renouveler en permanence, de manière théoriquement inépuisable, est un des matériaux de construction parmi les plus anciens et néanmoins toujours d'actualité. Bénéficiant d'un excellent rapport poids/résistance, son élasticité et sa stabilité dimensionnelle sont constantes, qualités valables pour presque toutes les sortes de bois.

Les roches naturelles sont, quant à elles, en général issues de mélanges de différents matériaux agglomérés plus ou moins fortement dans la masse pierreuse. Une grande partie de ces minéraux contient de la silice ; les roches ont toutes une histoire particulière qui détermine leurs qualités actuelles.

Nous donnons ci après les valeurs d'indicateurs [KBOB-Ecobau, 2007]⁴⁴ représentatifs des tendances environnementales actuelles : le bilan carbone agrégé (en kilogramme de CO₂ eq par kilogramme de matériau) et la dépense énergétique (énergie grise en Kwh/kg de matériau) pour fabriquer le matériau.

Matériau	Dépense énergétique (énergie grise) de production	Emissions carbone équivalent (fabrication)	Bilan global	Type de ressource
Bois massif (épicéa, sapin, mélèze, séché à l'air)	2,21 MJ / kg	0,109 kg CO ₂ eq/kg	Si replanté, -0,5 kg CO ₂ eq /kg	Renouvelable (si replanté)
Roche (grès)	1,34 MJ / kg	0,13 kg CO ₂ eq/kg	0,13 kg CO ₂ eq/kg	Non renouvelable (roche primaire)
Bloc terre cuite	2,62 MJ / kg	0,236 kg CO ₂ eq/kg	0,236 kg CO ₂ eq/kg	Non renouvelable (dépôts sédimentaires)
Bloc Béton (base de comparaison)	0,798 MJ / kg	0,12 kg CO ₂ eq/kg	0,12 kg CO ₂ eq/kg	Non renouvelable

Tableau 6 : Dépense énergétique et bilan carbone simplifié en phase « process », pour 4 types de matériaux de construction, [KBOB, 2007].

Le bois massif séché à l'air (sans dépense énergétique d'origine anthropique) consomme d'avantage en production qu'un bloc béton (granulats et ciment comprimés à l'électricité), ou qu'une roche naturelle (type grès) ; par contre, si le bois est replanté, il stocke de nouveau du dioxyde de carbone ce qui rend au final son bilan carbone global négatif, c'est-à-dire que le bois stocke d'avantage de Co₂ qu'il n'en émet pour être transformé en matériau de construction « brut ».

Ce raisonnement simplifié montre qu'il faut comparer ce qui est comparable et surtout baser son raisonnement sur des données fiables issues de moyennes par familles de produits.

Périodes	Bois	Pierre
120 000 y bc	Les matériaux « naturels » ont été les premiers à être utilisés par les peuplades primitives – chasseurs – cueilleurs, chaque culture concevant, en fonction de sa localisation géographique, sa propre logique architecturale à partir des ressources « locales », bois, peaux, ou encore glace.	La pierre est le matériau de construction le plus durable. Tous les monuments historiques comportent une partie importante de pierre et résiste parfaitement aux outrages du temps.
5 000 y bc	Les romains souhaitaient introduire massivement la construction en pierres dans les pays nordiques mais la construction en bois était la plus utilisée pour des raisons techniques pratiques et de disponibilité immédiate.	La pierre a fasciné l'homme depuis l'antiquité. L'ambition et le pouvoir des bâtisseurs égyptiens conduisent à l'utilisation du granit dans les premières pyramides, en dépit des difficultés rencontrées à l'utilisation. La pierre a toujours été présente dans les constructions des grandes puissances : les palais égyptiens ou perses, les constructions romaines, les églises gothiques ou les châteaux médiévaux n'auraient pas pu être édifiés avec un autre matériau.
0 ad	L'accroissement de la densité urbaine dans certaines grandes villes favorisa encore l'augmentation de l'utilisation du bois : les bâtiments étaient construits plus près les uns des autres par soucis d'économie de surfaces, avec une seule façade, étroites mais hautes. Sans surprises, cela conduisit de nombreux centres villes à haute densité, construits avec des matériaux inflammables, à l'incendie.	
1 300 ad	Au fur et à mesure que les réglementations de la construction devenaient de plus en plus strictes, le bois est remplacé par la pierre. Le bois restant utilisé pour la construction de bâtiments et de navires dépendait bien sûr des ressources et l'utilisation intensive de certaines variétés de bois « dures » et résistantes commencent à se raréfier. Le bois continue à être utilisé pour certains types de construction car irremplaçable. Il est également un signe extérieur de richesse, donnant de la valeur aux façades des constructions (Allemagne, Angleterre, Belgique).	
1800	L'ère industrielle induit l'utilisation du bois à une toute autre échelle. Les structures en bois multi-composantes commencent à être utilisées, entraînant un meilleur usage économique.	Les progrès considérables accomplis dans les machines d'extraction et l'introduction de nouveaux matériaux de construction, résistants et contrôlables, ont quelque peu modifié le statut de la pierre. Les larges et lourds blocks confiant auparavant un aspect de rigidité au bâtiment sont remplacés par des coupes fines de parement. Cette séparation de fonctions a rendu l'utilisation de pierre plus critique. Les trois points critiques de la pierre (peu résistante aux chocs intempéstifs, sensible aux tensions et comme tout produit naturel potentiellement imparfait) induisent certains risques qui peuvent être évités avec l'utilisation de béton renforcé ou de l'acier, d'ailleurs moins chers que la pierre. 1 500 types différents de pierre sont disponibles, le type de roche d'extraction (roches magmatiques, sédimentaires ou métamorphiques) fait toute la différence.
2000 et +	Quel est le futur du bois dans la construction ? Le bois est durable (au sens « sustainable development ») et renouvelable. Il est cultivé dans une logique de moindre prélèvement des ressources dans les forêts primaires ou sensibles et le bois continuera à jouer une place importante en tant que matériau de construction, en gros oeuvre ou second oeuvre. Les inconvénients du bois peuvent désormais, grâce aux progrès technologiques, être surmontés : on peut le modifier structurellement par changement de pression, l'utiliser en tant que matériau composite et combiné avec du plastique recyclé (OSB). Le futur de ce « vieux » matériau de construction est désormais tout tracé et on lui donne une nouvelle dimension : l'extrusion pour les profilés, la pression tri-dimensionnelle, l'incorporation dans les lamellés, le séchage complet (réification) pour améliorer sa résistance etc...	Le changement de fonction, d'une roche solide, massive, lourde, structurelle à une roche fine de parement pouvant être élevée comme du papier peint a provoqué une crise identitaire de la roche qui est désormais assimilée à une tranche pouvant être coupée, translucide ou décorative. La pierre demeure certes intacte en tant que matériau, un matériau naturel avec sa propre personnalité, ses propres caractéristiques et comportements. Il ne fait aucun doute que la pierre continuera d'être utilisée dans le futur, ne serait-ce que pour des raisons esthétiques.

Tableau 7 : Synthèse de l'historique comparatif de l'usage des matériaux bois et pierre. [ZIJLSTRA, 2005].

Bois et pierre, deux matériaux considérés comme très écologiques de part leurs faibles impacts sur l'environnement et la santé, matériaux d'hier, d'aujourd'hui et de demain comme présenté précédemment.

Mais les « Eco-matériaux » sont-ils des matériaux écologiques ?

L'étymologie du mot « écologie », formé de deux racines grecques, rappelle que « éco » correspond au mot « oikos » qui signifie « maison » et « logie » correspond au mot « logos » qui signifie le discours, la parole, la science. « Ecologie » signifie donc le discours, la science de la maison.

Deux approches de la construction « écologique » existent [KUR, 1999]⁴⁵ : une approche libre, artisanale et une approche plus contraignante (en tout cas définie comme telle) dite industrielle.

La première est plutôt orientée vers l'auto-construction, libre de contraintes réglementaires, normatives ou d'assurances.

Elle prône l'utilisation de matériaux artisanaux les moins industrialisés possibles, disponibles localement et transformés au moment de la mise en oeuvre : terre crue, paille, résidus de récoltes, bois, pierre.

La seconde cherche à s'insérer dans le tissu économique du bâtiment existant en proposant des matériaux comparables en qualité et en mise en oeuvre à ceux qui sont proposés sur le marché en vue de rendre la construction « écologique » accessible au plus grand nombre. On parle de matériaux « écologiques » ayant subi une semi-transformation ou transformation, donc manufacturés ou industriels.

La première catégorie est liée à la tradition : les matériaux sont par nature dédiés à un habitat considéré comme plus sain et « écologique ». Mais leur mise en oeuvre demande une connaissance technique qui n'est plus ou peu pratiquée couramment, en comparaison au marché global de la construction (la plus grande partie du secteur du bâtiment travaille actuellement avec des matériaux dits industriels).

Matériaux écologiques, naturels, sains, artisanaux ou industriels...une typologie peut être proposée en croisant les différentes clés d'entrée :

	Matériaux naturels <i>green materials</i>	Matériaux écologiques <i>eco-friendly materials</i>	Matériaux sains <i>healthy materials</i>
Définitions proposées	Issus de composants trouvés dans la nature comme les végétaux, la laine ou les minéraux. Ils ne contiennent pas de produits de synthèse.	Matériaux dont l'impact sur l'environnement à la production, à l'utilisation ou au recyclage est faible. On y classe tous les produits dont la production n'est pas coûteuse en énergie et qui sont biodégradables.	Ceux qui ne nuisent pas à la santé de l'individu, naturels, synthétiques, écologiques ou non. Un matériau peut être sain jusqu'au jour où on découvre sa toxicité (cf amiante).
Matériaux artisanaux <i>hand-made materials</i>	X	X	X
Matériaux industriels <i>manufactured materials</i>		X	X

Tableau 8 : Proposition de typologie croisée pour la définition de matériaux de construction « écologiques ».

Parmi les nombreuses définitions disponibles pour caractériser les matériaux « écologiques » plus respectueux de l'environnement et de la santé des utilisateurs, les plus connues sont les suivantes :

- celle du réseau Terres vivantes¹ : « la qualification de « matériaux écologiques » intègre l'impact à la fois sur la santé et sur l'environnement. Elle est définie par les critères suivants : matériaux issus de ressources renouvelables, peu énergivores, indemnes d'émanation toxique, durables, recyclables et ne générant pas de déchets toxiques en fin de vie ».

- celle d'un architecte géobiologiste² de l'association suisse d'éco-biologie : « les matériaux éco-biologiques sont sains car ils ne portent pas atteinte à la santé et au bien-être, sont écologiques car recyclés et / ou recyclables, sont naturels car renouvelables et / ou biodégradables, sont économiques car de production locale et produisant peu de déchets et sont perméables à la vapeur d'eau et aux énergies naturelles ».

C'est finalement de la « Baubiologie » (de l'allemand « Bau » maison – habitat et du grec « bios » vie – force de vie liée à la nature et « logos » énergie – matérialisation - santé) que nous viennent les définitions les plus « écologiquement complètes » des produits et matériaux de construction.

La baubiologie désigne « l'enseignement global pour réaliser des bâtiments et des aménagements écologiques et biologiques en mettant en oeuvre les connaissances et techniques adéquates » [SCHNEIDER, 1969].

Parmi les 25 règles de bases pour construire un habitat sain selon la Baubiologie (2005), 6 s'intéressent plus particulièrement aux matériaux et produits :

- des matériaux de construction naturels et purs,
- une régulation naturelle de l'humidité de l'air intérieur par l'utilisation de matériaux compensant l'humidité,
- l'utilisation de matériaux de construction à faible radioactivité,
- l'absence de conséquence négative sur l'environnement ,
- la minimalisation de la consommation d'énergie avec une large utilisation de sources d'énergie renouvelable,
- des matériaux de construction de préférence issus de la région et évitant l'exploitation inconsidérée de matières premières rares et dangereuses.

La Baubiologie³ et ses principes sont très présents au niveau international depuis les années 1970, un institut français⁴ s'est d'ailleurs créé à Strasbourg en 2006 en lien avec l'institut allemand.

Ne retenir qu'une seule définition « écologique » des éco-préférences dans le secteur des matériaux de construction semble difficile.

Les courant les plus « écologistes » et puristes tendent vers les matériaux naturels, écologiques et sains dits artisanaux, tandis que les « bourgeois bohèmes » plus pragmatiques privilégient les matériaux écologiques et sains dits industriels apportant des garanties techniques vérifiées.

¹ Terres vivantes, disponible sur <http://terrevivante.org/pdf/FR%20matériaux%20écologiques.pdf>

² Stéphane Cardineaux, Génie de lieu, disponible sur http://www.geniedulieu.ch/article.php3?id_article=37

³ IBN, en Allemagne disponible sur <http://www.baubiologie.de>

⁴ Institut Français de Baubiologie, disponible sur <http://www.baubiologie.fr>

1.3.4 Les apports solidaires de la « green economy »

En seulement un demi-siècle, nous sommes passés d'une économie « locale » des matériaux de construction, basée sur l'extraction de ressources disponibles et transformées à proximité des chantiers, à un système « global » consistant à importer, parfois sur des distances très importantes bien supérieures aux zones de chalandise conventionnelles, des matériaux et composants fabriqués ailleurs.

Il s'agit du même phénomène de « globalisation » de l'économie mondiale bien connu dans d'autres secteurs de production, considéré par beaucoup comme inhibiteur de valeur ajoutée locale.

En France, cette transformation des pratiques de sourcing en matériaux et produits de construction s'est opérée à l'occasion du plan « Marshall » (plan d'aide américaine à la reconstruction de l'Europe, annoncé à Harvard le 5 juin 1947) dont les fonds étaient répartis par l'OECE (Organisation Européenne de Coopération Economique), avec comme philosophie le redressement du pays après l'occupation Allemande : pour le secteur agricole, le défi était de rendre la France autosuffisante d'un point de vue alimentaire ; pour le secteur du bâtiment, il fallait reconstruire et reloger dans l'urgence.

La France est le pays européen qui a reçu le plus d'aides directes du Plan Marshall avec près de 2 Milliards 713 Millions \$\$, dont plus de 92 % en dons directs (comparativement à une moyenne de 50 % de dons pour les 16 autres pays européens...)

On importa ainsi massivement tout l'outillage agricole moderne peu connu jusqu'alors (les tracteurs diesel Mc Cormick par exemple) et de la même manière des techniques de construction industrialisées fondées sur la préfabrication, la raréfaction de la main d'oeuvre qualifiée dans le BTP aidant.

Les propositions d'avant garde des architectes et des ingénieurs américains reposent essentiellement sur les avantages du béton armé, ayant des retombées indigentes dans le cadre du logement social (demande élevée et contraintes budgétaires prépondérantes). Dans le logement dit « pavillonnaire », c'est l'apogée de l'aggloméré creux de ciment, le parpaing.

Les trente glorieuses suivantes voient ainsi la construction de millions de logements nouveaux, dans lesquels toute prise en compte des principes bioclimatiques est généralement absente (le concept d'isolation intérieure par exemple).

La valeur ajoutée créée par les activités locales de production de produits et matériaux de construction est désormais délocalisée au niveau de plates formes et centres industriels ou la productivité de masse concentre le processus de création de valeur (ex le plâtre artisanal coulé ou moulé et la plaque de plâtre prête à poser).

Ces pratiques permettent de répondre rapidement à une demande qui s'exprime soudainement en masse, en créant de l'emploi directement sur le site de production industriel mais engendre d'autres problèmes au niveau social, économique et environnemental : nombre d'emplois générés par une filière, moindre formation aux pratiques anciennes plus valorisantes car plus proches de la matière, émissions de gaz à effet de serre et coût énergétique global lié au transport des matériaux sur de longues distances, etc..

Le marché a aussi sa part de responsabilités : demande croissante poussant l'offre, impact économique de la « supply chain » (quant le bâtiment va, tout va..), délais tendus, enveloppes budgétaires restreintes.

Parallèlement, dans les pays sous-industrialisés, ex-communistes, en voie de développement ou émergents en cours, les mêmes besoins en construction de logements sont présents (voire souvent bien supérieurs à ceux des pays dits industrialisés) mais la construction, reconstruction ou les actions de développement économique dans ces pays sont beaucoup plus ardues du simple fait de l'absence d'infrastructures physiques significatives (canaux, ports, réseaux ferrés, routes...) et de qualification technique de la population, ou à une échelle complètement différente.

Les progrès, notamment technologiques, réalisés dans le secteur de la construction (mise en oeuvre, production de matériaux de construction etc..) ont contribué à des améliorations techniques de type performantielles ou fonctionnelles, d'aptitude à l'usage ; par exemple dans le domaine de l'isolation (au début des années 1970 en France), avec une réduction des consommations énergétiques et donc de l'impact environnemental global du secteur de la construction.

Mais leur essor s'est également accompagné d'effets directs ou indirects négatifs qui ont provoqué des « retournements de situation », sociaux, économiques ou environnementaux mais aussi humains et sanitaires : en l'an 300 avant notre ère, les premières briques en terre cuite apparaissent en Mésopotamie, en 2006, plus d'un milliard de personnes dans le monde vivaient sans logement adéquat. Les Romains construisaient des aqueducs et installaient des tuyaux qui amenaient l'eau directement dans les maisons des riches citoyens ; en 2006, 1,1 milliard de personnes n'ont pas accès à l'eau potable !

Notre époque actuelle se caractériserait avant tout ainsi non pas par « l'intelligence et le savoir » [JOURDAN-MIRENOVICZ, 2006]⁴⁶, dont la matière première serait « les réseaux de neurones des laboratoires et centres de recherche et développement en Europe, Amérique du Nord, au Japon et dans certaines pays émergents comme le Brésil, la Chine et l'Inde », mais par une « ignorance coupable » et « un manque de vision » qui conduisent l'humanité à ne pas se saisir du défi n° 1 pour la population mondiale : vivre et s'épanouir sans dilapider ce qui lui reste de ressources sur terre.

Quel est, dès lors, le sens à donner à l'essor des technologies dans le monde? notamment les technologies de production / fabrication de matériaux de construction destinés à l'habitat ?

Cette question met en perspective les déséquilibres que le développement dominant instaure partout où il exerce son influence.

D'autres solutions existent pourtant comme, par exemple, le développement des technologies dites « alternatives »

L'idée de « technologies intermédiaires » ou « technologies appropriées », née dans les années 1960 de l'économiste Allemand Ernst Friedrich Schumacher dans son livre « Small is beautiful, une étude de l'économie comme si les gens comptaient » [SCHUMACHER, 1973]⁴⁷, est destinée aux pays pauvres en capital mais riches en main d'oeuvre, pour leur permettre d'améliorer leurs pratiques en leur apportant des solutions peu coûteuses (low cost), simples (low tech) et fondées le plus possible sur des matériaux locaux, dans les domaines de l'agriculture, de l'alimentation, de l'habitat, de l'eau et de la santé.

Schumacher part du constat que l'aide au développement fondée sur le principe de transfert de technologies modernes intensives en capital et orientées vers la production de masse, est inappropriée pour les habitants des pays en voie de développement...

La crise pétrolière et écologique des années 1970 donne à cette idée toute sa pertinence, également dans les pays riches.

Cette idée s'est très vite avérée être un élément de réponse au problème non résolu et global de la production dans les pays riches : l'épuisement des ressources limitées non renouvelables comme les énergies fossiles ou certaines ressources primaires¹, le dépassement des capacités de régénération des écosystèmes soumis aux agressions permanentes du système industriel et le minage de la substance même de la nature humaine, incapable de « *s'épanouir par la seule prospérité matérielle* ».

Ce développement « tourné vers la vie intérieure et une réorientation des technologies » rencontre un puissant écho dans les milieux tiers-mondialiste et écologistes des années 1970.

Différents centres de technologies appropriées dédiés au secteur de la construction, voient le jour dans les pays anglo-saxons, en Europe (Suisse, Danemark) et ailleurs dans le monde (Argentine, Afrique, Inde).

Ils ont jusqu'à la fin des années 1990 poursuivi leurs chemins dans la discrétion, attendant que l'ère du « no limits » s'éclipse un peu, aidé par les réalités économiques contemporaines (fin du pétrole et du gaz naturel abondant et bon marché par exemple). Une centaine d'organismes dédiés à la construction « économiquement et écologiquement viable » sont recensés dans le monde.

Ils déclinent tous une définition de la construction à « qualité environnementale » qui est un compromis entre moindres impacts environnementaux et efficacité économique, visant une application de masse.

L'approche économique est ici indissociable de l'approche environnementale, avec la création de modèles de type « économie de marché » mais à l'échelon local, avec des conditions d'accès aux produits finis (construction et/ ou matériaux) acceptables par les consommateurs finaux (populations autochtones).

L'idée défendue est de construire durablement, en impactant peu l'environnement tout en assurant une juste répartition de la création de richesses sur une chaîne de valeur économique.

Ces thèses sont proches des principes des modèles d'économie solidaire, avec une application au secteur de la construction.

L'approche écologique développée au paragraphe 1.3 est ainsi élargie aux réalités économiques auxquelles sont confrontées les populations des pays en voie de développement (et, finalement par retournement des choses, également celles de nos pays dits « industrialisés »).

Parmi les groupements considérés comme les plus importants ou enregistrant les résultats les plus significatifs dans leurs domaines d'actions respectifs, on trouve :

- le réseau Building Advisory Service and Information Network (BASIN)² créé en 1988 par trois associations européennes : Swiss Center for Development Cooperation in Technology

¹ Une nuance doit être apportée quant à la qualification des « ressources primaires non renouvelables » : elles sont considérées comme « renouvelables » par l'OCDE ou les instances mondiales en charge des thématiques de développement durable, quand leur disponibilité immédiate à moyen terme est avérée importante (exemple, l'argile), ou que leur taux de renouvellement est suffisamment court pour être considéré faiblement impactant sur l'environnement (exemple la pierre ponce d'origine volcanique).

² BASIN, disponible sur <http://80.237.211.43/basin/basin/index.asp?A=2> ou www.basin.info

Management (SKAT)¹ en Suisse, Practical Actions (ex ITDG) et German Appropriate Technology Exchange (GATE/GTZ)² en Allemagne.

Au commencement, l'objectif de la coopération était d'apporter de l'information et du conseil sur les technologies de construction appropriées pour créer des liens entre les experts mondiaux et partager et apporter les savoir-faire aux demandeurs.

Avec l'élargissement du réseau aux partenaires des pays en voie de développement (9 membres experts internationaux dont 5 dans les pays en voie de développement), BASIN a du élargir son offre de service apportant en plus du consulting lié au transfert technologique, de l'aide à la planification, au financement et un soutien aux programmes locaux portés par les administrations ou ONG.

BASIN aide aux transferts de technologies dans le secteur de la construction dans les pays partenaires, organise des conférences et des ateliers de travail et apporte un soutien très important aux petites et moyennes entreprises / business, également dans le secteur de la R&D. Les trois organisations membres les plus importantes de BASIN sont le centre international de la construction en terre CRATerre-EAG³, laboratoire de recherche spécialisé dans l'architecture de Terre basé à l'école d'architecture de Grenoble ; le GATE, centre allemand d'échange pour les technologies appropriées et le réseau ECOSUR⁴ au Nicaragua.

- le Building Materials and Technology Promotion Council (BMTPC)⁵ en Inde dont l'objectif est de développer et d'opérationnaliser une approche intégrée pour le développement technologique, le transfert et la promotion des investissements dans l'application de matériaux innovants, respectueux de l'environnement et économes en énergie.

- le Development Center for Appropriate Technology (DCAT)⁶ et le National Center for Appropriate Technology (NCAT)⁷ aux Etats Unis, qui assurent la promotion de compétences liées à la construction durable par des plans de formation / éducation et une stratégie relationnelle aux Etats Unis (NCAT et DCAT) et au niveau mondial (DCAT uniquement).

Ces organisations et réseaux de promotion de la construction « écologique et économiquement viable » sont caractérisés à minima par leur mission principale de transfert de technologies appropriées dans le domaine de la construction et des énergies renouvelables, pour les pays ou populations les plus pauvres.

Ils présentent également des solutions matériaux et techniques respectueuses de l'environnement, accessibles économiquement et créatrices de valeur ajoutée au niveau local, issues de transfert de technologies proches ou internationales, adaptées à des contextes particuliers.

Ils ont ensuite des spécificités d'actions et d'interventions souvent liées à leur histoire mais également aux caractéristiques de leurs zones d'intervention : populations, climat, ressources locales disponibles, économie, facteurs politiques.

Un tableau comparatif de toutes ces organisations permet de caractériser chaque « acteur » par : sa date de création, son pays d'origine (ou zone géographique), sa zone d'action (ou zone de chalandise) et enfin ses domaines d'intervention privilégiés, souvent liés aux compétences déployées et acquises depuis la date de création.

¹ SKAT, disponible sur <http://www.skat.ch>

² GATE, disponible sur www.gtz.de/en

³ CRA-Terre EAG, disponible sur <http://terre.grenoble.archi.fr/accueil.php>

⁴ Ecosur, disponible sur <http://www.english.ecosur.org>

⁵ BMTPC, disponible sur <http://www.bmtpc.org/index.htm>

⁶ DCAT, disponible sur <http://www.dcat.net/>

⁷ NCAT, disponible sur <http://www.ncat.org/>

Organisation	Date de création	Pays ou zone d'origine	Zone d'action	Domaines d'intervention « <i>sustainable and affordable housing</i> », mouvement des technologies appropriées										Web
				<i>d'après estimations sur rapports annuels d'activités disponibles sur internet</i>										
				A	B	C	D	E	F	G	H	I	Spécificité	
				Evaluation des ressources locales	Production de matériaux locaux	Diffusion de l'information	Formation aux techniques traditionnelles	Conception - architecturale	Management de projets	Dlpt R&D	Ateliers et conférences	Soutien financier		
BASIN	1988	Europe	Intal	X		X			X	X			Networking et action directe sur les règlements et certifications	www.basin.info
GATE/GTZ	1977	Allemagne	Intal	X	X	X	X	X	X		X	X	Construction des murs sauf construction en terre	www.gtz.de/en/index.htm
SKAT	1978	Suisse	Intal			X	X		X	X	X		Toitures et matériaux pour toitures	www.skat.ch
Practical Action (ex ITDG)	1966	Londres	Intal	X	X	X	X		X		X	X	Networking, transferts de technologies multiples	www.itdg.org
CRATerre	1979	France	Intal	X	X	X	X	X	X	X	X		Constructions en terre et habitat para sismique et para cyclonique	http://terre.grenoble.archi.fr
SHELTER Forum	NC	Kenya	Afrique						X			X	Habitat pour les situations d'urgence humanitaire	www.shelterforum.org
CEVE-AVE	1967	Argentine	Amérique latine			X		X	X	X	X	X	Habitat très social préfabriqué	www.ceve.org.ar/ingles.htm
Development Alternatives	1983	Inde	Inde	X	X	X	X		X	X	X		Changement des comportements	www.devalt.org
ECOSUR	1991 & 1996	Nicaragua	Pays du sud	X	X	X	X	X	X	X	X		Production de matériaux low cost et low tech. Tuiles de micro-ciment et briques	www.english.ecosur.org
BMTPC	Juillet 1990	Inde	Inde	X	X	X			X	X	X	X	Utilisation de déchets issus de l'industrie et de l'agriculture pour la production de matériaux ; assistance « eco-design » et technologies de construction résistantes aux désastres naturels	www.bmtpc.org
DCAT	1991	USA	Intal			X						X	Building sustainability into codes of construction	www.dcat.net
NCAT	1976	USA	USA			X	X	X	X	X	X	X	Agriculture durable et développement rural	www.ncat.org
Total				7	6	11	7	5	11	8	10	6		
% / Total				58	50	92	58	42	92	67	83	50		

Tableau 9 : Proposition de comparaison des organisations internationales d'éco-construction « solidaire », impliquées dans le mouvement des technologies appropriées.

Ce tableau aboutit à l'interprétation des domaines d'interventions par pourcentages du nombre total d'organisations : A : Evaluation des ressources locales ; B : Production de matériaux locaux, C : Diffusion de l'information, D : Formation aux techniques traditionnelles, E : Conception architecturale, F : Management de projet, G : Développement et recherche, H : Ateliers et conférences, I : Soutien financier.

Points	% / Total	Domaines d'intervention
5	> 90	C: Diffusion de l'information F : Management de projets
4	70-90	H : Ateliers et conférences
3	60-70	G : Dvlp & R&D
2	50-60	A : Evaluation des ressources locales B : Production de matériaux locaux D : Formation aux techniques traditionnelles I : Soutien financier
1	< 50	E : Conception architecturale

Tableau 10 : Répartition des domaines d'interventions des organisations internationales d'éco-construction solidaire, impliquées dans le mouvement des technologies appropriées.

90 % des réseaux font de la diffusion d'informations et du management de projet tandis que moins de 50 % apportent une aide à la conception architecturale.

Plus de 50 % des structures sont impliquées dans la mise en place de systèmes productifs locaux de matériaux de construction et valorisent les ressources disponibles à proximité des lieux de construction.

Il est intéressant de constater que ces organisations du mouvement pour le transfert de technologies appropriées à l'éco-construction solidaire sont reconnues au niveau international en développant des programmes de recherche & développement très rapidement appliqués sur le terrain, mais qu'au final, le même travail aurait pu être effectué dans leurs pays d'origine, certes avec des besoins différents, mais pour la promotion d'une autre qualité dans la construction.

La valeur ajoutée localisée préférentiellement sur la main d'œuvre ou le redéveloppement de savoir-faire valorisants sont des thématiques complètement d'actualité en 2007-2008 dans les pays civilisés, à l'heure où le secteur du bâtiment semble envisager un tournant radical pour faire face aux nouveaux enjeux (développement durable, performance énergétique, énergies renouvelables...) mais confronté aux difficultés de recrutement de main d'œuvre motivée et qualifiée.

1.3.5 Le consensus pragmatique

Une dernière approche très pratique dite « de terrain » peut être proposée pour présenter une définition professionnelle des éco-matériaux et en phase avec les préoccupations des acteurs économiques, plus soucieux de leur comptabilité analytique et ratios de performance sur leur marché que de débats philosophiques sur leur durabilité ou encore leur empreinte écologique, c'est la vision pragmatique de la théorie du milieu : l'analyse scientifique vulgarisée des différentes caractéristiques techniques et économiques d'un matériau en vue de l'évaluation de ses performances et impacts, dont environnementaux et sanitaires, sur son cycle de vie.

Cette théorie ne renie pas les autres visions et définitions des éco-matériaux présentées précédemment (paragraphe 1.3.1 à 1.3.4) mais leur emprunte plutôt ce qu'elles ont de meilleur :

- le **rigueur méthodologique** des démarches d'analyse exhaustives ou sélectives d'éco-bilan, prémices incontournables aux démarches plus complètes d'éco-conception (définition 1.3.1),
- le **raisonnement sur un cycle de vie** (qui introduit d'emblée une « fin de vie ») (définition 1.3.1),
- le **cadre réglementaire et normatif** des procédures de déclaration de données environnementales et sanitaires en France (NF P-01-010 & FDES) qui fournit un modèle certes incomplet mais a le mérite d'exister (définition 1.3.2),
- la **dimension « écologique »** permettant de déterminer des priorités de choix par types de matières premières (renouvelables, non renouvelables, primaires, secondaires) et impacts environnementaux majeurs (définition 1.3.3),
- le **caractère local des modes de sourcing** (valorisation des ressources disponibles localement, sur une zone de chalandise compatible avec les critères de renouvelabilité et/ou de soutenabilité, (définitions 1.3.3 et 1.3.4),
- l'**impact social et économique** sur une chaîne de valeur à déterminer mais compatible avec un minimum d'emplois directs et indirects à proximité des zones de chantier (définition 1.3.4).

L'ensemble de ces critères se retrouvent dans les outils simplifiés donnant accès à des données qualitatives, permettant de sélectionner les matériaux et composants de construction selon des critères environnementaux et de santé (paragraphe 1.2.2.4, tableau 3).

En veillant à une vulgarisation ciblée des informations, leur accessibilité auprès du plus grand nombre (diffusion gratuite et massive par le biais d'internet), et auprès des fabricants / fournisseurs, dont les PMI ne disposant que de peu de ressources financières, l'outil idéal présentant une définition pragmatique des éco-matériaux est quasiment proposé.

En France, la base de données des éco-matériaux¹, outil pragmatique dédié aux professionnels et largement inspiré de ces démarches internationales, a été initié courant 2005 et inauguré à l'occasion du salon international de la construction de Paris (BATIMAT)².

Cette base de données a été initialement voulue et commandée en 2002 par les instances régionales (Conseil Régional et l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME)) de la région Nord Pas-de-Calais comme outil de recensement des matériaux, produits et techniques utilisées dans les constructions dites à « haute qualité environnementale ».

Cette région, première en France à avoir initié les démarches « HQE » en 1995-1996, par le biais de ses commandes publiques destinées à l'enseignement secondaire, est d'ailleurs

¹ Base de données des éco-matériaux, disponible sur www.cd2e.com

² Salon international de la construction, Batimat www.batimat.com

arrivée à un stade qualifié de maturité selon une enquête récente de l'association HQE publiée en 2005 :

« Les réseaux régionaux sont clairement constitués et identifiés. La région Nord Pas de Calais en est à sa deuxième voire troisième génération de montages d'opérations et a le plus souvent généralisé la démarche HQE® à certains types d'opérations (bâtiments d'enseignement et logements le plus souvent). Un véritable savoir-faire régional HQE® réside à tous les niveaux (institutionnel, soutien financier, maîtrise d'ouvrage, architectes, AMO, BET, écoles, recherche et formation... et pour les plus avancées : filière locale intégrée », [CHAUTARD, 2005]⁴⁸.

Un outil de référencement statique et descriptif des produits et matériaux de construction pouvant répondre ou contribuer (selon qu'on privilégie l'approche « produit » ou « système ») aux ambitions d'une démarche de qualité environnementale partielle ou globale n'est satisfaisant ni d'un point de vue scientifique ni d'un point de vue professionnel, notamment en terme de transparence des informations mises à la disposition des clients cibles.

Un « benchmarking » comparatif a donc été réalisé et a permis de connaître, comprendre, et reproduire les dispositifs existants à l'international pour conduire des évaluations précises en cycle de vie sur les matériaux et produits de construction à caractère « éco ».

Le principe de fonctionnement est le suivant :

- L'accès et la consultation des fiches techniques et environnementales est gratuit pour les utilisateurs de la base de données que sont les prescripteurs, artisans, architectes, négociants, mais aussi particuliers.
- L'expertise scientifique, est accessible pour quelques centaines d'euros. Cette expertise est d'ailleurs couplée à une offre de service de type « package complet » qui permet à la fois d'avoir une bonne idée sur les caractéristiques environnementales et sanitaires de son/ses produits et de bénéficier d'actions commerciales et promotionnelles liées.
- Le dégrossissage des données est effectué par le gestionnaire de l'outil, en lien avec les demandeurs (fabricants de matériaux de construction), tandis que l'analyse complète est réalisée au regard d'une moyenne correspondant à 10 matériaux ou composants équivalents, ayant la même fonction ou aptitude à l'usage.

Tout fabricant de matériaux et composants de construction, impliqué ou non dans une démarche d'éco-différenciation, peut ainsi demander à ce que son produit soit analysé sur la base du système déclaratif normatif français (NF P01-010) et à moindre frais, ce qui rend l'offre de service très attrayante pour les PME-PMI pour lesquelles les ACV complètes restent incompatibles avec leurs bas de bilans financiers, souvent en démarrage d'activité.

Hormis l'outil et la proposition commerciale liée, le plus intéressant reste l'adhésion des fabricants signataires de la charte de fonctionnement (nécessaire pour toute publication sur l'outil) à la définition proposée (voir rubrique « Introduction ») des éco-matériaux pour le secteur de la construction :

« Les éco-matériaux et éco-produits sont donc des produits manufacturés destinés à être intégrés dans les ouvrages du bâtiment, compatibles avec les critères de développement "soutenable", éco-conçus et économiquement accessibles et satisfaisant aux critères de sécurité de fonctionnement après intégration dans lesdits ouvrages » [Association HQE, 2007].

On retrouve dans cette définition :

- les critères de performance techniques, de fonctionnement et de sécurité qui rassurent les consommateurs sur les performances à minima des éco-matériaux, par comparaison à celles bien connues des produits conventionnels,
- des critères environnementaux, de santé et d'ordre sociétal (développement « soutenable », croisement de l'économique, de l'environnemental et du social) mais également des critères d'acceptabilité économique, en lien également avec les aspects sociétaux : un produit, tout éco soit-il, qui est plus de trois fois plus cher qu'un produit classique, ne se vendra pas (constat simple), générera moins de volume donc de chiffre d'affaire, de valeur ajoutée et au final d'emplois.

Derrière cette remarque se cache un critère fondamental : l'aptitude d'un produit ou matériau à être accessible économiquement pour les consommateurs finaux tout en générant suffisamment d'heures de travail, sur un cycle de vie complet, pour créer et maintenir de l'emploi.

Ces critères peuvent paraître subjectifs pour guider un comportement d'achat ; est-il nécessaire de proposer un étiquetage complémentaire aux données techniques et énergétiques d'appareils ou produits (les acteurs de la grande distribution de matériaux et produits de construction commencent à réfléchir à un étiquetage de type électroménager « performance énergétique » et (contenu carbone équivalent), la question peut être posée.

Cette définition pragmatique, qui emprunte finalement un peu de matière à toutes les précédentes (y compris à celle du 1.3.2 négativiste) provoque diverses réactions :

- elle trouve apparemment des échos favorables parmi les prescripteurs, le grand public, les PME-PMI fabricants de produits et matériaux, parfois déjà considérés (commercialement) comme « éco »,
- elle interpelle et intrigue également les plus grands manufacturiers qui ont déjà « crédibilisé » leur communication environnementale en remplissant des Fiches de Déclaration Environnementales et Sanitaires (FDES), ou qui usent de la terminologie « HQE® » en auto-labellisant leurs produits,
- elle effraie quelque peu les adhérents des thèses écologiques les plus extrêmes, partisans des bio-matériaux non transformés,
- elle rassure enfin de nombreuses collectivités et organismes publics, bien embarrassés de devoir établir uniquement leurs critères de choix sur les labels d'auto-performance environnementale, souvent minimalistes, pour leurs achats préférentiels verts¹.

Pour la suite des travaux sur les indicateurs techniques, économiques et financiers des « éco-matériaux » pour le secteur de la construction, il est possible de retenir cette dernière définition consensuelle et complète, l'approche pragmatique.

¹ L'impact important que peuvent générer ces achats préférentiels « verts » sur le marché français des biens et services... est sous-estimé. L'exemple de l'Allemagne nous montre que les entreprises ont tout intérêt à prendre ces données en considération pour l'établissement de leur business plan ou de leur stratégie de développement

CHAPITRE 2

Référentiels Internationaux de la Qualité Environnementale et choix d'éco-matériaux pour la construction-réhabilitation

Chapitre 2 : Référentiels Internationaux de la Qualité Environnementale et Choix d'éco-matériaux pour la construction-réhabilitation

2.1 Place des matériaux de construction dans les systèmes et référentiels internationaux de management de la qualité environnementale dans la construction (MQEB).

Face à la complexité de compréhension des thématiques développées par le développement durable dans le secteur de la construction, différents outils ont été développés depuis les années 1990 au niveau international pour aider tous les acteurs à s'organiser dans un processus de conception / réalisation de bâtiment à qualité environnementale.

Tous ces outils permettent d'identifier les enjeux à prendre en considération et de les hiérarchiser en fonction du contexte : stratégie de la maîtrise d'ouvrage, localisation du bâtiment, niveau de performance recherché...

Les premières démarches sont celles des « éco-architectes » convaincus et militants, s'inspirant de la baubiologie et de la conception bioclimatique dans les années 1960-1970.

Les suivantes, portées par des entreprises ou gouvernements, visent à généraliser le recours à ces solutions architecturales innovantes : elles ont pour objectif la promotion de normes de construction et de référentiels qui guident la démarche des acteurs de la construction en leur permettant au final de valoriser les efforts et progrès réalisés sur le marché le plus ouvertement possible.

Concrètement, ces initiatives prennent la forme de méthodologies ou de certifications issues des milieux associatifs, commerciaux ou institutionnels.

Ces différents référentiels proposent des points d'entrée visant à évaluer :

- soit les moyens mis en oeuvre i.e. la prise en compte des objectifs de développement durable dans le management aux différentes étapes du projet de construction,
- soit les résultats atteints i.e. la performance de l'ouvrage une fois achevé.

Selon les cas, les démarches favorisent des efforts ciblés sur des thèmes précis, par exemple la réduction des consommations énergétiques, ou présentent une approche plus transversale qui prend en compte simultanément les différents aspects de la construction à qualité environnementale.

En fait, Il existe trois types de systèmes d'évaluation et de notation d'immeubles :

- des outils basés sur la connaissance (guides de conception, par exemple guides de conception bioclimatique),
- des outils basés sur la performance (l'évaluation tout au long de la vie d'un immeuble),
- des outils de notation d'immeubles, de type « ecolabels ».

Toutes ces initiatives de type référentiel ont en commun le fait de porter principalement sur le pôle environnemental du développement durable : les aspects sociaux sont parfois abordés sous l'angle du confort et de la santé – tandis que la dimension économique, et notamment les raisonnements en coût global (par exemple : emploi local sur le chantier et dans le bâtiment, impact du projet de construction sur l'économie locale, etc.) reste largement ignorée.

Au niveau international, les référentiels ISO (ISO 9000 (qualité) et ISO 14000 (environnement)) sont à la base des référentiels de management de la qualité environnementale appliqués au secteur du bâtiment.

Les premières certifications ISO 9000 sont apparues dans le bâtiment dès 1994 avec pour objectif de mieux maîtriser la qualité de la construction mais la démarche ISO 9000 reste très peu déployée dans les entreprises de mise en oeuvre car celles qui s'étaient lancées dans la certification n'y ont pas trouvé de vraie valeur ajoutée, la démarche n'étant pas vraiment reconnue par les maîtres d'ouvrage.

Le grand nombre de petites structures dans le secteur a sans doute freiné le développement de cette approche.

A noter : la certification environnementale ISO 14 001 n'est pas non plus très répandue en France dans le secteur de la construction : moins de 100 entreprises de mise en oeuvre sont certifiées (2005).

Ces initiatives sont historiquement d'abord portées par les pays anglo-saxons plus « éco-sensibilisés » que les pays d'Europe occidentale et/ou du sud :

- En **Angleterre** : la démarche BREEAM¹ (1990) et le label Eco-homes pour l'habitat individuel,
- Aux **Etats Unis, au Canada et en Australie** : le label Green Building² porté par certaines villes (1994), et la démarche LEED³ (1999).

Se développent ensuite des méthodologies propres aux pays d'Europe du Nord :

- **En Allemagne**, 7 méthodes : le passeport bâtiment, la liste de contrôle, le DUX (2002), le guide pour la construction durable (2001) du ministère du logement allemand, le système d'évaluation pour une construction écologique, économique et saine « OEOEB MIPS » (2000) et deux labels essentiellement basés sur la performance énergétique : label basse consommation (1999) et label Passivhaus⁴ (maison passive, 1996),
- **En Autriche**, quatre méthodes : la méthode d'évaluation de la réhabilitation écologique de bâtiments, la démarche Total Quality⁵ (2000), l'Ecopass du Vorarlberg⁶ (grille d'évaluation des performances écologiques d'un bâtiment, 2000) et son équivalent national « klima : aktivhaus » (2006),
- **En Suisse**, la démarche Minergie⁷ (1996) et ses trois volets : Minergie, Minergie P (passif) et Minergie Eco (Minergie avec éco-matériaux, importance du volet « santé »),
- **Au Danemark**, l'évaluation « Eco-accounting⁸ » (1999) basée sur l'analyse en cycle de vie, et le logiciel « Beat » (2002),
- **Aux Pays-Bas**, L'index environnemental (IE) et le logiciel d'application « Greencalc »⁹.

Dans les pays asiatiques

- **A Hong Kong** : le Label HK BEAM¹⁰ (1996),
- **Au Japon**, la méthode CASBEE¹¹ (2001),

¹ BREEAM : Building Research Establishment Environmental Assessment Method disponible sur www.breeam.org

² Label Green Building de la ville d'Austin au Texas www.austinenergy.com

³ LEED Rating system, Leadership in Energy and Environment Design www.usgbc.org/DisplayPage.aspx?CMSPageID=222

⁴ Passivhaus : « maison passive », disponible sur de site de l'institut du Docteur Wolfgang Feist www.passiv.de

⁵ Total Quality, disponible sur www.argetq.at/index.htm

⁶ Ecopass, document disponible sur www.energieinstitut.at/HP/Upload/Dateien/GAW_2007.pdf

⁷ Minergie, disponible sur www.minergie.ch

⁸ Eco-accounting, disponible sur www.en.sbi.dk

⁹ L'index environnemental et le logiciel Greencalc, disponible sur www.en.sbi.dk

¹⁰ HK BEAM, disponible sur www.hk-beam.org.hk/general/home.php

¹¹ Comprehensive assessment system for building environmental efficiency - CASBEE, disponible sur www.ibec.or.jp/CASBEE/english/overviewE.htm

Et enfin en France,

- la démarche **Haute Qualité Environnementale** « HQE »¹ (PUCA, 1993) et son référentiel de 14 cibles (définition de la Qualité environnementale dans la construction QEB),
- la certification **Habitat et Environnement**² (H&E, 2003),
- les nouveaux labels Bâtiment Basse Consommation (BBC) et Effinergie³.

¹ Haute Qualité Environnementale dans la construction, disponible sur www.assohqe.org

² Habitat et Environnement (H&E), disponible sur www.cerqual.fr/pro/habitat_environnement

³ Effinergie, disponible sur www.effinergie.org












1990		1995			2000			2005	
- BREEAM & Eco Homes (UK)  	- Green Building  (Austin, USA) - HQE (FR)  www.assohqe.org	- Passivhaus (DE)  - Minergie (CH)  - HK BEAM (HK) 	- LEED (USA-Canada, Australie)  - Label basse consommation (DE) - Eco Accounting (DK)	- OEoEB MIPS (DE) - Total Quality (2000)  - Ecopass Vorarlberg (AU)	- DUX, Guide construction durable (DE) - CASBEE (JP) 	- H&E (FR) 	- Ecopass Klima (AU)		

Tableau 11 : Historique des référentiels et outils de management de la qualité environnementale dans la construction.
 [BIOHAB, 2004] et [UTOPIES, 2005].

Toutes ces démarches se développent avant tout en Europe Occidentale ou en Amérique du Nord et restent quasi-inexistantes dans les pays du sud, malgré un déséquilibre d'activité¹.

Ces référentiels dont l'approche environnementale est générale englobent et dépassent le plus souvent les exigences légales locales (notamment sur des aspects spécifiques: réglementation sur l'amiante, normes acoustiques, traitement spécifique de certains déchets, etc.), même s'ils relèvent d'une approche volontaire; ils n'en ont pas moins leur part d'influence à l'échelle nationale et internationale sur les futures évolutions réglementaires, dans la mesure où leur mise en oeuvre est un vaste terrain d'expérimentations permettant d'identifier les pratiques qui pourront ensuite être généralisées vers la « standardisation ».

Dans certains cas, le cadre législatif vient freiner le développement et la mise en oeuvre d'innovations environnementales comme c'est le cas en France notamment pour la récupération / valorisation des eaux pluviales (la mise en oeuvre d'un double circuit d'eau reste interdite de manière générale par les services sanitaires dans les établissements recevant du public) ou l'utilisation de matériaux et techniques ne bénéficiant pas de certifications ou d'avis techniques émanant des centres techniques du bâtiment.

Peu de comparatifs entre ces différents outils et référentiels ont été réalisés ; nous en avons recensé quatre, plus ou moins complets :

- une comparaison basée sur des méthodes développées dans 5 pays ciblés : Allemagne, France, Danemark, Pays Bas, Royaume Uni. [**BIOHAB, 2004**]⁴⁹,
- un tableau comparatif du rapport annuel 2005 de la démarche « Entreprises et construction durable » initiée par le cabinet UTOPIES spécialisé en management durable [**UTOPIES, 2005**]⁵⁰,
- les analyses des certifications « étrangères » proposées par le centre de ressources « Envirobot méditerranée » [**Envirobot, 2007**]⁵¹,
- le rapport récent « Comparaison internationale bâtiment et énergie », rédigé dans le cadre du PREBAT (Programme de recherches et d'expérimentations sur l'énergie dans le bâtiment) » [**ADEME-PUCA-CSTB, 2007**]⁵².

En général, chaque référentiel propose :

- différents types d'applications : maison individuelle, bâtiment collectif, bâtiment industriel, école, logement social, bureaux.
- un certain nombre de cibles et sous cibles, regroupées ou non par familles et par grands enjeux : chantier, énergie, matériaux et composants, eau, gestion.
- une procédure d'accréditation de professionnels pour l'évaluation et l'obtention de la certification.
- l'accréditation de professionnels (maîtres d'œuvre, maîtres d'ouvrage, bureaux d'études techniques, entreprises de construction, fabricants de matériaux ou systèmes) aptes à aider, de part leur métier, à l'obtention de bâtiments accrédités, en neuf ou en rénovation.
- un référentiel des réalisations accréditées.
- des documents et/ou logiciels, gratuits ou payants, mis à disposition des professionnels pour structurer les démarches de planification / conception / réalisation / labellisation.

¹ Un indicateur de ce déséquilibre d'activités : 25 millions de m² ont été construits en France en 2003 contre 3000 millions de m² en Chine.

Parmi l'ensemble des cibles et sous cibles de ces référentiels, le choix de matériaux et composants de construction globalement moins impactants pour l'environnement et la santé que d'autres, plus conventionnels, est souvent disponible ; la plupart des systèmes de MQEB y font référence, avec des niveaux d'intégration différents : l'approche « produits » est ainsi obligatoire pour l'obtention d'un niveau minimum de performance avec certains référentiels, tandis que d'autres la positionnent comme une option.

L'étude détaillée de chaque référentiel permet d'évaluer la contribution de la cible « matériaux et produits de construction éco-conçus » au niveau de performance environnementale globale de la construction, tout en identifiant le niveau d'intégration : simple mention et ou approche optionnelle, approche minimaliste, approche incontournable, réelle plus value ...

La présentation des référentiels de MQEB est proposée sous forme de fiches synthétiques disponibles en annexes, suivant le format ci après : présentation de l'intitulé, de l'organisme gestionnaire, du type d'approche, des priorités, des cibles développées, du fonctionnement de l'accréditation / évaluation.

Les outils spécifiques développés sont également évoqués, ainsi que la possibilité de faire certifier la construction. L'analyse mentionne également l'accréditation de professionnels, le nombre de réalisations depuis l'origine de la démarche et le lien avec la cible matériaux / éco-matériaux.

2.1.1 Les éco-matériaux dans les systèmes de MQEB anglo-saxons (Grande Bretagne, USA, Canada)

2.1.1.1 Système de MQEB en Grande Bretagne

Le référentiel d'origine permettant l'évaluation de la qualité environnementale des bâtiments en Grande Bretagne est le « BREEAM » pour les bâtiments collectifs et le label Eco-homes pour les maisons individuelles.

Ce fut le premier système élaboré à la suite du protocole de Kyoto, ce qui explique notamment qu'il soit le plus complet en termes de quantité et de qualité d'outils (rattachement au BRE pour la mobilisation de fonds nécessaires).

L'analyse du BREEAM est disponible en **ANNEXE 1**.

2.1.1.2 Système de MQEB aux Etats-Unis et au Canada

Le système nord américain « LEED » est le plus employé dans le monde actuellement ; c'est aussi celui qui a produit le plus grand nombre de bâtiments certifiés actuellement. Son objectif n'est pas d'être le plus exhaustif dans l'évaluation mais toujours un niveau au dessus de la pratique courante, avec comme finalité, la transformation progressive du marché de la construction.

L'analyse de la LEED est disponible en **ANNEXE 2**.

2.1.2 Les éco-matériaux dans les systèmes de MQEB Nord Européens : (Suisse, Autriche, Allemagne, Pays Bas, Belgique)

2.1.2.1 Système de MQEB en Suisse

En Suisse, la clé d'entrée pour l'évaluation de la qualité environnementale du bâtiment est la cible « performance énergétique » exprimée en Kilowatts heure d'énergie primaire dépensée par mètre carré de superficie habitable et par annuité : kwh/m²/an. Le référentiel le plus connu est le label Minergie.

L'analyse de MINERGIE est disponible en **ANNEXE 3**.

2.1.2.2 Système de MQEB en Autriche

En Autriche, la démarche Total Quality, créée en 1998, propose un référentiel accompagné d'un guide d'orientation.

L'analyse de Total Quality est disponible en **ANNEXE 4**.

2.1.2.3 Système de MQEB en Allemagne

L'Allemagne est considérée comme le pays précurseur des démarches de qualité environnementale dans la construction, plutôt sous l'angle de la performance énergétique « globale » du système constructif sur son cycle de vie.

Conforme à sa réputation « rigueur » et « qualité », c'est dans ce pays qu'a émergé le label de performance énergétique couplé à un outil d'aide à la conception, la « maison passive¹ », défini par l'institut de Darmstadt et son fondateur, le docteur Wolfgang Feist.

L'analyse de PASSIV HAUSS est disponible en **ANNEXE 5**.

2.1.2.4 Système de MQEB aux Pays Bas

Aux Pays Bas, l'outil d'évaluation de la qualité environnementale de la construction est un indicateur global « l'index environnemental – IE » développé par l'agence gouvernementale néerlandaise du bâtiment.

L'IE est calculé en utilisant GreenCalc, un outil informatique développé par le NIBE (Dutch Institute for Building Biology and Ecology), bureau d'ingénierie et de recherche multidisciplinaire.

L'analyse de PASSIV HAUSS est disponible en **ANNEXE 6**.

2.1.2.5 Système de MQEB en Belgique

En Belgique, il n'existe pour l'instant aucun système officiel de management de la qualité environnementale dans la construction.

La démarche « HQE » française est relativement mise en avant en région Wallonne, la certification « maison passive » est disponible depuis 2006 en Flandres et en région wallonne via les plates formes professionnelles développées².

A Bruxelles, un référentiel a été créé pour caractériser la qualité environnementale d'un bâtiment en exploitation, le Green Building Brussels.

L'analyse de Green Building Brussels est disponible en **ANNEXE 7**.

2.1.3 Les éco-matériaux dans le système de MQEB français

En France, le principal référentiel d'évaluation de la qualité environnementale du bâti est depuis les années 1995, le référentiel HQE[®] proposé par la démarche « Haute Qualité Environnementale ».

L'analyse de la HQE est disponible en **ANNEXE 8**.

¹ Une construction « passive », de part son mode de conception et l'utilisation des matériaux et techniques appropriées, se passe de tout apport de chauffage direct ou conventionnel ; en théorie une bougie peut suffire à « réchauffer » le bâtiment ; les apports énergétiques dits « passifs » sont valorisés à outrance (apports gratuits du soleil, dégagement de chaleur des occupants, récupération de chaleur sur l'air vicié sortant etc...)

² Plate forme maison passive en Wallonie et en Flandres Belges : www.maisonpassive.be

2.1.4 Les autres systèmes de MQEB : l'éco-construction « intelligente » ou la conception bio-climatique solaire passive.

Dans un contexte de raréfaction des ressources en énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) et d'augmentation des émissions de gaz à effet de serre qui sont à l'origine du dérèglement climatique, il devient essentiel aujourd'hui de repenser la construction des bâtiments. Plutôt que de croire en une énergie fossile infinie et gratuite, d'anciennes considérations permettent d'approcher la construction d'un bâtiment en fonction du site, du paysage, du climat, du soleil et des matériaux locaux. Ces considérations rejoignent toutes un concept déjà développé précédemment « la conception ou l'architecture bioclimatique ».

L'architecture du 20^{ème} siècle se caractérise ainsi par une importance exagérée accordée à la technologie, à l'exclusion de toute autre valeur. On retrouve cette tendance dans le cadre bâti au niveau même des matériaux de construction utilisés, telles les matières plastiques et synthétiques. Nous avons ainsi créé une dépendance au contrôle mécanique de l'ambiance intérieure (ventilations mécaniques par exemple), au détriment d'une exploitation des phénomènes climatiques et des autres phénomènes naturels pour satisfaire nos exigences de confort. On prête ainsi aujourd'hui peu attention à la diversité et au caractère particulier des climats régionaux et des matériaux de construction locaux.

Pourtant, depuis peu, le chauffage solaire passif et la réfrigération naturelle soulèvent un intérêt nouveau et soutenu auprès du public parce qu'ils simplifient la vie au lieu de la compliquer. Ces constructions sont simples de conception et d'emploi, comportent peu d'éléments en mouvement et n'exigent que peu d'entretien. Elles n'engendrent que peu de pollution thermique puisqu'elles n'exigent pas la combustion d'énergie fossile et ne produisent ni déchets ni gaspillage. Puisque c'est la construction elle-même et ses éléments constitutifs qui composent l'installation solaire passive, il importe de prendre en compte les données climatiques et solaires dès la conception, et de choisir les matériaux et composants en fonction de leurs apports, complémentaires à la conception solaire passive.

Jusqu'en 1975, il n'existait pratiquement plus d'informations regroupées sur le chauffage solaire passif. Un ouvrage qui fait désormais référence en la matière et a servi d'inspiration à de nombreux autres, dont des plus récents [OLIVA & COURGEY, 2007]⁵³, date des années 1970 [MAZRIA, 1979]⁵⁴. Son auteur, l'un des pionniers de l'architecture solaire passive reconnu au niveau international, insiste particulièrement sur le choix de matériaux et composants de construction adaptés pour le choix d'un procédé solaire passif, de qualité suffisante et à un prix abordable.

L'accent est notamment mis sur la quantité totale d'énergie nécessitée pour la construction d'un bâtiment pouvant dépasser la consommation engendrée ultérieurement au cours de plusieurs années de fonctionnement.

Les matériaux de construction et l'ensemble des équipements peuvent absorber des quantités notables d'énergie lors de leur fabrication, de leur transport jusqu'au chantier et lors de leur mise en œuvre.

Un article [KEGEL, 1975]⁵⁵ sur l'énergie et les matériaux de construction analyse la somme des énergies nécessaires à l'édification d'un bâtiment de plus de 40 000 m² à Chicago. Le bâtiment est considéré sur son « cycle de vie » : construction et mise en œuvre, matériaux, équipements et fonctionnement.

Les conclusions sont intéressantes : le bâtiment peut fonctionner pendant au moins 6 années avant de dépasser, en consommation, la quantité d'énergie qui a été nécessaire à son édification. Les calculs ne prennent toutefois pas en considération l'énergie dépensée en phase extraction et dans les transports « primaires » (carrière – usine).

L'auteur recommande également d'employer des matériaux locaux biodégradables, à faible teneur énergétique, et différenciés en fonction de leurs apports bénéfiques pour la conception bioclimatique solaire : éléments massifs pour l'inertie thermique, bois, contreplaqués, plaques de plâtre pour les éléments de finition, tôles panneaux et éléments en acier, profilés aluminium et matières plastiques en petites quantités ou en récupération.

Le tableau suivant donne quelques ordres de grandeur de dépense énergétique pour des matériaux de construction.

Matériaux	Energie grise (kWh/m3)
Bloc béton (Parpaing de ciment)	275
Brique standard 20 cm	696
Béton plein	430
Briques pleines (cuites)	1443
Brique de terre comprimée à 20-40 bars - Stabilisée (8% de ciment)	780
Bois léger brut, séché à l'air (sapin, épicéa)	329
Laine de chanvre, lin, coton	48
Laine de mouton et autres fibres animales	56
Liège expansé conforme norme NF EN 13170	450
Paille (bottes sur chant)	0
Ouate de cellulose injectée	98
Ouate de cellulose (panneaux)	152
Plâtre courant pour enduit intérieur	552
Panneau de particules agglomérées	2220
Laine de verre 100kg/m3	1344
Laine de roche en vrac	216
Polystyrène expansé	500
Polystyrène extrudé (Plaques expansées aux HCFC)	795
Mousse de polyuréthane 30kg/m3 (plaques moulées)	974
Panneaux laine de bois 200 kg / m3	219

Tableau 12 : Energies de production (énergie grise) de quelques matériaux de construction courants et éco-matériaux, [CD2E, 2007].

Les pratiques modernes de la construction cherchent à utiliser des techniques qui maintiennent le coût du bâtiment au niveau le plus bas possible, pour des questions de reproductibilité et d'accessibilité au plus grand nombre.

On a préféré puiser dans des ressources non renouvelables en incluant, par exemple, de fortes dépenses énergétiques dans la fabrication et le transport de matériaux de construction préfabriqués, plutôt que de payer le travail d'une production artisanale locale. Cette « mentalité » financière ne conduit souvent pas à des pratiques saines et écologiques puisque les bâtiments ainsi fabriqués vont de plus en plus constituer un handicap pour maintenir la consommation de ressources à un niveau raisonnable.

Certains matériaux nécessitent peu d'énergie pour leur fabrication tandis que d'autres sont à haute teneur en énergie. L'architecture climatique « solaire passive » insiste particulièrement sur la nécessité de stocker et restituer toute forme de chaleur dans le temps ; elle légitime le recours à une masse d'inertie thermique apportée par des matériaux lourds : terre, brique, eau, béton, pierre, placés à l'intérieur de la construction. Dans certains cas, ces matériaux du « gros œuvre » peuvent représenter jusqu'à 90 % du volume total des matériaux employés ; avec quelques efforts d'économie d'énergie lors du choix des matériaux, notamment du second œuvre, un tel bâtiment sera par nature sobre en énergie.

Il est donc possible, avant d'effectuer un choix de matériaux, de s'informer sur les productions locales qui favorisent le marché du travail; outre l'économie sur les coûts de

transport, cette démarche permet de maintenir en activité les industries et donc l'emploi et la valeur ajoutée locale.

Cette approche des matériaux pour une conception solaire bioclimatique relève du bon sens et rejoint la définition retenue pour notre étude ainsi que d'autres finalement plus militantes, mais en valorisant les apports techniques qui différencient des éco-matériaux, par exemple leur capacité de stockage / restitution de chaleur « passive ».

2.1.5 Comparatifs et synthèse des différentes approches

L'analyse de la place accordée aux éco-matériaux pour la construction (conformément à la définition retenue dans le cadre de notre étude) dans les principaux systèmes de management de la qualité environnementale et des démarches de labellisation des performances énergétiques, permet de proposer une grille de lecture simplifiée présentée dans le tableau ci après :

Système de MQEB ou labellisation de la performance énergétique	Cible(s) dédiée(s) au choix des produits et matériaux de construction	Matériaux et composants « éco-matériaux »			
		Proposition d'une définition proche de la définition « éco-matériaux » (critères environnement – santé)	Recours non obligatoire aux éco-matériaux	Recours obligatoire aux éco-matériaux	Valorisation des caractéristiques techniques différenciantes des éco-matériaux
BREEAM	Oui		Oui		NC
LEED	Oui	Oui	Oui		NC
Passivhaus	Oui		Oui		Oui
Total Quality	Oui	Oui	Oui		NC
Minergie	Oui	Oui		Oui pour Minergie Eco	Oui
Greencalc /IE	Oui		Oui		NC
GBB Brussels	Oui	Oui	Oui		Oui
HQE	Oui		Oui		Non
Architecture solaire	Oui	Oui		Oui	Oui

Tableau 13 : Proposition de positionnement de l'approche matériaux / éco-matériaux dans les principaux systèmes de management de la qualité environnementale dans la construction.

Il ressort de cette synthèse que toutes les démarches, SMQE et labellisation énergétique, proposent une cible dédiée aux matériaux et composants de construction, et donc à leur « impact » quant à leur contribution à la qualité environnementale du système constructif « bâtiment » (9/9).

Seuls cinq systèmes proposent une définition explicite des éco-matériaux pour la construction, proche de celle que nous proposons dans le cadre de notre étude : LEED, Total Quality, Minergie, GBB Brussels et Architecture solaire (5/9).

Sept systèmes incluent une cible dédiée aux matériaux de construction mais ne rendent pas obligatoire un niveau de performance minimum quand à des matériaux plus respectueux de l'environnement et de la santé (tous sauf Minergie et architecture solaire) (7/9).

Par conséquent (9-2=7), seules deux démarches rendent le recours aux éco-matériaux obligatoire pour satisfaire aux exigences de la démarche. (2/9).

Enfin, quatre systèmes (Passivhaus, Minergie, GBB Brussels et architecture solaire) proposent de valoriser les apports techniques différenciants apportés par les éco-matériaux, par comparaison à des solutions plus conventionnelles, par exemple la capacité d'absorption / relargage de chaleur des produits et matériaux de construction (4/9).

Il est intéressant de noter que les approches les plus complètes dans l'utilisation / prescription d'éco-matériaux sont toutes issues des pays d'Europe du Nord et/ou à consonance germanique, pays les plus éco-sensibilisés et précurseurs des démarches d'architecture solaire bioclimatique les plus proches des définitions « militantes » (matériaux éco-biologiques).

2.2 Cahier des charges d'une méthode simplifiée d'aide au choix d'éco-matériaux pour la construction /réhabilitation de bâtiments à qualité environnementale et à faible niveau de consommation énergétique

2.2.1 Introduction

Les développements précédents ont permis de :

- situer la problématique et les enjeux de la thématique environnementale (plus largement en fait la traduction des principes du Développement durable) dans le secteur du bâtiment en France,
- présenter les différentes définitions du terme « éco-matériaux » soutenues par des collègues et communautés parfois opposés,
- situer les avancées au niveau international en terme de mise à disposition des acteurs de la construction d'outils et méthodes permettant d'aborder une certaine « qualité environnementale » sur le cycle de vie du bâtiment, certains outils étant orientés « matériaux », d'autres plutôt « système constructif et bâtiment »,
- expliquer le passage possible du concept de « développement durable » aux thèses parfois insuffisantes, à celui du « management durable » plus adapté aux réalités de terrain,
- enfin comprendre l'importance accordée au choix de matériaux et composants de construction « éco-conçus » dans chacun des systèmes de MQEB, parmi lesquels dans la démarche la plus en vogue actuellement¹ « l'architecture bioclimatique ».

La construction de bâtiments à qualité environnementale (HQE, éco-construction, bio-construction) peut être simplifiée en dernière approche par la prise en compte de trois conditions essentielles :

- la conception du bâtiment en elle-même (art, design mais également compacité, volumétrie, orientation performance thermique des parois et éléments en contact avec l'extérieur) liée à la maîtrise d'œuvre,
- le choix des produits et matériaux de construction appropriés (éco-matériaux), en fonction de critères d'aptitude à l'usage (techniques), de coût (économiques) de

¹ Des enquêtes réalisées par l'auteur, auprès de la cible client « particuliers » en 2007 et début 2008 confirment la nouvelle tendance actuelle chez les ménages français souhaitant se lancer dans un projet de construction : ils veulent une maison saine, confortable, consommant peu d'énergie, bioclimatique et passive (sans toutefois savoir véritablement qualifier les deux derniers termes)

rentabilité (financiers) d'impact environnemental (critères écologiques) et d'impact sur la santé (critères de sanitaires) ; ce choix doit être effectué en parallèle de l'étude des fonctions essentielles de la construction, et relève d'ailleurs plutôt de l'ingénierie et du génie civil que de l'architecture à proprement parler, en tout cas en France,

- et le choix de systèmes de production d'énergie renouvelable permettant de compléter les faibles besoins de chauffage restant à couvrir (d'abord raisonner « enveloppe » et gains passifs avant de compléter par les apports actifs).

Dans ce contexte, nous avons volontairement retenu la définition « pragmatique » des éco-matériaux telle que présentée précédemment (paragraphe 1.3.5) : « *Les éco-matériaux et éco-produits sont donc des produits manufacturés destinés à être intégrés dans les ouvrages du bâtiment, compatibles avec les critères de développement "soutenable", éco-conçus et économiquement accessibles et satisfaisant aux critères de sécurité de fonctionnement après intégration dans lesdits ouvrages* ».

Les éco-matériaux et éco-produits pour le secteur de la construction permettent donc de constituer des systèmes constructifs globalement moins impactants que ceux considérés comme conventionnels (par exemple le « stock » de bâtiments anciens considérés comme « passoire énergétique » et nécessitant une réhabilitation thermique de grande ampleur : le parc de logements anciens construits avant 1979 en France est de 17,5 millions dont 9,2 millions de logements individuels (50 %) ; tous les rénover d'ici à 2050 (facteur 4), signifie donc un rythme annuel de près de 417 000 rénovations par an [SIDLER, 2007]⁵⁶)

Le recours aux éco-matériaux s'est généralisé depuis les années 1990 dans la plupart des pays ayant développé des méthodologies de management de la qualité environnementale du bâti « SMQE » (voir paragraphe 4-5 « comparatif des différentes approches »).

Ces pays correspondent aux zones de chalandises pour lesquelles les parts de marché de ces « éco-solutions », en comparaison aux volumes d'échanges de produits et matériaux considérés comme « conventionnels », sont proportionnellement les plus importantes : 12 % en Allemagne, 9% aux Pays Bas, 6 % (mais à taux de croissance prévisionnel élevé) en Belgique...

En France, de nombreux freins existent et tendent à ralentir l'utilisation et la prescription massive d'éco-solutions dans le secteur de la construction : freins institutionnels, réglementaires, économiques, normatifs, financiers, culturels, techniques..

Parmi les facteurs principaux considérés comme limitant le développement du marché des éco-solutions, la plupart des acteurs professionnels¹ de la construction interrogés s'accordent sur:

- le manque de transparence et de disponibilité des informations environnementales et sanitaires vulgarisées sur les dits produits,
- le manque de disponibilité d'argumentaires techniques, économiques et financiers, leur permettant de vendre l'apport des solutions éco, souvent plus chères (levier quantités / prix) car peu diffusées, par rapport aux solutions conventionnelles.

Quelques organismes et bureaux de consulting privés abordent la question de la durabilité par un raisonnement en coût complets en cycle de vie, ce qui permet de répercuter ou

¹ Données Cd2e & Sondage effectué en 1997 par « Greenspec », au Royaume Uni, auprès de 1500 architectes, www.greenspec.co.uk

traduire une performance globale en économie de coûts : coûts d'investissement, coûts de fonctionnement (maintenance, remplacement...), coûts en fin de vie (recyclage, mise en décharge), coûts évités par le différentiel entre coûts complets globaux.

Mais une décomposition méthodologique fine et détaillée, basée sur une approche fourniture / main d'œuvre, à l'aide de ratio de performance coûts / bénéfices pour chaque solution constructive de masse n'a pas encore été proposée¹.

2.2.2 Objectifs de la méthode et de l'outil

L'objectif d'une méthode d'aide au choix d'éco-matériaux basée sur une performance économique et financière, langage « marché », est précisément de pallier à ce manque d'argumentaires par la caractérisation et l'évaluation des performances techniques, économiques et financières des éco-matériaux, éco-produits et éco-systèmes pour le secteur du bâtiment par comparaison aux solutions dites conventionnelles.

Les critères techniques regroupent les informations essentielles liées à l'aptitude à l'usage, la fonctionnalité, la durabilité technique dans le temps, les niveaux de performance intrinsèques liés à chaque matériau / produit (niveau de performance thermique exprimée en résistance thermique équivalente par exemple pour les matériaux d'isolation thermique rapportée). L'aptitude et les conditions liées à la mise en œuvre sont également concernées.

Les critères économiques regroupent quant à eux tous les coûts liés à l'achat, la mise en œuvre, l'entretien, le remplacement, le recyclage ou la valorisation en fin de vie du matériau / produit, il s'agit en fait d'une réflexion globale en coûts complets en cycle de vie.

Enfin, les critères financiers sont généralement les moins facilement perceptibles : pour certains, il s'agit de mesures, moyens et produits de financement existants, proposés par les acteurs privés et publics du monde de la finance (banques, fonds et placement de financement des logements sociaux, organismes para publics, collectivités...), qui permettent de financer les travaux de construction neuve ou de réhabilitation : prêts bonifiés, mesures fiscales, mesures d'incitation.

Pour d'autres, il s'agit d'un langage commun universellement compréhensible, ayant l'avantage de présenter un dénominateur commun pour mesurer les aspects économiques, sociaux et environnementaux d'un développement [De BACKER, 2005].

L'objectif de notre étude est donc de proposer et construire un faisceau cohérent d'indicateurs simples permettant in fine de réaliser un calcul coûts/bénéfices de la prescription / utilisation d'éco-systèmes par comparaison aux solutions constructives conventionnelles ; ce système de management durable appliqué aux éco-matériaux devant permettre d'augmenter les parts de marché de ces éco-produits en France.

2.2.3 Choix des critères de performance : indicateurs, référentiel de mesure pour une aide multicritère à la décision

Pour atteindre cet objectif de construction d'un faisceau cohérent d'indicateurs permettant de réaliser un calcul coûts / bénéfices de la prescription / utilisation d'éco-matériaux, nous proposons de travailler sur des indicateurs répartis au sein de trois grandes familles « critères techniques – économiques – financiers » considérées comme principales car prépondérantes dans une démarche de choix prescription – utilisation de matériaux et composants de construction. Les critères de choix basés sur des indicateurs de ces trois

¹ Une base de données « *Construction Durability Database* » existe en Angleterre, et donne des indicateurs de durabilité d'un grand nombre de composants du bâtiment. Elle est financée par l'organisation gouvernementale « Housing Corporation » et Building Life Plans Ltd voir <http://www.componentlife.com/default.asp>

grandes familles seront complétés par des données minimales regroupées dans les familles « environnement » et « santé » venant légitimer l'aspect « éco » des matériaux sur lesquels nous proposons de travailler, par comparaison aux solutions conventionnelles traditionnelles.

Chaque famille de critères regroupe des indicateurs qui dépendent eux mêmes spécifiquement des particularités de chaque matériau ou composant : composition, domaine d'utilisation, contexte réglementaire de référence, usages de prescription dans le milieu de la construction.

Au-delà de l'approche purement technique, économique ou financière sur laquelle nous proposons de concentrer notre raisonnement, nous légitimerons la comparaison « éco-matériaux » / « solution conventionnelle » par l'utilisation d'indicateurs environnementaux facilement compréhensibles pour des non spécialistes des analyse en cycle de vie et en phase avec les préoccupations et grand enjeux de société actuels (augmentation du cours des énergies non renouvelables, commerce équitable, recours aux ressources renouvelables locales...) : l'énergie grise (embodied energy), les matières premières d'origine renouvelable, la recyclabilité en fin de vie et le pourcentage d'énergie verte utilisé en phase process.

Ces indicateurs sont repris dans la majorité des outils dédiés à l'analyse en cycle de vie de matériaux, systèmes constructifs et/ou de bâtiments, présentés au paragraphe 1.2.2.4 tableaux 1, 2 et 3.

Enfin, une famille d'indicateurs sera volontairement dédiée à l'analyse du bilan carbone équivalent au contenu énergétique (conversion d'unités énergétiques en unités équivalent carbone ayant un pouvoir global de réchauffement climatique) des matériaux et composants analysés : certes mono critère parfois trop restrictif, le bilan carbone comparatif est un indicateur partiel d'éco-efficacité, présentant un lien fort avec une préoccupation internationale omniprésente, le réchauffement climatique et son impact sur les activités humaines, notamment les filières de production de biens et services.

Les pays anglo-saxons sont d'ailleurs plus avancés que la France dans ces réflexions carbo-centristes, plusieurs entreprises de production et réseaux de distribution¹ ont récemment décidé d'axer leur marketing environnemental sur des indicateurs restreints facilement compréhensibles par les consommateurs finaux : le contenu énergétique, le bilan carbone équivalent et les modes de transport utilisés.

Ces informations de référence peuvent être regroupées au sein d'un référentiel, ensemble de base de données contenant les références d'un système d'information, permettant une aide à la décision multicritères.

Ces références peuvent être indispensables ou complémentaires; un référentiel rassemble et structure les éléments considérés comme nécessaires pour fournir des réponses aux questions évaluatives. Il doit être le résultat d'une démarche raisonnée qui renforce l'objectivité et la transparence du système d'évaluation.

L'analyse multicritères, autrement appelée aide multicritères à la décision, est apparue dans les années 1960, pour pallier les insuffisances d'une simple analyse monocritère, par exemple de type économique. Elles se sont principalement focalisées sur les problèmes à décideur unique.

¹ Voir par exemple la démarche de TESCO début 2007 en Grande Bretagne, géant de la distribution de produits alimentaires sur www.tesco.com

Par la suite, les champs d'application ont été élargis à des problèmes à décideurs multiples, recherchant donc une solution répondant à la meilleure combinaison possible de critères multiples [SIMOS, 1990]⁵⁷, c'est-à-dire en fait le meilleur compromis et non la meilleure solution. D'où l'intérêt que représentent ces méthodes pour l'évaluation environnementale de matériaux et produits de construction : la meilleure solution n'existe pas d'un point de vue objectif, on peut trouver le meilleur compromis et peut-être la meilleure association de compromis parmi les choix possibles¹.

Plus précisément, l'analyse multicritères est une analyse ayant pour but d'explicitier une famille cohérente de critères [Roy & Bouyssou, 1993]⁵⁸ permettant d'appréhender les différentes conséquences d'une action, potentielle, globale, partielle ou fragmentaire.

Une action correspond aux solutions possibles envisagées par un processus de décision, c'est l'élément qui va faire l'objet de la comparaison. L'action potentielle est une action provisoirement jugée possible par l'un des intervenants, en vue de l'aide à la décision. Une action globale est une action potentielle dont la mise à exécution est exclusive de toute autre action.

L'action partielle ou fragmentaire est une action dont la mise à exécution n'est pas exclusive de toute autre action. Lorsque ces actions fragmentaires sont indépendantes les unes des autres, il est préférable de raisonner sur chacune d'entre elles plutôt que sur leur combinaison en actions globales qui rend le processus de décision complexe.

Par contre, lorsque les actions fragmentaires sont interdépendantes, il est préférable de les comparer en actions globales pour comparer des actions vraiment comparables, les actions fragmentaires interdépendantes ne pouvant être comparées individuellement.

Concernant le choix de matériaux et composants de construction, il est possible de constater que ce choix ne peut représenter qu'une action fragmentaire non indépendante des autres : si chaque produit de construction peut être considéré indépendamment sur certaines de ses caractéristiques, il est difficile, sur la majorité d'entre elles, de dissocier la performance par exemple technique individuelle du matériau de la performance technique du matériau au sein du système constructif global constitué par le bâtiment.

Mais les performances techniques de ce matériau ou composant ne se traduisent pas directement dans la plupart des cas par des performances techniques à l'échelle du bâtiment : c'est l'association de composants qui permet cette transposition de performances techniques à l'échelle du bâtiment, i.e. le passage du matériau / composant à l'association de matériaux et composants au sein de systèmes constructifs remplissant une fonction, eux-mêmes assemblés pour constituer le bâtiment, système constructif global.

Une association de composants ou matériaux de construction susceptible de représenter une action globale représente un composant de construction, une partie d'ouvrage telle qu'un mur, une toiture, un plancher, une fenêtre, ou plus précisément une réalisation particulière d'un composant du bâtiment qui respecte une unité fonctionnelle donnée².

Cette réalisation particulière peut être appelée « solution constructive » indépendante des autres car, lorsque choisie, elle ne nécessite pas le choix d'une autre solution constructive

¹ Cette remarque est d'ailleurs également valable pour le secteur des énergies renouvelables où le meilleur compromis représente une association complémentaire entre plusieurs systèmes de production d'énergies, renouvelables ou non, et pas une solution « unique ».

² Au sens de la norme ISO 14 040

et sa mise à exécution est exclusive de toute autre solution, puisque, lorsqu'elle est mise en œuvre, une autre solution ne peut être mise en œuvre en même temps.

Il s'agit bien ici d'une action potentielle globale [MAYSTRE, 1994]⁵⁹

2.2.4 Choix d'une méthodologie d'analyse et d'expérimentation :

Pour mesurer les caractéristiques techniques économiques et financières des éco-matériaux pour la construction par comparaison aux solutions conventionnelles, il faut disposer d'une grille de classification permettant de hiérarchiser les matériaux et produits en proposant des indicateurs clés de caractérisation répartis dans les familles précitées.

2.2.4.1 Les systèmes de classification

Les principaux types de classement des composants et matériaux de construction s'effectuent :

- par fonctionnalité, usage ou destination : matériaux pour le gros œuvre, le second œuvre, la construction, la protection,
- par typologie de matière constitutive du matériau ou du composant : matière primaire, matière secondaire, matière métallique, organique, minérale ou composite,
- par point de vue de la conception en construction ie les matériaux pouvant être considérés sous l'angle des procédés de fabrication, de l'environnement productif local et sous l'angle des filières constructives, modes ou procédés constructifs majeurs,
- enfin, par type d'usage en fonction de l'application liée à l'époque et aux tendances historiques (moderne, contemporain, traditionnel..).

Les destinations ou usages sont différenciés en fonction de la catégorie d'emploi, gros œuvre, second œuvre et/ou de terrain.

Les matières constitutives peuvent être primaires (première utilisation) ou secondaire (ré-utilisation), naturelles, artificielles ou synthétiques :

Types de classement	Sous classement	Définitions
Par l'usage ou l'aptitude à la fonction	<ul style="list-style-type: none"> - Matériaux du gros œuvre GO - Matériaux du second œuvre SO 	
Matériaux de terrain	Distinction par l'usage (aptitude à la fonction), selon les domaines d'emploi et les caractéristiques <ul style="list-style-type: none"> ⇒ matériaux de construction : objet : résister aux forces importantes ⇒ matériaux de protection : objet : résister aux forces importantes, enrober, protéger les matériaux de construction. 	Un matériau de construction ¹ est finalement un usage possible de la matière, transformée en matériau.
Par la clé d'entrée « matière » primaire (première utilisation) ou secondaire (recyclage)	Naturelles	Matières issues de la « nature », directement utilisées par l'homme : laine, bois, cuir, coton, pierre
	Artificielles	Matières issues de la nature mais transformées par l'homme avant utilisation : métaux issus du minerai, verre fabriqué à partir de silice
	Synthétiques	Matières premières issues de la nature (ex pétrole) mais créées par l'homme à partir de procédés chimiques, ce qui les différencie des autres matériaux : matières plastiques

Tableau 14 : Proposition de classement des matériaux et composants de construction par type d'usage et de matières constitutives.

La science des matériaux de construction propose, quant à elle, une typologie basée sur la matière constitutive de tout corps ayant une réalité tangible :

¹ Matériau de construction : matériau utilisé dans le secteur de la construction, bâtiment et travaux publics.

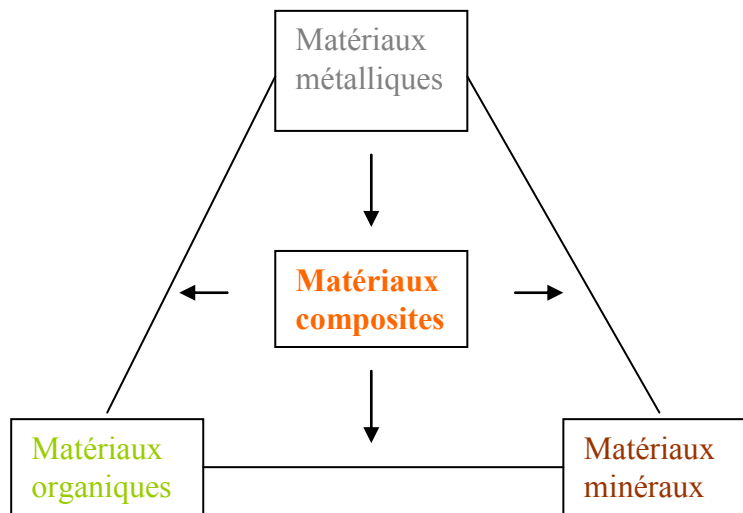


Figure 10 : Proposition de synthèse des familles « officielles » de la science des matériaux.

Légende :

- **minéraux** : roches, céramiques¹, verres
- **métalliques** : métaux ou alliages de métaux ; les métaux sont définis comme des éléments chimiques pouvant former des liaisons métalliques et perdre des électrons pour former des cations, et/ou liaisons ioniques dans le cas des alcalins. Les « alliages » de métaux sont une combinaison d'un métal avec plusieurs autres éléments pour en améliorer les caractéristiques / propriétés notamment mécaniques.
- **organiques** : contenant de la matière organique², ie matière carbonée provenant d'êtres vivants ou non, végétaux ou animaux. Plus spécifiquement, matière capable de se décomposer ou de l'être. Les composés organiques (ex plastiques PE, PET, PVC, PS) ne sont ainsi pas considérés comme organiques car ils se décomposent lentement.

Le croisement de la science des matériaux et des usages de terrains peut donner ce type de représentation avec, en perspective, un axe « passé – présent – futur » :

¹ Ensemble des objets fabriqués en terre et qui ont subi au cours d'une cuisson une transformation physico-chimique irréversible. On distingue les céramiques dites « utilitaires » (poteries) des céramiques d'art et des céramiques industrielles (oxydes, carbures, nitrures)

² On distingue la matière organique « fossile » d'origine animale ou végétale (charbon, pétrole) de la matière organique récente, d'origine également animale ou végétale (tourbe)

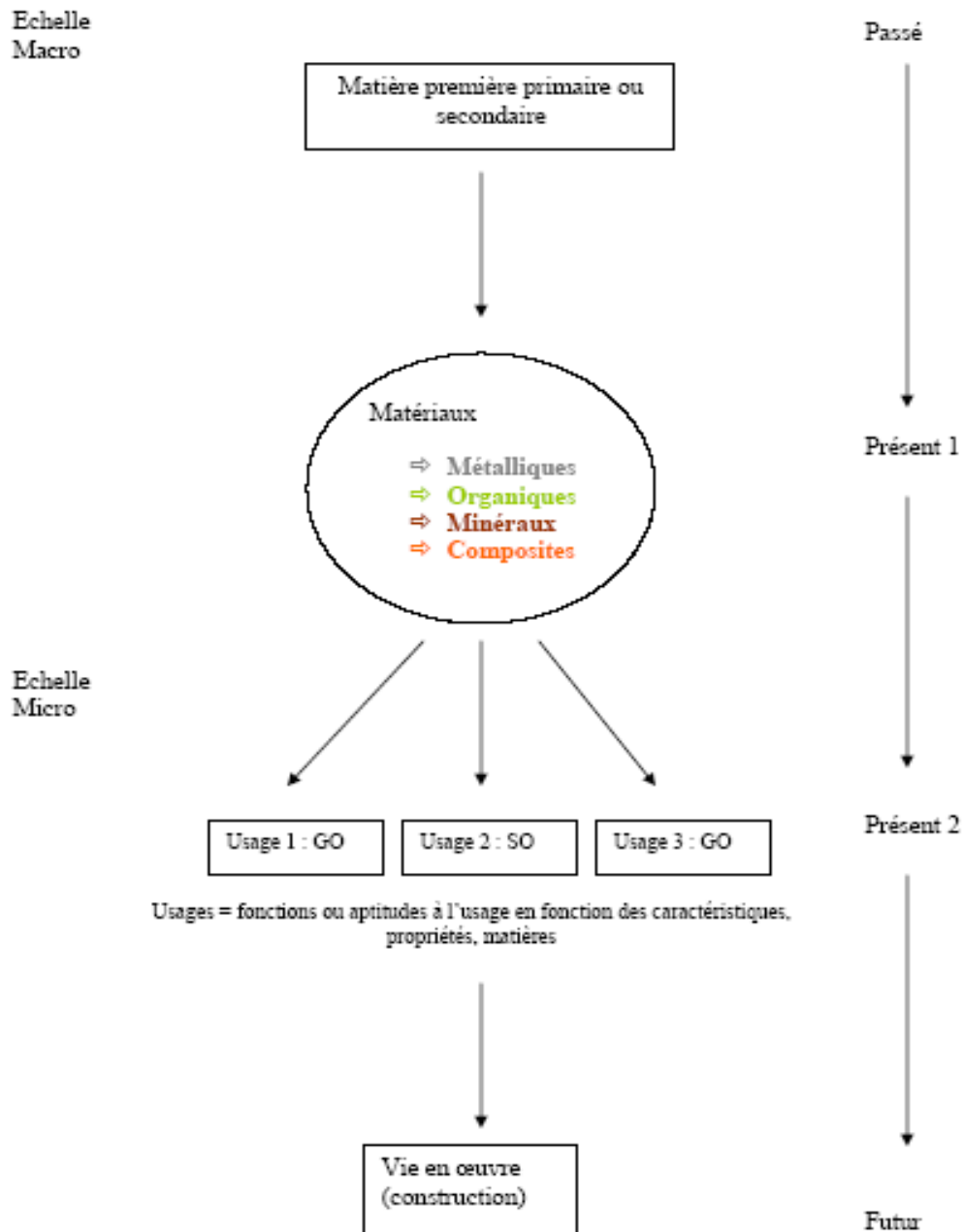


Figure 11 : Proposition de classement croisé entre la science des matériaux et les usages de terrain.

Par procédé constructif majeur, on entend un procédé permettant la réalisation d'une solution constructive mais soulevant un problème de conception récurrent.

Les procédés constructifs permettent de proposer des solutions de construction adaptées par type de matériau. Ils sont le fruit d'une interaction ingénierie / conception et suscitent des initiatives, nouveautés, innovations propres à l'environnement d'exécution.

Neufs procédés « constructifs » soulèvent des problèmes considérés comme « majeurs » d'un point de vue de la conception (ingénierale et architecturale) [DESHAYES, 2005]⁶⁰:

- 1- la thermique de l'enveloppe (ponts thermiques)
- 2- la gestion des dilatations
- 3- les infiltrations d'eau / remontées par capillarité (ponts hydrauliques)
- 4- le traitement des nuisances acoustiques

- 5- l'effet structurel et les descentes de charge
- 6- la gestion des déformations extérieures dues aux pressions extérieures (contreventement)
- 7- le travail de la structure
- 8- le tramage (espaces reliés, régularité, orientation du bâti)
- 9- le calepinage (assemblage de matériaux différents sur un espace restreint et selon un plan d'exécution précis)

Le type et l'époque historique d'application permettent enfin de proposer une répartition pour les matériaux bruts :

BOIS – VERRE – ACIER – PLASTIQUE – MINÉRAUX -

Applications modernes	Applications modernes et traditionnelles	Applications traditionnelles
<ul style="list-style-type: none"> - Acier - Aluminium - Béton - Bitume - Laine de roche - Laine de verre - Pavés - Plaque de plâtre - PVC 	<ul style="list-style-type: none"> - Bois - Chaux - Mortier - Terre cuite - Verre - Plâtre - Plomb - Zinc 	<ul style="list-style-type: none"> - Ardoise - Bamboo - Lauze - Paille - Pierre - Terre crue

Tableau 15 : Les principaux matériaux de construction (voir matériaux de terrain) avec applications liées.

En complément de cette approche scientifique, il existe deux autres systèmes de classement des matériaux / produits de construction utilisés par les acteurs du monde de la construction : le système UNICLASS et le classement proposé par l'Union des Techniciens et Economistes de la construction « UNTEC ».

Le Système UNICLASS ou « Unified Classification for the Construction Industry » est une classification unifiée adaptée à l'industrie de la construction ; rédigé en 1997 en Grande Bretagne par le CPIC « Construction Project Information Committee » représentant les quatre principaux organismes impliqués dans la construction en Grande Bretagne : la confédération de la construction (Construction Confederation), l'institut royal des architectes britanniques (the Royal Institute of British Architects), l'institut royal des maîtres d'œuvres agréés (The Royal Institution of Chartered Surveyors) et l'institution royale des services ingénierie du bâtiment (the Chartered Institution of Building Services Engineers).

UNICLASS est spécifiquement adapté au classement des produits, systèmes constructifs, bâtiments, métiers et ouvrages.

Il est composé de quinze tables qui décrivent chacune différentes facettes de l'information dans la construction ; chaque table peut être utilisée indépendamment à partir d'un type particulier d'informations mais les informations de différentes tables peuvent être facilement combinées pour classer des sujets complexes.

Contents [hide]	
1	Uniclass Tables
1.1	Table A (Form of Information)
1.2	Table B (Subject disciplines)
1.3	Table C (Management)
1.4	Table D (Facilities)
1.5	Table E (Construction Entities)
1.6	Table F (Spaces)
1.7	Table G (Elements for buildings)
1.8	Table H (Elements for civil engineering works)
1.9	Table J (Work Sections for buildings)
1.10	Table K (Work Sections for Civil Engineering Works)
1.11	Table L (Construction products)
1.12	Table M (Construction aids)
1.13	Table N (Properties and characteristics)
1.14	Table P (Materials)
1.15	Table Q (Universal Decimal Classification)
2	Composition of complex codes
3	See also
4	External links

Tableau 16 : Table d'entrée du système de classification UNICLASS¹, CPI.

Les tables les plus intéressantes et pertinentes pour classer et ordonner les composants et produits de construction faisant l'objet de notre étude sont les tables :

- E « construction entities »
- G « elements for buildings »
- L « construction products »
- N « properties and characteristics ».

Un produit pour l'isolation telle qu'une laine de lin ou de chanvre, matériau bio-sourcé et utilisé en complexe sous toiture d'un bâtiment, peut ainsi être classé de la manière suivante selon UNICLASS.

E8 – BUILDINGS / G24 ROOFS / L2 COMPLETE CONSTRUCTION ENTITIES AND PRODUCTS / N3 PERFORMANCE

Le classement proposé par l'UNTEC ou « méthode UNTEC », permet en France l'estimation de bâtiments neufs et anciens; créé en 1978 [UNTEC, 1978]⁶¹ et réactualisé depuis 1988 propose, quant à lui, une catégorisation par type d'ouvrages (bâtiments) et par type d'usages (CA à CL : habitation, scolaire, tertiaire, culturel, hospitalier etc...) et décrit ensuite les types d'infrastructures ou « systèmes constructifs » composant le bâtiment :

- A11 & A12 « encaissements et fondations » jusque A 33 « équipements de parachèvement »
- B « préparation, aménagements et démolition »
- C « réseaux et aménagements spécifiques »

¹ CPI – Construction Project Information www.productioninformation.org/Uniclass.asp

Le même isolant laine de chanvre serait ainsi catégorisé de la manière suivante :

**CA BATIMENTS A USAGE D'HABITATION – A22 TOITURES
– A222.2 ISOLATION DES COUVERTURES**

Le classement « méthode UNTEC » français est moins précis que celui proposé par UNICLASS en Grande Bretagne; ce dernier présente l'avantage d'aborder à la fois matériau / produit / système constructif et enveloppe globale (bâtiment).

Nous proposons dans le cadre de notre étude de retenir la méthode UNICLASS anglaise, d'ailleurs déjà utilisée par un outil¹ d'aide à la prescription d'éco-solutions pour la construction, en lien avec le SMQE BREEAM et ECO-HOMES.

Un croisement classement scientifique / classement opérationnel de terrain est possible.

Clé 1	Clé 2	Clé 3	Clé 4	Clé 5	Clé 6	Clé 7	Clé 8	Clé 9	Clé 10
Matière première primaire	Matériau naturel	Matériau métallique	Application moderne	Matériaux de construction	Matériaux du gros œuvre	Uniclass G « Elements for building »	Uniclass L « construction products »	Uniclass N « properties and characteristics »'	Solutions constructives (cumul possible)
Matière première secondaire	Matériau artificiel	Matériau minéral	Application moderne et traditionnelle	Matériaux de protection	Matériaux du second oeuvre	G1	L1	N1	1 à 9
	Matériau synthétique	Matériau organique	Application traditionnelle			G2	L2	N2	1-3 ou 2-4
		Matériau composite				1-5 ou 3-8
						G77	L8	N9	

Tableau 17 : Proposition de classification croisée pour la comparaison de matériaux conventionnels et d'éco-matériaux au sens retenu dans notre étude.

2.2.4.2 Les typologies d'indicateurs.

Comme précisé au paragraphe 2.2.3 « choix des critères de performance » pour chaque famille de matériaux / composants de construction qui fera l'objet de notre étude, nous proposons de sélectionner principalement un certain nombre d'indicateurs techniques, économiques et financiers considérés comme incontournables pour pouvoir comparer individuellement mais également au sein de systèmes constructifs élaborés un produit / matériau de construction avec un autre, et ce pour une même fonction (un même usage: par exemple un isolant isole sur une durée de vie théorique qui correspond à la garantie fabricant, accompagnée d'une mise en œuvre correcte effectuée par l'artisan).

La définition des critères techniques, économiques et financiers sur laquelle nous nous basons pour caractériser les matériaux et composants étudiés reprend celle présentée au paragraphe 1.2.1 « contexte de l'analyse multicritères ». Un matériau ou composant de construction n'est bien évidemment jamais mis en œuvre seul, il remplit toujours sa fonction dans le cadre d'un système constructif composé d'associations de matériaux et composants.

Il est donc possible de se baser systématiquement sur le système constructif le plus représentatif de l'association des matériaux et composants considérés, en ramenant nos données à la notion d'unité fonctionnelle (UF) [CSTB, 2005]⁶² qui est l'unité de référence de compte à laquelle se réfère une analyse environnementale : par exemple un m² en œuvre pour un produit de couverture, pour un produit de cloisonnement ou un mur. Cette unité dépend du service rendu par le produit.

¹ Greenspec – National Green Specification, disponible sur www.greenspec.co.uk

Un cas d'application pour un matériau de construction d'innovation récent : le bloc monomur pierre ponce, auto-porteur et auto-isolant, comparé à un système constructif équivalent (remplissant la même fonction): l'association parpaing béton et complexe isolant rapporté à l'intérieur (laine de verre) :



Choix de l'unité fonctionnelle (UF) : 1 m ² de mur porteur isolé de 30 cm d'épaisseur (mur fini)	1. Indicateurs techniques (liste non exhaustive)	2. Indicateurs financier (liste non exhaustive))	3. Indicateurs économiques (liste non exhaustive)
<p>Bloc monomur pierre ponce</p>  <p>/</p> <p>Bloc parpaing béton et laine minérale</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - 1.1 Valeur thermique U (par comparaison à valeur réglementaire RT 2005 ou 2010) de référence - 1.2 Inertie thermique I de transmission (en heures) - 1.3 Réduction acoustique Rw (en dB) - 1.4 Déperditions linéiques (ponts thermiques) - 1.5 Perméabilité à la diffusion de vapeur d'eau - 1.6 Nombre de matériaux / composants utilisés au m² de mur (UF) - 1.7 Poids du système constructif - 1.8 Durée de vie théorique du système (DVT) - 1.9 Nb de remplacements sur DVT (0, 1, 2 ou 3...) 	<ul style="list-style-type: none"> - 2.1 Temps de retour sur investissement (fonction des surcoûts initiaux et des bénéfices engendrés sur DVT) - 2.2 Taux d'actualisation des valeurs monétaires - 2.3 Valeur actualisée (fonction du taux d'actualisation choisi) des coûts et bénéfices, sur DVT. - 2.4 Ratio coûts / bénéfices actualisés, à court, moyen et long terme - 2.5 Prime / subvention éventuelle pour recours à des matériaux / produits locaux 	<ul style="list-style-type: none"> - 3.1 Coût « produit » pour la réalisation de l'unité fonctionnelle - 3.2 Coût main d'œuvre pour 1 unité fonctionnelle - 3.3 Surcoût initial système X / système Y - 3.4 Coût de réversibilité (coût de remplacement sur DVT, fonction de la DVT et du nb de remplacements sur la DVT) - 3.5 Coût total en cycle de vie ou « coût total sur DVT » - 3.6 Bénéfices sur DVT - 3.7 Coût taxation carbone (hypothèse)

Tableau 18 : Proposition d'indicateurs pour étudier deux solutions constructives : l'une considérée comme issue de la filière éco-construction, la seconde considérée comme conventionnelle.

De part la nature et la fonction des matériaux et composants, pris individuellement et regroupés au sein de systèmes constructifs répondant aux problématiques de conception « majeures » (solutions constructives), les indicateurs des familles de critères précitées peuvent être identiques ou très différents : le coût de la main d'œuvre et des produits pour une unité fonctionnelle reste un critère inchangé par exemple entre 1 m² de mur porteur isolé et 1 m² de mur peint ou enduit; par contre, les problématiques réglementaires et les critères techniques s'y rapportant sont foncièrement différents : coefficients thermiques, déperditions linéiques pour un m² de mur porteur auto-isolé, stabilité dimensionnelle et module d'élasticité pour une peinture ou un enduit.

Le nombre de remplacements sur la DVT est un critère pouvant être appliqué aux deux systèmes constructifs.

A chaque famille de produits et/ou solutions constructives étudiées correspondent donc des critères techniques, financiers et économiques identiques mais aussi différents qu'il faut adapter au cas par cas.

Nous travaillons néanmoins sur la comparaison de matériaux et composants considérés comme « éco » au sens éco-conception, voir définition retenue en 1.3.1 : éco-matériaux issus de démarches minimalistes d'éco-conception menées par le fabricant / fournisseur.

Sans rentrer dans l'analyse en cycle de vie exhaustive, il est possible de légitimer les choix « éco » par rapport aux solutions conventionnelles de référence par une sélection de critères issus d'une approche de management durable appliquée au secteur de la construction.

Ces critères de caractérisation environnementale et santé sont proposés depuis 2005 par un organisme présent en Nord Pas de Calais¹, pour commencer à aborder la thématique de l'éco-conception avec des fabricants et distributeurs de matériaux et produits de construction régionaux. Cette région est pionnière, avec d'autres² en France, sur la communication d'informations favorisant le marché de l'éco-construction, notamment sur les matériaux, produits, systèmes constructifs alternatifs et énergies renouvelables.

Fiche de données environnementales et sanitaires

Voir matériau

Systeme bois isolant végétal

Critères de sélection "eco-matériaux"		
<input checked="" type="checkbox"/>	Avis technique	non mais des assurances anglaises ont déjà couvert les réalisations (voir www.mdh-insurance.co.uk)
<input checked="" type="checkbox"/>	Certification, label	non, autodéclaration "carbon neutral" suite au bilan carbone unitaire
<input checked="" type="checkbox"/>	Matière première renouvelable ou recyclée	oui, par le type de matière première d'origine agricole
<input checked="" type="checkbox"/>	Consommation réduite de ressources (eau, énergie : fabrication, transport...)	oui, mais à caractériser via ACV ou bilan énergétique à minima (énergie grise..)
<input checked="" type="checkbox"/>	Produit recyclable ou valorisable	oui complètement à 100 %
<input checked="" type="checkbox"/>	Absence de nocivité pour tout le cycle de vie	oui, à valider par ACV.
<input checked="" type="checkbox"/>	Lieu de fabrication (régional)	production hors nord pas de calais (grande bretagne) mais concept basé sur la délocalisation des sites de production "flying production site" à proximité des chantiers (10 km maxi)

Figure 12 : Proposition de critères simplifiés permettant la qualification « éco » d'un matériau ou composant de construction, [CD2E, 2005].

Nous proposons de retenir les critères suivants, dans les champs environnementaux et sanitaires : type de matières premières – énergie grise – recyclabilité – toxicité – lieu de fabrication

- **Type de matières premières constitutives** : matière première primaire ou secondaire, renouvelable ou non renouvelable. Une matière première primaire est une matière première de première transformation, qui n'a pas été utilisée / valorisée au sein d'un produit manufacturé. Si cette matière est renouvelable, elle ne pose en général pas de problèmes de disponibilités pour les générations futures. Une matière première secondaire est issue des filières de valorisation matières / recyclage, et donc de produits recyclés. Le fait de ré-valoriser les produits recyclés en matières première secondaire permet, en fonction des taux de recyclabilité, d'alimenter une boucle quasi continue de revalorisation et d'éviter les solutions ultimes polluantes d'élimination de produits en fin de vie, impactantes et coûteuses pour l'environnement et la société.

¹ Cd2e – Création Développement Eco-Entreprises, voir « base de données des éco-matériaux » disponible sur www.cd2e.com

² Voir les initiatives développées par INEED et NEOPOLIS dans la Drôme, notamment la première formation de technico-commercial spécialisé en éco-matériaux / éco-construction www.ineedra.org

- **Energie grise** : quantité d'énergie nécessaire en phase process pour fabriquer une unité de volume du matériau / composant, autrement dit « énergie grise » en phase process, exprimée en unité énergétique (kwh ou joules) par m³ ou tonne ; l'énergie grise n'est qu'un indicateur d'éco-conception parmi les autres mais présente le mérite de la simplicité de lecture. Le pendant de l'énergie grise est la traduction de la dépense énergétique en équivalent carbone, directement en lien avec la thématique du réchauffement climatique et des gaz à effet de serre d'origine anthropique.
- **Recyclabilité en fin de vie** : tous les matériaux, composants et systèmes constructifs ont une durée de vie théorique (DVT) à l'issue de laquelle ils sont déconstruits pour mise en décharge (mauvaise solution), recyclage (complet ou partiel) et /ou valorisation intermédiaire ou ultime. Le taux de recyclabilité d'un produit exprimé en % dépend largement des matières premières utilisées en amont, du process de fabrication et de conception appliquée par le fabricant. Les matériaux et composants à fort potentiel de recyclage doivent être privilégiés dans une logique d'éco-construction mais également de management environnemental du fabricant.
- **Toxicité pour tout le cycle de vie** : la toxicité d'un matériau et composant sur son cycle de vie concerne l'impact des différents flux correspondant aux étapes du cycle de vie, sur l'environnement (milieu naturel) et la santé (des opérateurs, des occupants d'un bâtiment sur sa durée de vie). Sont concernées, par exemple, les émissions dans l'air de particules bio-assimilables par l'organisme humain en phase utilisation (mise en oeuvre sur chantier, rejets d'effluents aqueux dans le milieu naturel en phase process, émissions de composés organiques volatils dans l'air intérieur d'un bâtiment)
- **Lieu de fabrication** : à l'heure où le transport des biens et services impacte de plus en plus les modèles de développement économique, il est possible d'introduire le concept de « sourcing local » ou « localisation géographique préférentielle » pour repositionner la valeur ajoutée générée par une activité au plus près possible des territoires de proximité ; le coût des énergies non renouvelables devrait à terme favoriser les filières économiques locales et circuits courts « production – distribution – consommation ». La commande publique (institutions) a depuis peu l'opportunité d'inclure dans ses procédures de passation de marchés des clauses environnementales favorisant les produits issus de filières courtes, moins impactants d'un point de vue réchauffement climatique que des produits importés sur de longues distances (critère : émissions de CO₂ liées à la phase transport, ramenées à la tonne /kilomètre¹)

En lien avec le critère « lieu de fabrication » relevant directement de l'approche de management durable, il est possible d'affiner l'approche environnement et santé par un volet sociétal concernant l'impact sur l'économie (locale ou non) de la mise sur le marché d'un matériau / composant de construction.

L'approche est proposée de manière globale par le concept d'éco-socio-conception qui vise à la recherche d'une éco-socio-efficience « *limiter les impacts sur l'environnement mais également les impacts négatifs sociaux tout au long du cycle de vie* » [AFNOR, 2003]⁶³. Cette approche est reprise dans le document cadre de la SD 21000 (« *Sustainable Development* », norme FD X30-021 sur le développement durable dans les entreprises,) [AFNOR, 2003]⁶⁴.

Traduction en langage opérationnel, un organisme de recherche basé en Suisse, Lignum Fribourg, dont les activités principales concernent l'étude et le suivi de la filière bois

¹ Voir Bilan carbone de l'ADEME <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=15729&m=3&catid=15731>

helvète, a consacré en 2004 6 mois d'activités à l'étude socio-économique du bois, de la source « la forêt » au produit fini « une menuiserie extérieure » en bois.

L'étude conclut, après avoir comptabilisé les heures de travail nécessaires pour chaque étape de la transformation du bois en menuiserie, à un volume horaire de 200 heures nécessaires pour produire une fenêtre en bois.

Par comparaison, une fenêtre en aluminium en nécessite 20, d'où un rapport de 1 à 10 entre les deux produits « fenêtre » remplissant la même fonction, et à performance thermique identique.



Fenêtre en bois

200 heures de travail*



Fenêtre en aluminium

20 heures de travail*

Figure 13 : Nombre d'heures de travail générées en fabrication, jusqu'à la mise à disposition sur le marché Suisse, par une fenêtre en bois et une fenêtre en aluminium, [Lignum, Fribourg, 2004].

L'information peut être prise en sens inverse : une fenêtre en aluminium ne génère que 20 heures de travail, alors qu'une fenêtre en bois, en génère quant à elle 200. L'interprétation brute de ces données permet a priori de positionner la fenêtre en bois plus favorablement que l'option aluminium.

D'autres paramètres sont évidemment à prendre en compte pour affiner l'analyse :

- volume horaire hebdomadaire
- taux d'imposition du travail
- volumes de production des unités de fabrication
- nombre de salariés nécessaires par volume de production
- évolution du cours de matières premières ...

Agglomérer toutes les données économiques d'une filière pour raisonner économiquement en cycle de vie et trouver une corrélation sociale permet d'ajouter aux critères « conventionnels » de l'analyse en cycle de vie une dimension plus sociale (xx heures de travail équivalent à xxx emplois en « hommes équivalents ») qui semble correspondre à une logique privilégiant l'investissement humain plutôt que l'investissement en capital ou moyens de production.

Même si le critère semble séduisant, les conclusions tirées n'en sont pas moins difficiles d'analyse : à volume de production identique, soit 50 000 tonnes de blocs par an vendus sur une zone de chalandise de moins de 50 km, une unité de production nécessite pour tourner 5 temps pleins et 6 temps partiels (maintenance), une autre nécessitera elle 12 temps pleins et 3 temps partiels. Le type de production et le taux de mécanisation sont différents. Quelle est l'entreprise qui contribue le plus, via son activité, à la création de richesse et de valeur ajoutée, donc d'impact positif sur l'économie locale ?

Des écarts plus importants permettent de présumer d'un « meilleur » impact social: à volume de production différent, une PME emploie 15 personnes pour un volume de production annuel de 50000 tonnes; un industriel, filiale d'une multinationale, produit 150 000 tonnes par an et fait vivre 8 salariés directs.

Le chiffre d'affaires et le résultat net sont différents ; la PME investit en grosse partie ses bénéfices en capital humain ou technique de production, avec amélioration de certaines conditions de travail sur postes par un taux de mécanisation progressivement plus important, la filiale de multinationale redistribue une grosse partie de son résultat net aux actionnaires, le taux de mécanisation déjà très important ne progresse pas, compte tenu d'une augmentation des volumes de production, le nombre de temps partiel dédié à la maintenance progresse de 3 unités.

Une commande publique qui a l'opportunité, dans les procédures d'appel d'offre de ses marchés, d'inclure des critères sociétaux et environnementaux, se retrouve confrontée à choisir entre le bloc de la PME locale régionale et le bloc de la multinationale implantée en France à 500 km de distance.

Nous proposons dans la mesure de l'existence de données économiques suffisantes, de prendre en compte ce critère économique mais social supplémentaire qui viendra compléter le critère « localisation géographique préférentielle » développé en justification environnementale et sanitaire.

2.2.4.3 Les critères partagés avec les acteurs de terrain : critères techniques et économiques plutôt que critères environnementaux et sanitaires ?

Le référentiel de mesures que nous proposons d'élaborer a pour principal objectif de proposer des argumentaires simplifiés aux professionnels de la construction « acteurs de terrain » confrontés à l'émergence d'une demande de plus en plus prononcée pour :

- la qualité environnementale,
- le confort et la santé,
- la réduction des consommations d'énergie.

dans le neuf et en réhabilitation / rénovation du bâti ancien.

Le marché du « *construire durable* » est en pleine émergence, avec, en perspective, les 16,1 millions de logements anciens à rénover dont 63 % ont été construits avant 1975¹ et la première réglementation thermique, et les 600 milliards d'euros de coût estimé pour la réhabilitation thermique du parc immobilier français. En perspective également, les 350 000 mises en chantier de logements neufs chaque année.

Pour différents acteurs de terrain du monde de la construction en France, construire durable signifie :

- « être capable d'expliquer qu'un produit durable, plus cher, s'exploitera et se vendra mieux » (François BERTIERE, PDG de Bouygues Immobilier),

« seules les entreprises qui auront engagé la réflexion sauront prendre le virage » (François Xavier CLEDAT, PDG de Spie Batignolles),

¹ Le moniteur hors série, « Construire Durable », mars 2008. www.lemoniteur.fr

« avec le Grenelle de l'environnement, nous assistons à une accélération inimaginable il y a quelques années » ; « la certification HQE est dépassée » ; « les professionnels ayant admis qu'ils savaient construire des bâtiments à énergie positive, le débat a porté sur les délais » (Alain MAUGARD, président du CSTB),

« tous les produits de construction sont à base minérale, organique, végétale ou animale, ils sont tous issus du sol ; placer le débat sur le caractère naturel de tel ou tel isolant est un non sens, la question est de savoir comment on transforme la matière première » (Sylvie CHARBONNIER, présidente de la commission technique du Filmm),

« les fiches de déclaration environnementales et sanitaires restent difficiles d'accès pour des prescripteurs non avertis, un étiquetage simplifié généralisé à tous les produits et matériaux de construction est donc attendu avec impatience » (François LEFORT, adjoint qualité et développement durable, DGUHC),

« déchets, facturer le service – 40 % des déchets (380 millions de tonnes) proviennent du BTP » « le volume des déchets produits va s'accroître » (Laurent CHATEAU, expert ADEME des déchets du BTP),

« tirer le marché vers le développement durable, Geoxia s'est lancé dans l'aventure de la bonne maison car c'est une volonté de l'entreprise de tirer le marché vers le développement durable » « nous sommes quasiment les seuls à pouvoir le faire : créer un prototype et lancer une maison à ce prix là » « au final nous pensons qu'il y a un certain nombre d'éco-citoyens qui ont envie d'avoir une maison propre » (François RACHLIN, pôle technologies de Geoxia),

« le coût global devrait être un argument commercial : le coût global prend en compte la construction mais aussi le surcoût lié à l'amélioration du fonctionnement, voire au recyclage du bâtiment » (Jacques Philippe CHARPY, président de l'UNTEC).

Ces quelques témoignages d'acteurs de terrain attestent de la nouvelle viabilité et la rentabilité des marchés « environnement et construction » et des nécessaires besoins de formation des acteurs en terme de savoir-faire sur les nouveaux métiers.

Le besoin d'adaptation des acteurs face aux nouvelles attentes des clients est réel : passage d'un métier de mise en œuvre / pose à celui de prescripteurs / poseur ; proposition de solutions globales intégrant diagnostic – devis / relationnel clientèle / réalisation des travaux / solutions de financement.

Le positionnement futur des entreprises qui auront intégré les couples « nouvelles techniques et matériaux / nouveaux savoir faire / démarche commerciale qualitative / approche globale » sur ces marchés du développement durable appliqué au bâtiment, tandis que celles qui n'auront pas anticipé suivront.

Les matériaux, systèmes et techniques dites « nouvelles », correspondant à ces nouvelles exigences de marché (attentes des éco-consommateurs, évolution des réglementations thermiques, mise en avant des initiatives privées et publiques avant-gardistes) sont, pour le gros des troupes, méconnus, peu maîtrisés et donc difficilement vendables par les entreprises qui réalisent des constructions traditionnelles.

Même si les arguments écologiques et de santé sont de plus attendus par une clientèle éco-consommatrice, les principaux critères de choix demeurent : service rendu, qualité et durabilité au sens technique d'un produit ou matériau, prix, subventions possibles locales ou nationales, solution de financement liée.

Par contre, des matériaux et produits intégrant les nouvelles exigences réglementaires (par exemple un isolant spécifique pour le confort d'été en sous toiture), et synonymes de qualité et de confort supplémentaire par rapport à d'autres plus conventionnels présentent souvent un écobilan plus intéressant sur leur cycle de vie ; l'argument technique supérieur sert alors à légitimer un coût plus important lié au gain environnemental et sanitaire et surtout aux faibles volumes présents sur le marché ou à la taille de l'entreprise ayant innové en terme d'éco-conception.

C'est aujourd'hui presque toujours le cas pour les éco-matériaux les plus connus : plus chers que les matériaux conventionnels, plus éco-conçus mais techniquement supérieurs d'un point de vue « aptitude à la fonction » et « caractéristiques techniques intrinsèques » aux matériaux conventionnels.

Il semble donc cohérent d'adapter le référentiel et son faisceau d'indicateurs à cette réalité de marché mais surtout aux attentes des professionnels qui souhaitent promouvoir des caractéristiques écologiques sur leurs prestations puisque la demande de la clientèle les y pousse, mais celle-ci oriente principalement son choix en fonction de critères plus conventionnels liés aux risques assurances et désordres techniques : critères techniques, économiques et financiers.

Ces trois familles de critères sont donc mise en avant sur les classes de produits étudiés, tout en légitimant l'approche éco par des critères environnementaux, de santé et sociétaux complémentaires.

2.2.4.4 Le langage commun monétaire basé sur le raisonnement en coûts complets en cycle de vie « life cycle costing »

Nous avons choisi volontairement de baser notre raisonnement sur l'analyse en cycle de vie (ACV) des critères techniques, économiques et financiers des éco-matériaux par rapport aux solutions conventionnelles. Les critères environnementaux, de santé et sociétaux complémentaires viennent légitimer la caractérisation « éco » des matériaux et composants considérés comme « éco-conçus ».

L'analyse en cycle de vie appliquée à des critères d'ordre économiques et financiers permet, comme présenté au paragraphe 1.2.3 « approche monétaire du cycle de vie », d'évaluer « *plusieurs solutions d'investissement à partir du coût initial et des dépenses d'exploitation et d'entretien pour la durée de vie économique du système constructif* ».

Le raisonnement en coûts complets en cycle de vie, autrement dit coût global a été défini par les normes internationales ISO 15686 comme une technique permettant des comparaisons d'évaluation de coûts, à une période de temps donnée, prenant en considération tous les facteurs économiques en terme de coûts initiaux et de coûts opérationnels futurs [GLUCH & BAUMANN, 2000]⁶⁵.

Dans un cas idéal, le coût global comme outil est utilisé pour optimiser la performance d'un produit et les coûts sur la durée de vie du produit pour l'acquéreur [HENN, 1993]⁶⁶.

La plupart des consommateurs, quelque soit le secteur d'activité, utilise le raisonnement LCC de manière consciente ou inconsciente, dans un processus de choix. Pour l'achat d'une voiture par exemple, le prix de vente initial intervient, auquel on peut rajouter le coût de maintenance régulière, le coût lié à la consommation de fuel pour le fonctionnement, le coût et la fréquence de remplacement d'éléments cruciaux, ainsi que la valeur résiduelle au niveau de la fin de vie, avant recyclage, mise en décharge ou démantèlement pour pièces détachées. Le même principe peut s'appliquer au secteur du bâtiment.

Les impacts environnementaux et de santé, associés aux activités de construction de bâtiments, et de manière plus globale à l'environnement bâti, peuvent donc être significatifs et doivent être pris en considération le plus tôt possible dans l'étape de conception (planification). Ces impacts peuvent s'exprimer à toutes les phases de la vie d'un bâtiment, peuvent être locaux, régionaux, globaux ou une combinaison des trois.

L'intégration de la version « économique et financière » du raisonnement en cycle de vie présente un outil puissant pour améliorer la durabilité de l'environnement bâti : combiner une évaluation économique et environnementale pour obtenir les solutions représentant la meilleure valeur ajoutée, au sens financier et environnemental, permet d'apporter une contribution très significative à l'obtention de résultats intéressants en terme de management durable appliqué au secteur de la construction.

Dans le secteur du bâtiment, les premières données disponibles remontent aux années 1960 : le département de la défense américain a commencé à utiliser le raisonnement en coûts complets en cycle de vie pour pondérer ses investissements dans les bâtiments militaires.

Derrière la terminologie « Life cycle cost » (LCC) on peut trouver différents outils qui ont tous été adaptés à différents contextes comme, par exemple, l'investissement dans le secteur du bâtiment ; en ajustant quelques variables dans les équations, les outils deviennent adaptés au secteur de l'environnement.

Les outils ont des noms différents mais sont en fait très proches dans leur fonctionnement et leur structure.

Le tableau qui suit présente les différentes terminologies utilisées au niveau international se référant au coût global :

Concept	Définitions, descriptions	Catégories de coûts
Full cost accounting (FCA)	Identifie et quantifie la gamme complète de coûts au travers du cycle de vie des produits, de la chaîne de production, du process, du service ou de l'activité [SPITZER, 1993] ⁶⁷	Coûts directs, indirects et intangibles
Full Cost Environmental Accounting (FCEA)	Même concept que précédemment mais avec une mise en avant des éléments environnementaux [SPITZER & ELWOOD, 1995] ⁶⁸	Variables
Total cost assesment (TCA)	Analyse financière sur le long terme de toute la gamme des coûts internes et des économies et investissements [WHITE & BECKER, 1992] ⁶⁹	Coûts internes et économies
Total cost accounting (TCA)	Synonyme pour le TCA ou le FCA [BENNET & JAMES, 1997] ⁷⁰	Coûts conventionnels, coûts cachés, coûts véritables, coûts moins tangibles
Life cycle accounting (LCA)	L'étude spécifique des coûts d'un produit dans un contexte de cycle de vie	Coûts usuels, coûts cachés, coûts véritables et coûts moins tangibles
Life cycle cost assesment (LCCA)	Process systématique pour l'évaluation du coût d'un produit ou d'un service en identifiant les conséquences environnementales et en leur appliquant une valeur monétaire	Variables
Life cycle costing	Somme de tous les coûts d'un produit, d'un process ou d'une activité, sur sa durée de vie complète	Variables
Life cycle costing	Technique permettant la comparaison d'évaluations de coûts sur une période de temps	Variables

	prédéterminée, prenant en considération tous les facteurs économiques, en terme de coûts initiaux, futurs et opérationnels, au sens de la norme ISO 15686	
Full cost pricing	Synonyme de FCA ou de LCC	Voire LCA et LCC
Whole life costing	Synonyme de TCA ou LCC ; plus précisément défini [CLIFT & BOURKE, 1999] ⁷¹ comme la prise en considération systématique de tous les coûts et revenus associés à une acquisition	Coûts initiaux et opérationnels

Tableau 19 : Proposition de synthèse des différentes terminologies des outils valorisant le concept de coût global au niveau international.

Parmi toutes ces définitions, celles qui semblent pouvoir convenir au secteur du bâtiment, et qui plus est, à la décomposition des coûts de systèmes constructifs intermédiaire en coûts de matériaux et composants sont :

- la définition proposée par les TCA « Total Cost Accounting » ou « Total Cost Assesment »,
- celle proposée par le Lyfe Cycle Costing en général,
- celle du Full Cost Princing ou Whole Life Costing.

Dans tous les pays anglo-saxons, les termes « Life Cycle Cost » et « Through life cycle cost » sont utilisés pour décrire la même raisonnement que le Whole Life Costing (WLC). L'expression WLC est utilisée en Angleterre pour décrire le cycle de vie d'un bâtiment, tandis que l'expression LCC (life cycle costing) est utilisée elle pour décrire le cycle de vie d'un matériau.

Au niveau international, LCC est généralement utilisé pour l'approche « bâtiment » et « matériau », ce qui permet d'éviter les confusions [TG4 LCC IN CONSTRUCTION, 2003]⁷².

En terme de méthodologie de calcul, il n'existe pas en Europe de législation spécifique qui demande à ce que les coûts complets en cycle de vie soient pris en considération dans les procédures de conception / construction de bâtiments ; il existe simplement des options notamment pour les commandes publiques.

En Grande Bretagne par exemple, il existe de nombreux documents qui permettent aux autorités nationales ou locales impliquées dans des logiques de commandes de bâtiments de démontrer les plus values à court, moyen et long terme. De nombreuses organisations privées ont également conduit des études permettant un raisonnement en coûts complets.

En Allemagne, un guide pour la construction durable, rédigé en mars 2001, et applicable à tous les bâtiments fédéraux, positionne le raisonnement en coût global en cycle de vie comme incontournable. En Finlande, Suède, Irlande, au Luxembourg et aux Pays Bas, des réglementations ou des guides d'incitations existent également sur la thématique du coût global comme argument facilitant la prise de décision dans le secteur de la construction de bâtiments.

Selon l'ISO 15686, la méthodologie pour calculer les coûts en cycle de vie d'un bâtiment est un processus itératif : à chaque étape du projet de construction, le calcul des coûts complets doit être affiné pour affiner le niveau de certitude « économique » du projet.

Dans les étapes premières de conception, il s'agit d'une première estimation des coûts mais lorsque les décisions d'options techniques et de conception sont établies, une évaluation précise des coûts d'acquisition, d'utilisation et de maintenance, en cycle de vie est obtenue.

Aux étapes initiales, l'évaluation du capital et des autres coûts est souvent basée sur les coûts historiques ramenés à une unité de valeur, en € au m² par exemple. Ces coûts historiques permettent d'incorporer le coût de la main d'œuvre, des matériaux, des composants et les autres coûts connus.

Cependant, il est souvent préférable d'estimer les coûts à partir du projet réel, et non pas d'une base de coûts et de performances historiques considérée comme fiable parce qu'utilisée par un grand nombre d'acteurs.

Le LCC prend également en considération les coûts en fonctionnement et post occupation (fin de vie), l'objectif étant d'arriver à formaliser un plan applicable à toutes les étapes pour améliorer la prise de décision par le client final (l'acquéreur du bâtiment).

Les prévisions initiales ou historiques sont peu à peu remplacées ou affinées par des évaluations plus fines des quantités, des prix, et des performances attendues de composants considérés comme alternatifs (car peu connus ou utilisés), de matériaux, de consommations d'énergie et des services rendus.

Ainsi, pour une bonne prise en considération des coûts complets en cycle de vie, les concepteurs doivent « travailler en collaboration rapprochée avec les chaînes d'approvisionnement, les entreprises de construction, les commanditaires » [**Strategic Forum for Construction, 2002**]⁷³, ce qui se traduit souvent par la formalisation d'équipes intégrées permettant de dégager les meilleurs panels de solutions (solutions multi-critères).

Cette collaboration rapprochée est particulièrement nécessaire pour affiner les prévisions et estimations sur le long terme de la performance des systèmes constructifs, basée sur leur durée de vie prévisionnelle, en particulier, les valeurs des taux de détérioration, de remplacement et/ou de réparation.

Les fabricants et fournisseurs de matériaux et composants peuvent normalement apporter les éléments relatifs à la durabilité technique, au niveau de maintenance et ou de remplacement. Leurs informations sont essentielles à une évaluation objective.

Un autre paramètre incontournable pour raisonner en coûts complets est la fixation arbitraire volontairement choisie d'une durée de vie typique, ce que les anglo-saxons appellent « nominative working life of the asset », qui doit être partagée voire proposée par le « client » final.

Il est ainsi possible de déterminer, en fonction des informations de durabilité précédentes combien de fois les éléments doivent être remplacés, entretenus ou réparés sur leur durée de vie, en conditions normale de mise en œuvre, pour maintenir un niveau correct de performance et élaborer par exemple un planning d'interventions.

Cette durée de vie typique du système constructif, et plus en amont de chaque composant ou matériaux qui remplit sa fonction pendant un laps de temps déterminé, permet d'alimenter ensuite le raisonnement en coût global.

Certains pays, dont la France, ont encore du mal à fixer une durée de vie aux éléments constructifs, ce qui limite par là-même les raisonnements en coût global et favorise la

persistance d'idées contre-productrices comme « la qualité environnementale génère des surcoûts »

Les différentes étapes pendant lesquelles doivent être considérés les coûts pour un raisonnement en coût global peuvent être facilement identifiées :

- la pré-construction et la construction
- la maintenance
- le remplacement
- la démolition

Un modèle tridimensionnel développé par l'Université de CRANFIELD-UK apporte trois niveaux de décision ou d'appréciation, ainsi que des éléments basiques de la construction [Construction Client's Forum], se rapprochant d'ailleurs des problèmes de conception essentiels (solutions constructives) évoqués précédemment :

Trois niveaux de décision : stratégique, système et détail, et les éléments basiques de la construction : structure, enveloppe, services, finitions, fixations etc..

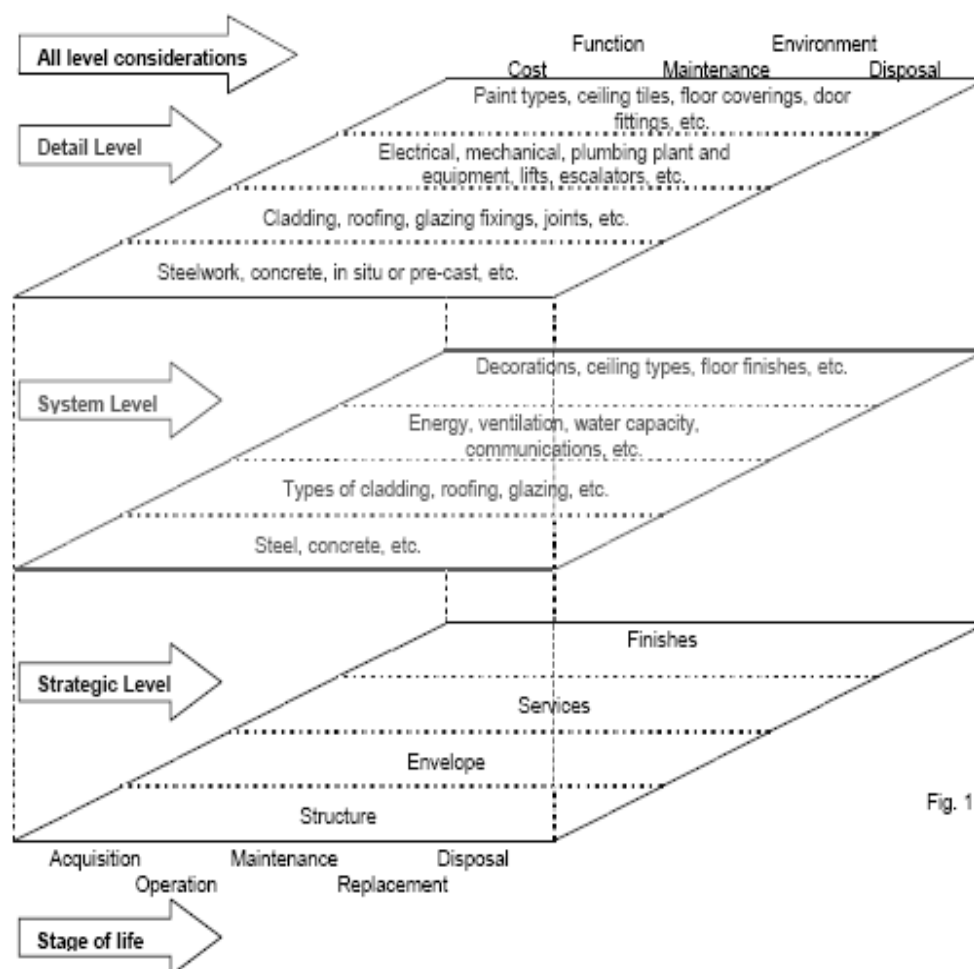


Figure 14 : Modèle tridimensionnel croisant les niveaux de décision avec les éléments basiques détaillés de la construction.

Au niveau de la phase de décision stratégique, les options techniques et esquisses de budget sont identifiées.

L'attention se porte particulièrement sur : la définition des besoins fonctionnels et de performance, les priorités des clients, comme par exemple le taux de retour sur investissement

considéré comme acceptable, la durée de vite typique à considérer pour mener à bien le raisonnement en coûts complets.

Des informations doivent également être données sur : le coût des énergies alternatives, et son évolution prévisionnelle, les imprécisions de connaissances liées à la durabilité technique et fonctionnelle des composants, avant leur dégradation ou leur remplacement, les niveaux de performance à atteindre, le choix d'un taux d'escompte, le taux d'évaluation des valeurs monétaires.

Le détail complet de tous les coûts à considérer pour un raisonnement en coût global peut être proposé comme suit :

Life cycle cost		
	Coûts non liés à la construction	Achat du site de construction
		Evaluation des coûts, des risques, du planning
		Conception et ingénierie
		Administratif
		Financements, intérêts et coût de l'argent
	Coûts liés à la construction	Conception et ingénierie
		Travaux temporaires, nettoyage du site ou travaux de terrassement
		Construction et sous-traitance
		Management du projet et supervision du planning (délais)
	Coûts liés à l'utilisation	Taux et location si applicable
		Assurances
		Coûts énergétiques
		Nettoyage, sécurité, équipements collectifs
		Coûts réglementaires annuels (contrôle sécurité feu par ex)
	Coûts liés à la maintenance	Réparations mineures, remplacement des composants régulièrement
		Perte de confort liée aux opérations de maintenance
		Durée de service rendu par le bâtiment réduite, du fait d'opérations de maintenance non prévues
		Restauration et remplacement d'éléments mineurs pour retrouver leur esthétique et leur performance première
	Coûts liés au remplacement	Restauration et remplacement d'éléments mineurs pour retrouver leur esthétique et leur performance première, à différentes étapes de la durée de vie théorique du bâtiment
Perte d'usage liée aux opérations de remplacement		
Coûts non anticipés résultant de modifications réglementaires introduisant de nouvelles contraintes (ex perf énergétique, émissions de CO ₂)		
Coûts liés à la mise en décharge	Démolition	
	Gestion des déchets	
	Nettoyage du site	

Tableau 20 : Tableau non exhaustif des coûts à prendre en compte aux différentes étapes du cycle de vie d'une construction.

Pour compter et évaluer d'un point de vue économique et financier les opérations se déroulant à des temps différents, les coûts d'incrémentation peuvent être convertis en coûts courants en utilisant la méthode du taux d'actualisation des flux financiers.

Cette conversion est particulièrement importante quand il s'agit de comparer des options qui ont des cycles de remplacement différents.

La valeur présente ou « present value » est particulièrement intéressante car elle permet de réduire une série de flux financiers qui se sont déroulés à différentes périodes, à une valeur unique, à un moment donné, au temps présent.

La technique qui permet cette transformation, est appelée actualisation.

Cette valeur présente de coûts futurs se réduit rapidement dans le temps et rend en général l'investissement en capital pour une performance recherchée à long terme, non attractive pour un développeur de projets, en tout cas en termes monétaires.

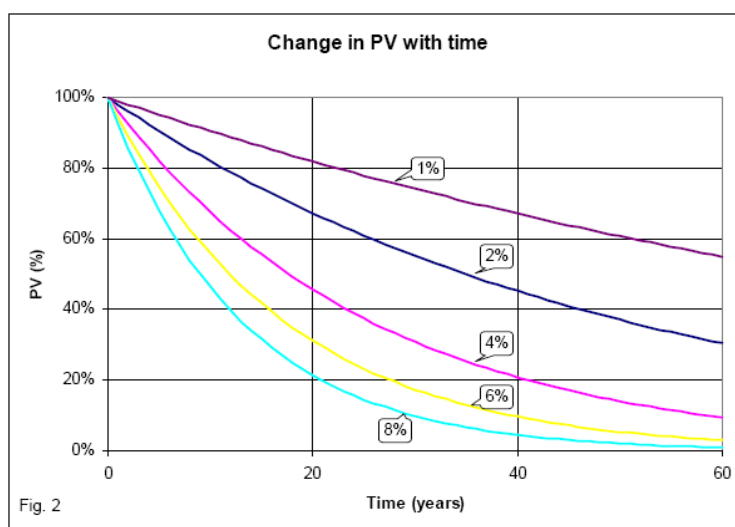


Figure 15 : Evolution des valeurs présentes ou actuelles dans le temps, en fonction du taux d'actualisation choisi.

Le taux d'actualisation permet ainsi de ramener la valeur courante d'une dépense ou d'une recette future à une valeur actuelle en autorisant le calcul de la valeur actuelle nette « VAN » d'un projet par addition du flux des coûts et des avantages.

Le projet mérite alors d'être considéré si sa VAN prévisionnelle est positive. Le taux d'actualisation traduit ainsi la valeur du temps pour l'investisseur, un taux élevé étant synonyme de valorisation forte du présent au détriment du futur.

Quelques études de cas spécifiques appliquent le raisonnement en coût global aux matériaux et systèmes constructifs, et parfois de manière plus globale au niveau du système constructif « bâtiment ». Parmi les principales :

- le coût global partagé d'un projet de construction [OUTREQUIN, 2006]⁷⁴ qui présente un modèle d'aide à la décision CoParCo,
- une étude comparative des coûts en cycle de vie pour un portail cadre acier avec panneau sandwich isolant, par comparaison à un portail conventionnel à moindre performance thermique [GURUNG & MAHENDRAN, 2002]⁷⁵,
- une étude sur la performance énergétique et le coût global de menuiseries extérieures [SKHAR & KENNETH, 1998]⁷⁶,

- l'évaluation des bénéfices en coûts complets en cycle de vie des constructions durables (sustainable construction) réalisée pour le compte du Kent County Council par un bureau de consulting, en 2006 [CYRIL SWEETT, 2006]⁷⁷,
- l'évaluation en coûts complets en cycle de vie de coûts de différents revêtements de sol [TEPFER, 2006]⁷⁸,
- le verdissement des écoles publiques américaines et l'analyse coûts / bénéfices des solutions constructives et énergétiques « vertes » par rapport aux solutions constructives conventionnelles [KATS, 2006]⁷⁹,
- enfin, le plus récent mais néanmoins intéressant et significatif en terme d'évolutions de raisonnements économiques, un appel d'offre récent pour « *la réalisation d'un logiciel d'aide à la décision pour les maîtres d'ouvrage publics intégrant le coût global sur l'ensemble du cycle de vie des constructions* », émis par le secrétariat général de la Direction des Affaires Economiques et Internationales, sous direction du bâtiment et des travaux publics et des secteurs professionnels [MEEDDAT, 2008]⁸⁰.

La formule générale de l'application du coût global actualisé appliqué au secteur du bâtiment avec, au préalable, affectation d'une durée de vie typique et des coûts d'entretien spécifiques est celle présentée au paragraphe 1.2.3 « approche monétaire du cycle de vie » :

Coût global = coût initial¹ + coûts différés² (dépenses d'exploitation, d'entretien, de réparation ou de remplacement mais aussi les coûts liés à l'utilisation) – **valeur de récupération** (valeur d'un bien au terme de sa vie utile ou de la période d'étude) – **coût évités** (coûts « économisés » par rapport à une solution considérée comme « conventionnelle »).

Quelques exemples de calculs de coût global actualisé issus des principales sources citées précédemment :

- L'étude de Cyrilsweett consulting [Cyrilsweett, 2006] -

L'étude de Cyrilsweett réalisée pour le Kent County Council en 2006 présente les coûts de produits alternatifs comparés avec des produits conventionnels généralement prescrits par les acteurs du bâtiment.

Trois types de coûts sont pris en considération : les coûts dits de capital, les coûts sur toute la vie en œuvre, les coûts de recyclage / mise en décharge en fin de vie.

La clé d'entrée de la comparaison s'effectue à partir des composants constitutifs de chaque solution constructive majeure relevant d'une problématique de conception dans le bâtiment :

- la couverture
- les murs extérieurs (porteur, parement extérieur, peau intérieur)
- les menuiseries extérieures

¹ Coût initial : le coût initial comprend toutes les dépenses d'investissement ayant un rapport direct avec le projet, y compris le prix du terrain, le coût de la conception, du raccordement aux services et de la construction.

² Coût différés : les coûts différés peuvent être divisés en deux catégories - les dépenses énergétiques d'exploitation pour refroidir, chauffer et éclairer le bâtiment - les dépenses d'entretien comprenant les frais de réparation et de remplacement. On peut inclure dans les coûts d'entretien les coûts liés à l'utilisation (les frais qui découlent d'une modification de l'usage d'un bâtiment ou d'une modification ou de l'amélioration des installations mécaniques et électriques) de même que les coûts de modifications nécessaires pour que le bâtiment soit conforme aux nouveaux codes et normes.

- Les portes
- Les matériaux d'isolation
- Les systèmes de production d'énergie

Pour chaque produit / composant de construction analysé au sein de ces solutions constructives, les coûts se présentent de la manière suivante :

Couverture					
Produits	Exemples de marques connues	Coûts d'investissements en capital (initiaux)	Coûts complets sur tout le cycle de vie du système constructif	Retour sur investissement (en temps) si applicable	Bénéfices environnementaux, information additionnelle sur l'accréditation
Solutions conventionnelles					
Tuiles béton	Redland	24 £ / m ²	7£/m ²	Non disponible	- Ecohomes, plus de 1,44 % de crédits (classement A green guide)
Tuiles reconstituées	Hardrow	38 £/m ²	9 £/m ²	Non disponible	- Contient plus de 80 % de déchets reconstitués - Faible contenu énergétique - Pas de classement A dans le green guide
Solutions durables (sustainable) considérées comme tel					
Tuiles en terre cuite	Tuiles Hinton	47 £/m ²	10 £/m ²	Non disponible	- Référentiel Eco Homes, 1,44 % des crédits (section matériaux)
Sédum végétalisés	Ecolibrium solutions	55 £/m ²	22£/m ²	Permet de réduire les coûts de drainage urbain	- Permet de réduire le volume d'écoulement des eaux - Augmente la performance thermique (masse importante) - En fonction de la nature de la membrane d'étanchéité, pas toujours noté « A » dans le Green Guide - coûts complets en cycle de vie assez élevés liés à l'entretien tous les trois ans de fertilisants et engrais.
Murs extérieurs					
Solutions conventionnelles					
Construction traditionnelle brique + bloc + isolation minérale intérieure		77 £ / m ²	1,91 £/m ² (brique extérieure)	Non disponible	Bonne performance sur tout le cycle de vie et classement A dans le green guide
Enduit base ciment 19 mm		15 £/m ²	10,82 £/m ²	Non disponible	Haut contenu énergétique (énergie grise) par comparaison à des enduits base chaux hydraulique
Solutions durables (sustainable) considérées comme tel					
Blocs en terre	Zeigel clay blocks	60 £/m ²	Non disponible, ou prendre en compte la réfection de l'enduit extérieur	Non disponible	Référence Ecohomes : plus de 1,44 % des crédits
Blocs recyclés à 100 %	Enviroblock	20 £/m ²	Non disponibles, ou prendre en compte la réfection de l'enduit extérieur	Non disponibles	Classement A green guide Bonne contribution à la cible contenu recyclé et recyclabilité
Enduit base chaux hydraulique		20 £/m ²	6,82£/m ²	Moins d'entretien et de maintenance que les enduits base ciment,	Moins énergivore que les enduits traditionnels base ciment Plus de temps requis pour le séchage des enduits.
Bois structurel et non structurel (ossature bois)	Panelvent / Paneline Excel Industries	9 à 10 £/m ²	Non disponibles	Non disponibles	- Fabriqué à partir de déchets de bois (OSB) - Pas d'utilisation de colles - Pour être pleinement « solution verte alternative », le bois doit être sourcé au maximum à partir de gisements certifiés FSC /

Isolation					PEFC.
Solutions conventionnelles					
Polyuréthane rigide		12 £ / m ²	Non disponible	Non disponible	L'obtention de crédits Ecohomes dépend des agents retardateurs au feu utilisés (requis : 0 pour ODP et < 5 pour les GWP) Pas de contenu recyclé
Isolant laine de roche 100 mm d'épaisseur		12 £/m ²	Non disponible	Non disponible	Contenu recyclé intéressant (typiquement 25 % et déclaré comme recyclable en fin de vie) Contribution aux crédits Ecohomes : 2,14 % (si ODP = 0 et GWP < 5) Contribue à la cible WRAP
Solutions durables (sustainable) considérées comme tel					
Fibre de bois comprimée $\lambda = 0,045$ w/m.k	Gamme Pavatex	10 £/m ²	Non disponible	Non disponible	Contribution aux crédits Ecohomes (si ODP = 0 et GWP < 5) : 2,14 % Pas de colles utilisées
Ouate de cellulose recyclée (100 mm, $\lambda = 0,036$ w/m.k)	Warmcell	10-12 £/m ²	Non disponible	Non disponible	Contribution aux crédits Ecohomes : 2,14 % (si ODP = 0 et GWP < 5) Contenu en matière recyclée : 80 à 100 % Contribue à la cible WRAP.
Laine de verre recyclée (100 mm, $\lambda = 0,037$)	Superglass	7 à 8 £/m ²	Non disponible	Non disponible	Contribution aux crédits Ecohomes : 2,14 % (si ODP = 0 et GWP < 5) Contenu en matière recyclée : 80 % (verre recyclé) Contribue à la cible WRAP
Technologies d'énergie renouvelable					
Ballon pour l'eau chaude électrique		13 £ /m ² de surface habitable	3,528 £ par unité	Non disponible	Crédits d'émission CO2 dans Ecohomes
Panneau solaire thermique CESI	CEL F solar system	625 à 1000 £/ m ² installé	1936 £/kw	8-12 ans	Contribution aux crédits Ecohomes : 2,14 % si le système contribue aux besoins en eau chaude à hauteur de 10 % Crédits énergie possibles à hauteur de 1,07 % Performance déterminée par l'orientation des panneaux

Tableau 21 : Coûts de produits alternatifs « verts » pour la construction, comparés aux coûts de produits conventionnels [CYRIL SWEETT, 2006].

Peu de comparatifs de ce genre sont disponibles au niveau européen, ce qui positionne cette étude comme intéressante.

Néanmoins, plusieurs remarques peuvent être formulées sur ces données :

- Les coûts d'investissement initiaux, postes par postes, sont souvent obtenus à partir des bases de données de prix disponibles dans le secteur conventionnel de la construction ; le coût des alternatives plus durables n'est en général pas repris dans ces bases de données ; le seul moyen de les obtenir est l'agglomération de coûts issus de devis réalisés auprès des entreprises qui proposent les offres de service, ce qui est techniquement réalisable puisque le nombre de ces entreprises est en constante augmentation mais demande du temps,
- Les coûts complets en cycle de vie sont souvent cantonnés à la prise en considération des coûts liés à la maintenance et au remplacement des produits, composants ou systèmes secondaires liés au composant principal (par exemple, composant principal: bloc porteur, composant secondaire: enduit pour bloc; coûts liés à la maintenance: réfection de l'enduit pour blocs tous les 10 ans),

- Le retour sur investissement est souvent non disponible sauf pour les systèmes de production d'énergie renouvelables pour lesquels il est plus facile de transformer les économies ou la production d'énergie réalisées en unité monétaire équivalente (évaluation des Kwh par exemple en £, \$ ou € et déterminer ainsi un temps de retour par rapport à l'investissement initial souvent exprimé en surcoûts). Pour des produits ou matériaux considérés comme « alternatives durables », la pondération du surinvestissement initial par des économies générées en cycle de vie est difficile à réaliser et suppose l'élaboration de postulats qui peuvent être objectifs (basés sur des retours d'expérience « terrain » ou des tests par exemples de vieillissement accélérés menés en laboratoires) ou subjectifs (basés sur des collèges de pensées ou des arguments de lobbies plus ou moins influents), d'où la difficulté de les mener à bien.
- Enfin, les externalités liées aux thématiques de développement durable sont évoquées (ex énergie grise, potentiel de recyclabilité en fin de vie, contenu de matières premières issues de filières de recyclage) sont prises en considération mais de manière qualitative dans la rubrique « bénéfiques environnementaux et informations additionnelles », la conversion quantitative en flux financiers, même si elle est difficile à réaliser, n'est pas proposée.

La trame de présentation et la répartition des coûts sur le cycle de vie (coûts initiaux – coûts en cycle de vie – retour sur investissement) peut être reproduite pour notre référentiel comparatif, entre une solution conventionnelle et une solution éco.

La rubrique faisant référence à la justification environnementale rejoint notre raisonnement initial: nous travaillons sur des produits ou composants considérés comme des éco-préférences dont la justification environnementale peut être apportée en sélectionnant des critères ciblés.

- Le coût global partagé du modèle CoParCo élaboré par le bureau « La Calade »

La contribution d'un bureau d'étude technique du secteur du bâtiment « La Calade », spécialisé en conseil et recherches en développement durable¹, à l'approche en coût global appliquée au secteur du bâtiment, est un modèle de coût global partagé qui permet de s'interroger sur les conditions économiques du développement d'un habitat durable.

L'intérêt de ce modèle est d'avoir été élaboré en partenariat avec les acteurs les plus concernés par le poids des coûts et des surcoûts, ainsi que les modèles de couples coûts / charges : les bailleurs sociaux.

Ce coût global partagé est présenté comme un concept quantitatif et qualitatif qui prend en compte les coûts directs de construction et de fonctionnement d'une construction, mais aussi des externalités environnementales comme l'effet de serre, les émissions de polluants atmosphériques, les nuisances sonores, le paysage et les espaces verts de proximité ou la localisation de services et équipements dits de collectivité.

L'intérêt réside surtout dans la démonstration d'une affectation possible de coûts et de bénéfices pour chacun des acteurs concernés : résidents, bailleurs, collectivités territoriales, état et société civile.

Le coût global du modèle CoParCo est basé sur plusieurs principes :

- les externalités environnementales et sociétales sont considérées comme des fiscalités virtuelles et intégrées au raisonnement en tant que valeurs monétaires

¹ Voir le site web www.cRDD-lacalade.com/etude.htm

- un bâtiment de référence sert toujours de comparaison par rapport à un bâtiment qualifié d'habitat durable HD
- les maîtres d'ouvrage bailleurs sociaux ne disposant que peu de références, le bâtiment de référence est évalué sur la base de ratios communément utilisés (bases de données « prix » conventionnelles externes ou internes)
- la prise en compte de quatre approches successives du coût global : le coût global direct, l'analyse en coût global, le coût global partagé et les indicateurs qualitatifs.
- La fixation arbitraire d'une durée de vie typique servant de base de travail pour l'évaluation en coût global : 30 à 40 ans en France.

Un exemple de calcul du coût global direct et partagé avec les externalités environnementales « comptabilisées » est disponible pour l'opération de Zuydcoote portée par Habitat 62/59 .

Répartition du coût global direct par poste en € actualisés / m² - an

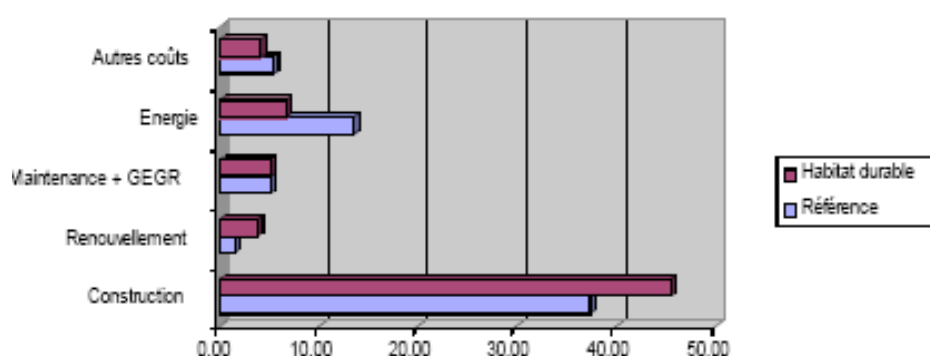
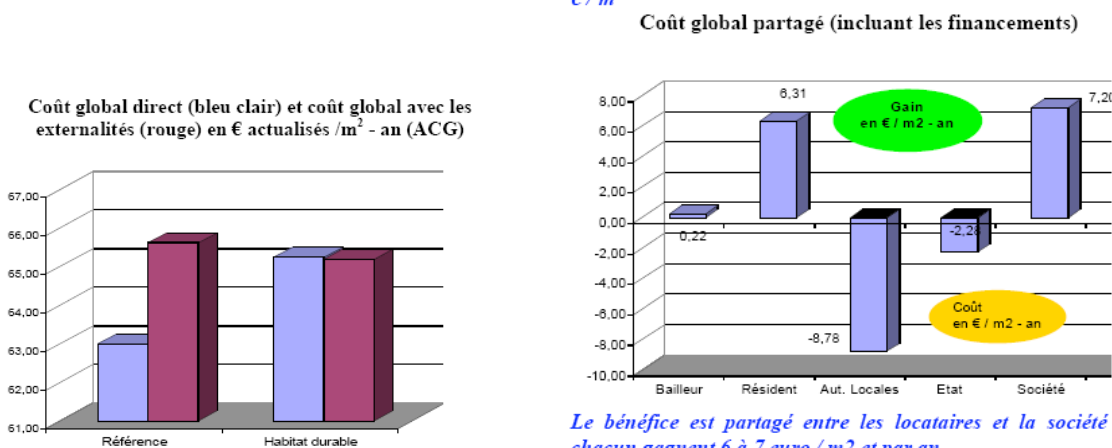


Figure 16 : Répartition des coûts directs par postes, en € actualisés /m²/an, Opération Habitat Social de Zuydcoote (59) portée par Habitat 62/59, [OUTREQUIN, 2006].



Figures 17 & 18 : Calcul du coût global direct et du coût global incluant les externalités / répartition des coûts et gains en €/m²/an entre les différents acteurs, Opération Habitat Social de Zuydcoote (59) portée par Habitat 62/59, [OUTREQUIN, 2006].

Une analyse rapide de ces résultats souligne que :

- l'habitat durable coûte plus cher que l'habitat de référence en coût global direct actualisé, sauf pour deux postes : la dépense énergétique et les autres coûts (figure 17)
- le coût global direct est plus élevé pour l'habitat durable que pour l'habitat de référence (moins de 63 € /m² contre 65 €/m²) tandis que le coût global comprenant les externalités (environnementales principalement) est moins cher pour l'habitat durable

que pour l'habitat de référence ; l'habitat durable génère ainsi une économie annuelle globale de 0,5 €/m² (figure 18)

- le coût global partagé donne des bénéfices partagés entre les différents acteurs de 6 à 7 € / m² /an, ce qui « coûte » le plus étant principalement attribué aux autorités locales et à l'état. (figure 19)

La principale critique vis-à-vis de ce modèle peut être formulée quant aux sources de référence servant de base à la comparaison habitat conventionnel / habitat durable : les bases de données de prix de composants, matériaux systèmes constructifs dont disposent les bailleurs sociaux, comprennent la plupart du temps des données relatives à la construction conventionnelle ; il eut été pertinent, même avec toutes les difficultés de collecte de données générées, de mener une évaluation poste à poste, en comparant les coûts réels des différents équipements et en évaluant les surcoûts à la construction ainsi que les économies de fonctionnement.

Une autre critique concerne la logique de monétarisation des externalités; l'une des externalités évaluée concerne les gaz à effet de serre dont le modèle propose une valeur pour la tonne de carbone émise ou évitée. Le prix de la tonne de carbone est basé sur la logique de réduction par 4 (facteur 4) des émissions de CO₂ d'ici à 2050 en Europe et le prix à faire payer à tous les acteurs pour y parvenir.

Un modèle d'analyse en coût global adapté au secteur du bâtiment, prenant en compte le coût d'une taxation carbone éventuelle liée à l'impact carbone en cycle de vie d'un bâtiment (principalement lié à sa consommation énergétique pour le chauffage, la climatisation, la ventilation et l'éclairage) a été proposé [WIGNACOURT, 2004] dans le cadre du projet MIEL 21 porté par la Communauté Urbaine de Lille.

La principale difficulté est d'adapter le coût d'une telle taxe au contexte énergétique ambiant et à l'évolution du cours du baril de pétrole.

En 2003, le coût de la tonne de carbone était fixé aux alentours de 400 € dans un contexte de baril de pétrole inférieur à 100 \$; en 2008-2009, quelle serait le niveau de cette taxe compte tenu des variations actuelles du coût de l'énergie ?

Les quelques experts ayant introduit très tôt l'éventualité d'une taxation carbone sur toutes les activités génératrices de GES, dont le secteur du bâtiment, fixent volontairement le seuil d'une taxe carbone sur l'habitat à 1500 € [JANCOVICI, 2003]⁸¹, ce qui représentait un doublement du prix de l'essence à la pompe...5 ans plus tard, le prix de l'essence à la pompe a presque doublé, un niveau bien plus faible de l'ordre de 100 à 150 € ne permettait pas, selon l'auteur, d'infléchir les comportements.

Voici ce qu'une taxe carbone représenterait en termes de surcoûts au niveau du chauffage d'une habitation :

Mode de chauffage et quantités consommées	Taxation carbone équivalent (surcoûts)
3000 litres de fioul	3600 € environ
Même confort de chauffage au gaz naturel	2800 € environ
Même confort au chauffage tout électrique (grille pain d'edf)	Si l'électricité provient de centrales à charbon (Allemagne), environ 10 500 €, en France (nucléaire) environ 0 €
Chauffage au bois	Si le bois provient de forêts replantées, 0 €

Tableau 22 : Comparaison du coût d'une taxation carbone liée aux émissions de GES des différents modes de chauffage pour l'habitat, [JANCOVICI, 2003].

L'application d'une taxe carbone sur les émissions de GES provenant de systèmes de production d'énergie non renouvelables (chaudières fioul, gaz, électricité sous certaines conditions) est simple: il suffit d'évaluer les émissions en tonnes équivalent carbone à partir de la quantité d'énergie dépensée.

Pour évaluer l'impact carbone de composants, matériaux et systèmes constructifs, le calcul est plus délicat et demande une mini analyse en cycle de vie « monocritère » ; plus un composant ou matériau est complexe de part sa composition, plus l'analyse doit être fine pour être objective.

Le contenu carbone lié par exemple au contenu énergétique caché (énergie grise) n'est d'ailleurs pas suffisant en tant que tel : des critères complémentaires tel le taux de remplacement (lié à la durée de vie typique) sont aussi à prendre en compte. Il présente par contre l'avantage d'être facilement compréhensible par un public non initié en tant que mono critère favorisant un choix basé sur une approche multicritères.

Cet affichage environnemental simplifié, basé sur le critère « contenu carbone » est d'ailleurs repris dans les préconisations du programme « efficacité énergie et carbone » du Grenelle de l'Environnement « *mesures structurantes – dire la vérité sur le prix écologique – donner un avantage compétitif aux produits vertueux en carbone* » ou, il s'agit d'ici à fin 2010 de « *donner une indication du prix du carbone ou du prix écologique à travers l'étiquetage des produits en grande distribution avec au préalable une analyse coûts / efficacité et une expertise sur les critères d'étiquetage retenus* ».

Les autres externalités monétarisées concernent la valeur affectée à des services rendus par des prestations qualitatives : proximité et qualité des espaces verts, présence d'équipements de service à proximité. Il est souvent possible de trouver un facteur de conversion qui permet de passer du qualitatif au quantitatif, par exemple « qualité des espaces verts » à « valeur locative ou immobilière des constructions avoisinantes » ou encore « accessibilité aux équipements et services » à « évaluation du temps gagné ou perdu ».

Pour l'étude comparative d'éco-matériaux, composants ou produits de construction, avec des solutions plus conventionnelles, le même raisonnement est réalisable, en prenant soin de trouver et légitimer ces facteurs de conversion.

Cette étude publiée en 2006 est basée sur deux études précédentes majeures : le « *National review of green schools, costs, benefits and implications for Massachusetts* » [KATS & PERLMAN, 2005]⁸² et « *The cost and financial benefits of green buildings* » [KATS, 2003] traduite en France en 2004 par l'ARENE Ile de France [SELLIER, 2004]⁸³.

Ce document démontre les bénéfices financiers, environnementaux et autres apportés par les technologies vertes, par comparaison à des technologies conventionnelles, dans le secteur de la construction d'écoles publiques.

En préambule, les principaux facteurs décourageant la construction de bâtiments plus verts aux Etats Unis sont les suivants :

Pourcentages de facteurs considérés comme significatifs pour décourager la construction de bâtiments verts	
Coûts de construction plus importants	68 %
Manque de prise en compte des bénéfices induits	64 %
Difficultés à quantifier les bénéfices	47 %

Tableau 23 : Les principaux facteurs décourageant la construction verte aux USA, [Turner Construction Company, 2005].

Les coûts financiers et bénéfices des écoles vertes sont présentés par comparaison aux écoles conventionnelles ; plus de 30 écoles vertes¹ ont été analysées.

Il en ressort principalement que les surcoûts avoisinent en général 2% ou 3 \$/pied carré (ft²) mais rapportent des bénéfices financiers jusqu' à 20 fois supérieurs dans des domaines divers :

Postes concernés	Bénéfices
Energie	9 \$
Emissions	1 \$
Eau et eau usée	1 \$
Gains accrus	49 \$
Réduction de l'asthme	3 \$
Réduction des maladies (grippe, froids)	5 \$
Rétention des enseignants	4 \$
Impact sur l'emploi	2 \$
Total	74 \$
Coûts de l'éco-construction	3 \$
Bénéfices financiers nets	71 \$

Tableau 24 : Bénéfices financiers des écoles vertes, en \$/pied carré, [KATS, 2005].

¹ Par « école verte », on entend écoles labellisées « LEED » référentiel national, Collaborative for High performance schools (CHPS), une version LEED dédiée aux écoles, et spécifiquement développée pour le Massachusetts « MA CHPS » en 2003.

D'autres bénéfices apportés par le choix de construction d'une école verte ne sont pas quantifiés dans le rapport : le nombre de jour d'absence des enseignants, les opérations réduites de maintenance, la réduction des risques et donc du coût des risques (assurances), la qualité de l'air améliorée, la réduction des inégalités sociales etc...

L'auteur considère que les données permettant d'inclure ces économies dans les raisonnements financiers en coût global sont insuffisantes mais que, si elles étaient calculées, les bénéfices finaux s'en trouveraient encore augmentés.

Les hypothèses de travail rejoignent celles présentées d'un point de vue théorique dans les définitions possibles d'un raisonnement en coût global :

- **l'analyse en « net present value »**, valeur actuelle nette avec taux d'actualisation ; un investissement est estimé rentable si sa VAN est positive sur la période d'étude.
- **la durée de vie typique** : la durée de vie moyenne prise en considération dans l'étude est de 20 ans pour les bâtiments neufs et de 15 ans pour les bâtiments anciens restaurés.
- **Le taux d'inflation** : le postulat est basé sur le fait que les coûts et bénéfices augmentent parallèlement au taux de l'inflation (2 % en moyenne), sauf pour les coûts de l'énergie, les émissions, l'eau, les déchets et les coûts de santé, qui augmentent en général plus vite que le taux d'inflation moyen.
- **Le taux d'actualisation** des valeurs monétaires (discount rate) : les coûts et bénéfices futurs doivent être traduits en valeurs présentes, le taux moyen est considéré à 7 % (5 % de taux d'intérêt et 2 % d'inflation). Ce taux est volontairement plus élevé que celui auquel les états et le gouvernement fédéral empruntent de l'argent.
- **La définition des « green schools »** : la base est l'accréditation LEED, avec les versions dédiées aux écoles : CHPS et MA CHPS, WSS (Washington Sustainable School) et Protocol for High Performance Facilities.

Le coût moyen de la construction d'écoles au niveau fédéral est évalué à 150 \$/pied carré, la majorité des 30 écoles analysées coûtant 1,7 % de plus que des écoles conventionnelles (3 \$/ft²) (4 écoles ont coûté jusqu'à 10 % de plus, 6 ont coûté au maximum 3 % de plus).

Les économies générées, évaluées en bénéfices, sont présentés postes par postes, avec des liens de causes à effets directs :

Causes	Effets	Consommation moyenne conventionnelle	Gains écoles vertes	Gains économiques traduits (écoles vertes)	VAN, 15 à 20 ans, 7 %
Systemes de régulation énergétique ou eco-technologies	Gains de Performance énergétique	1,15 \$/ft ²	33 % de consommation énergétique	0,38 \$/ft ²	5 \$/ft ²
Investissement de 10 millions de \$ en efficacité énergétique	Impact positif sur l'emploi		160 emplois à court terme et 30 emplois à moyen terme ou permanents	1 emploi créé = 19 000 \$ de recettes pour une école verte, 250 000 \$ sur 20 ans	2 \$ /ft ² pour une école de 125 000 ft ²
Investissement de 200 000 \$ en efficacité			3 emplois à court terme et ½ emploi à long terme		

énergétique par école verte					
Réduction des émissions dans l'air	Réduction des coûts de santé liés aux incidents respiratoires	NC	Idem, mais traduction en quantités de NOx, SO2, CO2 etc...	NC	0,53 \$/ft ²
Systèmes de récupération d'eau de pluie et toitures végétalisés	Réduction des consommations d'eau	0,06 \$/ft ² (5 % du coût de l'énergie)	32 % de consommation d'eau en moins	NC	0,84 \$/ft ²
Température et ventilation contrôlées, sources de polluants gérées (qualité de l'air intérieur)	Réduction des jours d'absence, amélioration de la productivité au travail (tests aux examens)	Coûts de santé trois fois plus élevés pour un étudiant atteint d'asthme, ou 1650 \$ par enfant en 2004.	3,6 % de productivité, 61 % d'allergies, 23 % de maux de tête, 51 % de cas de grippe, 38,5 % de cas d'asthme	33 000 \$ par an pour 25 enfants atteints en moins pour une école moyenne de 900 étudiants	3 \$/ft ² (asthme) et 5 \$ /ft ² (grippe)
Conception verte « green design »	Réduction du turnover des enseignants	40 % du salaire moyen annuel d'un enseignant (65 000 \$/an)	5 % de réduction	25 000 \$ par an, pour un taux d'espace moyen de 2300 ft ² /enseignant	4 \$/ft ²
Surfaces réfléchissantes en toiture	Réduction des besoins en air conditionné ; réduction de l'ozone dans les zones urbaines Augmentation de la durée de vie des toits	NC	NC Durée de vie des toits réfléchissants : 20 % de plus	NC	NC

Tableau 25 : Proposition de synthèse des détails des économies générées par le verdissement des écoles américaines, postes par postes, [KATS, 2006].

Cette étude, unique en son genre, fait apparaître principalement des économies de coûts et des gains / bénéfices procurés par les technologies vertes, qu'ils soient directs ou indirects :

- l'installation de systèmes de récupération d'eau de pluie entraîne une réduction des consommations d'eau par an, réduction pouvant être traduite en économies « \$\$ » de coûts.
- L'amélioration de la qualité de l'air intérieur par l'installation de systèmes plus performants, l'augmentation des volumes ventilés, la réduction des sources polluantes telles que les mobiliers dégageant des COV, engendre une augmentation des taux de réussite aux examens, un absentéisme pour raisons médicales moins important, un taux de changement des enseignants réduit.
- Le recours à des systèmes nécessitant moins de remplacements ou d'entretien / maintenance augmente la durée de vie typique et génère des économies de coûts, par comparaison à des systèmes conventionnels.
- L'utilisation de systèmes de production d'énergie renouvelable et de régulation énergétique, crée de nouveaux emplois locaux, à court, moyen ou long terme, à nuancer par la perte d'emplois dans les secteurs énergétiques traditionnels (énergies fossiles) mais, au total, les écoles vertes génèrent plus d'emplois que les écoles non vertes.

Même si les évaluations de coûts et bénéfices en dollars semblent précises, en tout cas plus avancées qu'en France, peu de données sont disponibles concernant la durabilité des matériaux / composants ou systèmes « verts » par comparaison aux systèmes conventionnels, notamment dans l'étude plus détaillée [KATS, 2003], avec comme critère de différenciation

récurant la performance technique souvent meilleure qui induit des économies de coûts en maintenance / remplacement (« operation and maintenance costs »).

Données générales [STURM, 2002]	
Coûts des O&M dans les bâtiments publics	
coûts	Bénéfices solutions vertes
12,25 \$/ft ² /an	Economie de 10 % (estimation) soit 1,35 \$/ft ² /an ; valeur moyenne prise en considération : 5 % par an soit 0,65 \$/ft ² /an

Tableau 26 : Estimation de coûts et d'économies de coûts liés au poste « operation and maintenance » dans les bâtiments publics américains [STURM, 2002]⁸⁴

Solution conventionnelle	Solution verte	Plus value technique
Surfaces de bâtiments non réfléchissantes	Surfaces de bâtiments réfléchissantes	Augmentation de la durée de vie de 20 % ex toitures végétalisées : 30 à 50 ans

Tableau 27 : Exemple de plus value technique apportée par une solution verte [KATS, 2003]

Pourtant, les gains sur les dépenses de fonctionnement du poste « entretien et maintenance / réception de travaux » en cumul sur 20 ans pour les bâtiments tertiaires, représentent près de 16 % des gains totaux, entre un bâtiment vert et un bâtiment classique [SELLIER, 2004].

L'étude multicritère en cycle de vie, avec une analyse plus particulière sur les apports techniques, d'éco-solutions par rapport aux solutions conventionnelles (et le lien avec les opérations de maintenance / remplacement) pour le secteur du bâtiment semble donc pertinente puisque la plupart des données manquantes concernent ce poste d'évaluation.

Enfin, au-delà des coûts et bénéfices des bâtiments verts par rapport aux bâtiments conventionnels, aucun temps ou taux de retour sur investissement n'est pas donné. Ils complèteraient pourtant parfaitement les raisonnements avec le souci de vulgarisation à destination des consommateurs finaux : occupants des bâtiments, maîtres d'ouvrages ou entreprises chargées de la maintenance.

2.2.4.5 Mesure et traduction en approche financière de management durable, le ratio « coûts / bénéfices »

Un référentiel d'indicateurs de management durable doit permettre in-fine de monétariser les propositions d'indicateurs macro-économiques, en clair de ramener les propositions multicritères à des indicateurs utilisables pour un gestionnaire d'entreprise du secteur du bâtiment.

Pour pouvoir effectuer un choix entre une solution conventionnelle et une solution « éco », cela semble essentiel.

Au final, on propose donc un faisceau d'indicateurs financiers de management durable, déjà repris dans la proposition d'indicateurs croisés en 2.2.3.2 « les typologies d'indicateurs, tableau 18 :

- les surcoûts,
- les coûts évités ou bénéfices
- le temps de retour sur investissement
- et le ratio « coûts / bénéfices » actualisé.

Le surcoût a pour base la comparaison entre le coût initial ou coût en capital d'une solution 1 et le coût initial d'une solution 2. Si l'une des solutions présente un coût plus important que l'autre, le surcoût existe. Un surcoût négatif n'a donc pas de fondement, on parle alors de solution économe.

Les coûts évités ou bénéfiques sont fondés sur deux approches :

- soit le temps d'amortissement d'un investissement classique, qui permet d'inscrire les valeurs amorties annuellement comme déductibles de l'investissement initial, pour considérer à l'issue de la durée d'amortissement que l'investissement ne coûte plus rien et donc que des bénéfices liés à l'usage supplémentaire sont possibles
- soit un bénéfice réel, qualifié et quantifié par rapport à une solution conventionnelle jugée moins performante que la solution de remplacement étudiée

Un exemple : un revêtement de mur nécessite d'être remplacé tous les dix ans, un autre plus performant uniquement tous les 20 ans, dans un bâtiment dont la durée de vie typique est de 50 ans. Le premier revêtement devra être renouvelé 5 fois sur 50 ans, le deuxième revêtement 2,5 fois seulement. Le coût évité ou bénéfique présenté par la solution 2 représente à minima 2,5 fois le coût de renouvellement de la solution 1.

Le temps de retour sur investissement : directement issu des deux premiers concepts présentés ci-dessus, le temps de retour « *return on investment* » permet d'apprécier le temps à partir duquel un investissement ne coûte plus mais génère des profits pouvant être considérés comme bénéfiques. L'exemple typique souvent utilisé est celui des systèmes de production d'énergie renouvelable qui coûtent en investissement mais rapportent, de par leur fonction, de l'énergie gratuite.

Par exemple les panneaux solaires photovoltaïques qui permettent de produire, à partir de cellules photovoltaïques, de l'électricité « verte ».

Un panneau solaire photovoltaïque au silicium polychristallin est caractérisé par une puissance en Watts crête « Wc ».

Les prix diffèrent suivant le type de pose et le modèle de capteur utilisé.

Type de pose	Coût du Kwc en € HT
Sur toiture	6000 à 7500 €
Sur toit plate (terrasse)	6500 à 7800 €
En intégration toiture	7000 à 9000 €

Tableau 28 : Coût de 10 m² de panneaux solaires photovoltaïques en fonction de leur mise en œuvre [CD2E, 2006].

Exemple pour 1 kWc installé (10 m² de panneaux en moyenne) :

	Nord France	Centre France	Sud France	Corse	DOM
Production solaire / an	1000 kWh	1100 kWh	1200 kWh	1200 kWh	1500 kWh
Tarif de rachat du kWh (HT)	0,5 €	0,5 €	0,5 €	0,5 €	0,5 €
Revenus par an	500 €	550 €	600 €	600 €	750 €

Tableau 29 : Simulations de production d'énergie et de revenus générés annuels, en Kwh pour 1 kWc installé et en €, en fonction des régions françaises.

Un tableau comparatif de l'installation d'une centrale photovoltaïque sur un toit dans les villes de Lille et de Bastia :

Ville	Lille	Bastia
Type d'installation	Installation de 10 m ² de capteur, une puissance de 1kWc sur une toiture, éléments de connexion, onduleur et pose, connexion au réseau.	
Prix de l'installation sans subventions	7 500 €	
Subvention Régionale	2€/Wc soit 2000€	
Subvention de la Ville	1,2 €/Wc soit 1200 €	
Total des subventions	3 200 €	
Crédit d'impôt de 50%	2 150 €	3 750 €
Prix de l'installation avec subventions	2 150 €	3 750 €
Gisement solaire régional	< 1220 kwh/m ² /an	> 1760 kwh/m ² /an
Production solaire par an	1000 kWh	1800 kWh
Taux de rachat de l'électricité par EDF	0,5 €/kWh	0,5 €/kWh
Revenus par an	500 €	900 €
Temps pour rentabiliser le système sans subventions	15 ans	8,33 ans
Temps pour rentabiliser le système avec subventions	4,3 ans	4,16 ans

Tableau 30 : Temps de retour sur investissement pour 1 kwc ou 10 m² de panneaux solaires photovoltaïques, en fonction de leur implantation en France.

10 m² de panneaux installés fournissent en moyenne 1 kWc en puissance installée, soit 1000 Kwh/an en Nord Pas de Calais, et jusqu'à 1800 kwh/an en Corse.
1 kwc installé : coût sans subventions (prix 2006) environ 7500 €.

Le tarif d'achat « contraint » de l'électricité verte par EDF en France, pour les panneaux solaires photovoltaïques raccordés au réseau et bénéficiant d'un crédit d'impôt « énergies renouvelables » de 50 % TTC sur la facture « matériel », est de 50 centimes d'euros au kwh (0,5 €/kwh).

La production annuelle d'électricité pour 10 m² de panneaux de 1 kwc génère donc un profit de 500 € par an en Nord Pas de Calais et 900 euros par an en Corse.

Le coût initial des 10 m² de panneaux est de 7500 € TTC, l'amortissement de l'investissement se réalisera en 4 ans en moyenne avec subventions, en Nord Pas de Calais (primes régionales ou locales complémentaires) ou en Corse.

Le temps de retour sur investissement est donc de 4 ans à compter de l'investissement initial.

Si la durée de vie typique des 10 m² de panneaux solaires photovoltaïques est de 20 ans, le panneau générera donc 16 années de production d'électricité au-delà du point mort (temps de retour sur investissement) soit 16 x 500 € = 8000 € de bénéfices en Nord Pas de Calais et 14 400 € en Corse, sur la durée de vie typique (20 ans).

Enfin, le ratio coûts / bénéfices actualisé permet de valoriser le temps de retour sur investissement d'un point de vue quantitatif : les coûts divisés par les bénéfices d'un projet permettent de comprendre immédiatement si un projet mérite ou non d'être réalisé.

L'interprétation est la suivante :

- **ratio coûts / bénéfices > 1** : les coûts sont supérieurs aux bénéfices, le projet n'est pas considéré comme rentable,
- **ratio coûts / bénéfices < 1** : les coûts sont inférieurs aux bénéfices, le projet peut être considéré comme rentable,
- **ratio coûts / bénéfices = 1** : les coûts sont égaux aux bénéfices, le projet mérite une attention qui peut être complétée par des ratios complémentaires avant de finaliser la décision d'investissement.

Le ratio de l'investissement consenti au regard des bénéfices réalisés sur la durée de vie typique du panneau sera donc de 2150 € / 8000 € soit 0,268 en Nord Pas de Calais et 3750 € / 14 400 € = 0,2604 en Corse.

Un ratio coûts / bénéfices pour être intéressant doit être égal ou inférieur à 1, ce qui signifie que les bénéfices ont compensé à minima les coûts (égal à 1) ou que les bénéfices ont dépassé le coût initial (inférieur à 1).

Région	Coût initial sans subventions	Coût final avec subventions	Temps de retour sur investissement	Durée de vie typique	Bénéfices générés au-delà du ROI	Ratio coûts / bénéfices sur DVT (avec subventions) Rentable si < 1
En Nord Pas de Calais	7500 €	2150 €	4 ans	20 ans	8000 €	0,268
En Corse	7500 €	3750 €	4 ans	20 ans	14 400 €	0,26

Tableau 31 : Synthèse de la démarche « coût global » sur une durée de vie typique d'une installation photovoltaïque.

L'exemple des panneaux solaires photovoltaïques sert de référence à notre raisonnement multicritères comparatif en cycle de vie : les systèmes de production d'énergies renouvelables sont plus simples à analyser que les systèmes constructifs, notamment parce que les bénéfices produits sont rapidement quantifiables (l'énergie est rapidement quantifiable en euros ou dollars).

Pour l'étude d'un matériau ou composant constructif comme un bloc porteur, un isolant ou un parement extérieur, le passage du qualitatif au quantitatif est plus délicat et doit être réalisé sur la base du recueil d'un maximum d'informations objectives: les enquêtes de terrain auprès d'entreprises spécialisées, de maîtres d'ouvrages impliqués, l'utilisation de bases de prix professionnelles et la synthèse d'articles spécialisés.

C'est ce que nous proposons de réaliser dans le cadre de notre étude, avec pour finalité ultime l'expression de ratios coûts / bénéfices entre des solutions conventionnelles et des solutions « éco »

2.2.5 Choix des systèmes constructifs : disponibilité et approvisionnement sur la zone d'étude, le Nord Pas de Calais

Dans la continuité de l'approche multicritères en cycle de vie, de l'évaluation de matériaux « éco-conçus » par comparaison à des solutions conventionnelles, du raisonnement « management durable » appliqué aux PME-PMI et de critères environnementaux et sociétaux de plus en plus importants dans la prise de décision d'investissements, il nous semble logique d'appliquer notre étude au niveau d'un territoire géographique de référence, la région Nord Pas de Calais.

Le choix de restreindre volontairement notre étude, et par conséquent le nombre d'éco-matériaux étudiés, à cette région précise se base sur plusieurs constats :

La région concentre de manière croissante depuis près de dix ans les initiatives d'application du développement durable au secteur du bâtiment, notamment via le nombre des réalisations issues de commandes publiques (lycées, collèges, établissements recevant du public) et privées (bailleurs sociaux) dites à haute qualité environnementale (HQE) : 160 réalisations HQE sont ainsi réalisées, par comparaison aux 600 existantes au niveau national¹

Il s'agit de la deuxième région la plus densément peuplée en France, derrière l'île de France, avec en conséquence, toutes les problématiques liées à l'habitat neuf et en rénovation / réhabilitation, qui peuvent se poser pour un territoire, ses politiques d'aides et de soutien et de développement et son tissu d'entreprises. Le nombre d'entreprises artisanales du secteur de la construction est estimé à 10 558, soit le tiers de toutes les entreprises artisanales régionales [INSEE, 2007]⁸⁵.

La région Nord Pas de Calais se trouve au cœur de l'Europe, à la croisée des « flux » notamment des flux « matières / matériaux » qui y transitent à destination d'autres zones de chalandises : le bois en provenance d'Europe du nord et de Russie, les granulats en provenance de Belgique et à destination du bassin parisien, les matériaux et produits à destination de l'Angleterre.

Les initiatives de « benchmarking » des pays pour lesquels les éco-matériaux pour la construction représentent des parts de marchés intéressantes ont permis de positionner les acteurs historiques « grandes surfaces de bricolage » sur le nouveau marché de l'environnement et de la santé. Une étude commandée par le Centre de Création et de

¹ Estimation 2006, Conseil Régional Nord Pas de Calais

Développement des Eco-Entreprises [CD2E, 2006]⁸⁶ a également contribué au lancement du premier concept français dédié à l'éco-réhabilitation « KBANE¹, la maison durable », sur la métropole lilloise en mars 2008. Enfin, un acteur historique positionné sur le marché de l'extension / réhabilitation vient de proposer (avril 2008) une offre « réhabilitation écologique » disponible partout en France via un réseau de 250 maîtres d'œuvre, à partir de la région Nord Pas de Calais².

Le travail effectué sur les filières locales de production – distribution – prescription – utilisation d'éco-matériaux pour la construction a permis en Nord Pas de Calais d'impliquer 21 entreprises régionales dans des logiques d'éco-conception / éco-marketing, permettant la mise sur le marché de 16 éco-matériaux différents présentant tous des niveaux de performance minimale d'un point de vue éco-conception.

Le Nord Pas de Calais attire un certain nombre d'entreprises de fabrication de matériaux et produits de construction et représente de plus en plus une zone stratégique d'investissements : bassin de population important (et donc d'entreprises du secteur de la construction), ressources en sous sol disponibles (argile) ou réseaux de communication importants (voies navigables, ports marins, autoroutes, chemin de fer), tissu de distributeur très important (négoce spécialisés professionnels, GSB, « low cost »), besoins actuels et futurs en réhabilitation thermique des logements anciens très importants. A titre d'exemple, le Nord de Paris (dont la Picardie) représente les marges de croissance les plus importantes pour les ventes de blocs monomurs terre cuite à isolation répartie, notamment pour le leader historique Wienerberger (5000 tonnes en 2002, 55 000 tonnes en 2006-2007). Wienerberger a donc lancé début 2008 la construction d'une usine de production de blocs monomurs à Hulluch³ (62) permettant d'éviter 300 allers-retour par mois par camions de 25 tonnes entre l'usine d'Alsace et le Nord Pas de Calais. Dernier exemple en date, l'implantation en cours d'une usine de fabrication de béton cellulaire (même matériau que les blocs blanc de Ytong / Syporex) à proximité de Valenciennes, projet mené par des ex-salariés de Xella Belgique, pour alimenter directement les marchés de proximité et la demande locale.

Enfin, la région Nord Pas de Calais porte également la première initiative d'action collective [CD2E, 2007] visant à accompagner des entreprises fabricant des éco-matériaux auprès du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) et obtenir des avis techniques produits favorisant l'assurabilité des ouvrages réalisés sur la base de ces matériaux / composants, et donc la pénétration de ces nouveaux produits sur le marché français.

Les 16 éco-matériaux différents identifiés sur le territoire régional depuis 2004 sont répartis au sein de corps d'états complémentaires ; une certaine diversité est donc présente et permet d'analyser ces éco-solutions dans différents domaines d'usages, correspondant à différents systèmes constructifs.

Ces éco-matériaux et les principaux systèmes constructifs pour lesquels ils sont dédiés par leurs fabricants / fournisseurs sont présentés de manière succincte dans le tableau ci-dessous ; les matériaux et composants conventionnels correspondant aux mêmes fonctions seront repris ultérieurement. Le lien avec les usages considérés comme courants sera également établi dans une colonne dédiée, c'est-à-dire la reconnaissance par les instances

¹ KBANE, concept de magasin et d'offre de services en éco-rénovation, spécialisé sur l'éco-construction et les énergies renouvelables, financé par ADEO (groupe AUCHAN)

² Camif Habitat, offre 360 ° voir le site www.maison-plus-ecologique.com

³ Voir le communiqué Wienerberger du 18 décembre 2007, sur le site www.wienerberger.fr/servlet/Satellite?pagename=Wienerberger/WBArticle/ArticleStandard05&cid=1198077097399&sl=wb_fr_home_fr&lpi=1113497802229

professionnelles, scientifiques, les entreprises de terrain et les assurances des preuves de ces usages courants (règles professionnelles, norme, Document Technique Unifié etc...).

N°	Corps d'état	Nom	Sociétés	Type	Fonction
1	GO	Cellumat	Cellumat	Bloc béton cellulaire	Structurel et isolation répartie
2	GO	Porotherm	Wienerberger	Bloc monomur terre cuite	Structurel et isolation répartie
3	GO	Cogebloc	Cogebloc	Bloc monomur de pierre ponce	Structurel et isolation répartie
4	SO	Cogebloc	Cogebloc	Enduit pierre ponce et chaux hydraulique	Protection extérieure / intérieure, finitions, isolation complémentaire
5	GO	Brique de terre crue	Briqueteries du Nord	Brique de terre crue compressée non cuite (vente avant cuisson)	Remplissage de parois intérieures, non structurel
6	GO	Novaplaque	Novafloor	Plaque de pvc micronisé, recyclé et mélangé avec une charge de bois	Couverture, bardage, coffrage pour bétons
7	GO	Terca	Terca – Wienerberger	Briques de terre cuite avec déchets de terrils incorporés	Structurel et parement
8	GO	Chaux	Chaux et Dolomies du Littoral	Chaux NHL	Remplace le ciment pour les travaux structurels ou de finitions, intérieurs et extérieurs
9	GO	BTC	Scieries et Palettes du Littoral	Brique de terre crue stabilisée à la chaux hydraulique	Remplissage de murs et parois intérieures, inertie dans les constructions « légères » (type ossature bois)
10	SO	Métisse	Le relais – Minot	Isolant à base de textile recyclé	Isolation des murs, combles, planchers
11	SO	Abrilaine / Panolaine	AVR Isolation,	Isolant à base de laine de mouton origine française	Isolation des murs, combles, planchers
12	GO	Plancher cloué	Scieries et Palettes du Littoral	Plancher cloué en bois non traité, issu des forêts du Boulonnais	Effet structurel + isolation thermique et acoustique
11	SO	Portes bois massif	Van Kimmel	Portes en bois massif non traité, certifié PEFC, utilisation de colles faiblement émissives	Fermetures intérieures / extérieures
12	GO	Bardage Aulne	Scierie Morisaux	Bardage en aulne du Nord Pas de Calais, non traité, scié et raboté traditionnel	Bardage de protection
13	SO	Menuiseries	Menuiserie Bouillon –	Menuiseries extérieures / intérieures, démarche Menuiseries 21, bois certifié PEFC non traité, colles faiblement émissives.	Fermetures intérieures / extérieures
14	GO & SO	Anas de lin	9 Teilleurs de lin	Co-produits du lin (paillettes courtes), matière fibreuse végétale, parfois appelé « petit bois »	Utilisation en mélange avec de la chaux hydraulique pour la réalisation de dalles, chapes, l'isolation de murs en banchage ou en projection (filière semi-humide), l'isolation de toitures en coffrages.
15	SO	Laine de lin	Naturlin – lin 2000	Fibre de lin pour l'isolation	Isolation des murs, combles, planchers
16	GO	Botte de paille	Agriculteurs en région, disposant d'une ancienne « botteleuse ».	Bottes de pailles de céréales comprimées spécifiquement pour la construction	Fonction de remplissage des murs à ossature bois, pour isolation thermique et phonique (rédaction DTU et règles professionnelles en cours)

Tableau 32 : Proposition de liste des éco-matériaux identifiés en Nord Pas de Calais, faisant l'objet dans le cadre de notre étude de comparaison avec des matériaux conventionnels.

2.2.6 Caractéristiques pratiques de la méthodologie et de l'outil

L'outil de comparaison d'éco-matériaux par rapport aux matériaux conventionnels pour le secteur de la construction de bâtiments, que nous proposons de réaliser, a pour fondements :

- L'utilisation d'une définition simple, claire et consensuelle autour de la thématique « éco-matériau » pour la construction (voir définition proposée au paragraphe 1.3.5),
- L'analyse multi-critères en cycle de vie, principalement basée sur des critères techniques, économiques et financiers.
- Un système de classification de l'information reconnu au niveau international UNICLASS complété par une approche « matière », « application » et « fonction ».
- Les données correspondant à ces critères seront agglomérées en un langage commun unique, le coût global d'investissement, complété par des externalités liées aux nouveaux enjeux de la société actuelle (le coût d'une taxation carbone, les bénéfices générées par l'impact sur l'emploi...), ramené au final à un temps de retour sur investissement et un ratio coûts / bénéfices actualisé.
- La localisation géographique préférentielle ou le fait de privilégier dans toute réflexion d'investissement, les filières d'approvisionnement les plus courtes possibles, ce qui permet d'éviter que des matériaux et produits de construction ne transitent sur des milliers de kilomètres avant d'être utilisés, et réduit par la même leur empreinte environnementale (et demain leur coût). On repositionne également la valeur ajoutée générée au plus près du local, au niveau notamment des PME-PMI impliquées dans le management durable.

Les clients, cible principale de notre outil sont les professionnels de la construction: artisans, maîtres d'œuvre, architectes mais également la maîtrise d'ouvrage publique et privée (bailleurs sociaux); ce sont eux qui manquent le plus souvent de données fiables concernant les éco-technologies et éco-techniques du secteur de l'éco-construction pour :

- **argumenter leurs propositions commerciales** dans le cas de négociations avec leur clientèle,
- **intégrer des données économiques et financières** comme les coûts / surcoûts et temps de retour sur investissement dans leurs plan de financements prévisionnels,
- **légitimer le recours** à des matériaux / composants / techniques de qualité, durables, moins impactants pour l'environnement et la santé, et coûtant moins à la société en termes globaux.

L'outil doit donc intégrer des indicateurs opérationnels qui sont des outils de retour d'expériences, de gestion et d'anticipation et qui respectent une sorte de cahier des charges de management durable :

- **Rigueur** : le constat doit être incontestable et vérifiable
- **Simplicité** : le système de lecture peut être basé sur le modèle KISS anglo-saxon : « Keep It Simple Stupid » qui signifie : restons simples et paraissons bornés. Le langage le plus simple, qui peut être borné mais efficace, est celui des chiffres.

- **Transversalité** : les 5 domaines couverts par l'analyse multi-critères font appel à des disciplines diverses, qui ont toutes leur langage et leur lexique. L'idée est de trouver un dénominateur commun possible, le langage des chiffres.
- **Quantification et traçabilité** : la quantification est la seule méthode qui permette de mesurer l'évolution d'une organisation ; encore faut-il que la traduction en chiffres soit acceptable pour toutes les parties intéressées, et par conséquent traçable. La seule traduction traçable est celle qui se réfère à des termes financiers.

L'outil ne sera pas exhaustif puisqu'il se limitera volontairement à l'étude des éco-matériaux disponibles en Nord Pas-de-Calais, mais la méthodologie développée permettra d'étendre le raisonnement à d'autres éco-matériaux, et surtout d'autres territoires produisant ces éco-matériaux.

Les données seront agglomérées au sein de tableaux interdépendants les uns des autres pour pouvoir faire évoluer des paramètres et mesurer l'évolution des temps de retours et ratios coûts bénéfiques en fonction des situations rencontrées. Excel présente également l'avantage de la simplicité pour les acteurs du bâtiment peu au fait de l'informatique.

L'autre avantage est que les bases d'informations de références, notamment les bases de prix, pourront être actualisées, ce qui est impossible avec un logiciel figé. Il s'agira donc d'un outil évolutif dont la méthodologie pourra être reproduite.

Au-delà des systèmes constructifs dans lesquels seront positionnés ces éco-matériaux pour les besoins de l'étude, il nous semble intéressant de pouvoir, en tant que raisonnement final, appliquer notre méthodologie de comparaison à une étude de cas concret, intégrant des éco-matériaux régionaux au sein d'un système constructif complexe, un rampant de toiture issu de solutions techniques proposées par l'entreprise « Scierie Palettes du Littoral / SPL » à Audruicq près de Calais : SPL / Chênelet construction conçoit et construit des maisons à haute qualité durable.

Cette entreprise active au sein de la filière d'économie solidaire et de réinsertion développe depuis les années 2000 un concept d'habitat de qualité charges maîtrisées, coût reproductible et à faible empreinte environnementale.

Leur concept II, finalisé en 2007, a donné le jour à plusieurs logements éco-construits, dont les derniers à Saint Denis en région parisienne. Actuellement, SPL construit 6 logements de cette même gamme à Loos en Gohelle à proximité de Lens.

La problématique du financement des surcoûts et de la répartition des bénéfices générés est ici prépondérante puisque la maîtrise d'ouvrage est un bailleur social.



Figure 19 : Maisons Haute Qualité Durable à Saint Denis, [CD2E, Avril 2008].

CHAPITRE 3

Mise au point d'un outil d'aide à la prescription technique, économique et financière d'éco-matériaux pour la construction / réhabilitation de bâtiments

Chapitre 3 : Mise au point d'un outil d'aide à la prescription technique, économique et financière d'éco-matériaux pour la construction et la réhabilitation de bâtiments

3.1 Introduction

Sur la base du cahier des charges de la méthode proposée au chapitre précédent d'aide au choix d'éco-matériaux pour la construction et la réhabilitation de bâtiments éco-construits et à faible niveau de consommation énergétique, nous pouvons désormais dérouler la méthodologie de travail, en proposant :

- des bases communes de comparaison, permettant notamment de définir des solutions constructives.
- des indicateurs par familles de critères.
- des évaluations de solutions constructives conventionnelles et éco-construites, par familles de critères simplifiées.
- une pondération imposée (contraintes réglementaires) correspondant aux enjeux actuels (réglementation, problématique environnementale, éco-construction, SMQE), ou proposée par les acteurs de terrain (ceux qui prescrivent et qui utilisent).
- une agrégation financière des résultats, sous forme de langage financier universel.

3.2 Bases communes de comparaison et détermination des solutions constructives

3.2.1 Hypothèses préliminaires

A plusieurs reprises depuis le début de l'étude, des termes différents mais proches ont été employés pour qualifier les produits ou matériaux de construction issus d'un secteur « industriel » : matière première, matériaux, produits et composants, ainsi que leur association ou assemblage (paragraphe 2.1, page 8) au sein de « systèmes constructifs ».

Chaque système constructif, selon son importance peut être considéré comme une solution constructive permettant de résoudre ou d'apporter une réponse à une problématique de conception « majeure » (paragraphe 5.3.1, page 72).

L'interaction entre les systèmes constructifs au sein d'une construction plus importante permet de définir un ouvrage de construction, avec une logique de « bonne conception » et le respect de certaines exigences et de performance.

Afin de voir plus clair dans toutes ces définitions, il semble opportun de re-définir chacune des notions développées ci-dessus :

- Matière :

Substance constituant les corps, dotée de propriétés physiques et substance particulière dont est faite une chose et connaissable par ses propriétés. La matière est ce dont les corps sont faits, présente des qualités et des propriétés et peut être le siège de divers phénomènes. Les matières sont également conformes à des usages bien établis : chaque variété de bois, métal présente des qualités propres ; dès que l'on fait référence à une transformation, on parle d'objets fabriqués. Les chimistes évoquent les substances. Les objets transformés ont en commun d'être des variétés d'une seule et même substance, ce qu'on appelle la matière. Les matières sont parfois assemblées pour constituer un tout.

- Matériau :

Substance quelconque utilisée à la construction des objets, des machines, des bâtiments.

Il s'agit également de matières d'origine naturelle ou artificielle qui entrent dans la composition des bâtiments. Les matériaux sont classés en trois grandes familles : les matériaux bruts tels les matériaux de construction (pierre, sable, granulats), les matériaux structurels (aciers, verres, ciments, matières plastiques) et les matériaux supports tel le silicium. Chacune de ces trois typologies de matériaux permet de constituer des composites aux propriétés spécifiques à l'usage envisagé.

- Matière première :

Matériau d'origine naturelle qui fait l'objet d'une transformation artisanale ou industrielle. La laine, le coton et l'argile sont des matières premières naturelles.

- Produit :

Est dit produit ce qui naît de l'activité de l'homme et de la nature. Un produit de base est un produit de l'agriculture, de la pêche, de la forêt, et tout produit minéral, disponible sous forme naturelle, ou ayant fait l'objet d'une transformation.

Un produit industriel représente la valeur totale des productions de biens provenant de l'industrie.

- Composant :

Un composant est un objet, une substance, un élément qui rentre dans une composition. Il s'agit également d'un élément standard utilisé dans la construction de produits industriels de série, tels les machines, appareils, portes, fenêtres...

Il peut s'agir d'éléments préfabriqués industrialisés de gros œuvre ou de second œuvre.

- Système constructif :

Un système constructif est un système de construction utilisant une gamme définie de composants modulaires préfabriqués. Il s'agit également d'un ensemble cohérent de composants industrialisés. Par exemple un système constructif d'actualité, le système ossature bois plateforme.

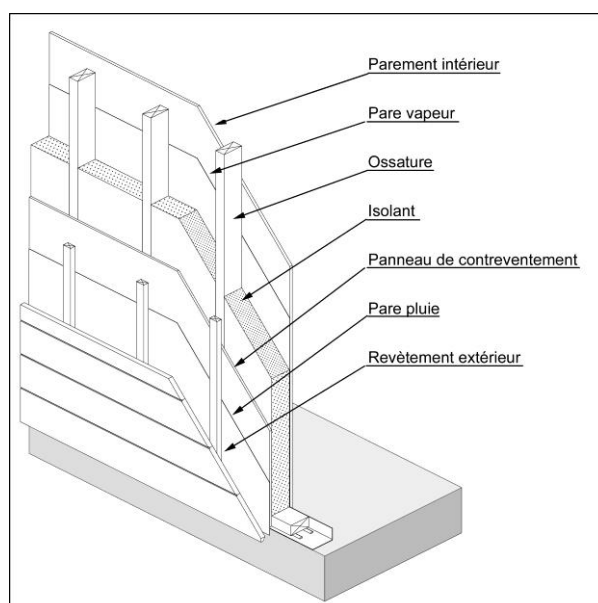


Figure 20 : Le système constructif ossature bois plateforme [CD2E, 2006].

- **Ouvrage :**

L'ouvrage est associé en premier lieu à une action de mise en œuvre, un travail, une tâche.

Il s'agit souvent du travail de l'artisan et de l'artiste.

Dans le domaine du bâtiment, les gros ouvrages sont synonymes de gros œuvre tandis que les ouvrages légers ou menus sont synonymes de petite maçonnerie.

L'ouvrage global représente l'association du gros œuvre et du second œuvre au sein du système constructif « bâtiment ».

Pour synthétiser, nous proposons de repositionner les concepts en ordre logique cohérent par rapport aux us & coutumes du monde du bâtiment :

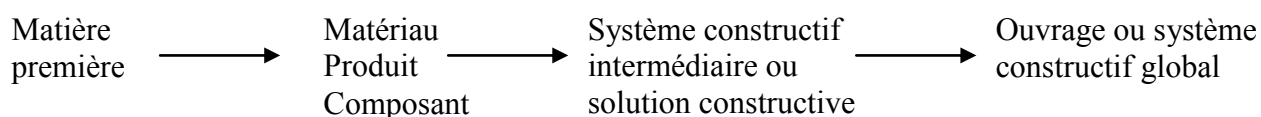


Figure 21 : Proposition d'ordre logique des différents concepts associés à une démarche de conception de bâtiment

3.2.2 Matériaux, composants d'un bâtiment et solutions constructives associées : exemples de raisonnement

Les différentes définitions et systèmes de classement proposés au chapitre précédent ne correspondent pas tous au langage de la construction utilisé par les acteurs de terrain, artisans, constructeurs, bureaux d'études techniques, maîtres d'œuvre. Hormis le système UNICLASS et la méthode UNTEC, ils font tous référence à des concepts difficiles d'appropriation, ce qui constitue un frein à la compréhension future de l'outil que nous proposons d'élaborer.

Il est néanmoins nécessaire de proposer et d'utiliser un classement pour ordonner les informations collectées et rendre cohérent l'approche finale d'ingénierie financière recherchée.

Un des outils [BATIPRODUITS, 2008]⁸⁷ utilisé par les utilisateurs intermédiaires du monde de la construction de bâtiment hiérarchise les matériaux et produits de construction par familles de produits, destinations ou usages et corps d'état principaux. Cette hiérarchisation correspondant aux attentes des acteurs de terrain est disponible de manière exhaustive en ANNEXE 9.

Prenons l'exemple d'un produit de construction considéré comme d'usage traditionnel en France, le bloc béton ou parpaing creux aggloméré :

Selon cette hiérarchisation, le parpaing se retrouve classé comme suit :

CORPS D'ETAT (Catégories principales)	DESTINATIONS (Catégories secondaires)	Familles de produits (sous catégories)
Fondations / Structure / Maçonneries / Façades		
	1.3 Matériaux et accessoires pour gros œuvre	
		1.3.8 Blocs

Tableau 33 : Classement du produit de construction « parpaing creux aggloméré » au sein de la hiérarchisation « Batiproduits ».

On notera qu'on retrouve, au sein de la destination « matériaux et accessoires pour gros œuvre », le produit complémentaire par nature au bloc béton, le ciment ou la chaux puisqu'essentiel à la mise en œuvre du bloc béton en tant que constituant du système constructif « mur porteur ».

CORPS D'ETAT (Catégories principales)	DESTINATIONS (Catégories secondaires)	Familles de produits (sous catégories)
Fondations / Structure / Maçonneries / Façades		
	1.3 Matériaux et accessoires pour gros oeuvre	
		1.3.2 Ciments
		1.3.3 Chaux

Tableau 34 : Cassement du produit de construction « ciment / chaux » au sein de la hiérarchisation « Batiproduits ».

Le bloc béton maçonné au ciment ou à la chaux hydraulique ne représente pas en lui-même un système constructif fini à part entière : pour des questions de performance thermique minimale réglementaire, il est associé à un système d'isolation rapportée par l'intérieur ou plus récemment à une isolation rapportée extérieure (isolation thermique par l'extérieur ITE ou « mur manteau »)¹

Le système d'isolation rapportée dépend quant à lui d'un nouveau corps d'état et d'une nouvelle destination :

CORPS D'ETAT (Catégories principales)	DESTINATIONS (Catégories secondaires)	Familles de produits (sous catégories)
Doublages / Cloisons / Plafonds		
	4.1 Isolants et doublages (thermiques et acoustiques) hors plancher	
		4.1.1 Isolant thermiques ou acoustiques en vrac ou floqués
		4.1.2 Isolants thermiques ou acoustiques en plaques ou rouleaux

Tableau 35 : Classement du produit de construction isolant thermique en plaque (ex laine de roche) au sein de la hiérarchisation « Batiproduits ».

Cette classification pragmatique adaptée aux usages des professionnels de la prescription et de la mise en œuvre dans le secteur du bâtiment est intéressante mais cloisonne finalement les matériaux et produits vis-à-vis de leur aptitude à la fonction au sein de leur famille de produits.

Une autre démarche issue de l'éco-conception et des modèles de déclaration environnementale / éco-bilans permet de présenter les matériaux et produits au sein de systèmes constructifs sur leur durée de vie théorique et typique, il s'agit de la notion d'unité fonctionnelle « UF ».

¹ Pour plus d'informations sur le mur manteau et l'isolation thermique par l'extérieur, consulter www.groupement-mur-manteau.com

3.2.3 Notion d'unité fonctionnelle « UF »

Selon le standard ISO international [ISO TR 14049, 2000]⁸⁸, l'unité fonctionnelle est définie par la performance quantifiée d'un système (produit, matériau, bâtiment) destiné à être utilisée comme unité de référence dans une analyse en cycle de vie [ISO 14040 & 14041, 1997]⁸⁹.

En général, une unité fonctionnelle comporte une unité de quantité, une unité de temps et une unité de performance.

Quelques exemples d'unités fonctionnelles :

- pour le système d'isolation rapportée « Florapan plus » d'Isover¹, l'unité fonctionnelle est décrite comme « *réalisation d'une fonction d'isolation thermique sur une parois de 1 m² pendant une annuité, en assurant les performances prescrites du produit* ».

- pour une peinture « lasure très longue durée » fabriquée par Blanchon², il s'agit d'assurer la fonction de protection et de décoration d'1 m² de boiseries extérieures (1 m² en œuvre) pendant 40 ans.

- pour un bloc monomur à isolation répartie³, terre cuite rectifiée pour pose à joints minces, 30 cm, (trois fabricants en France), il s'agit « d'assurer la fonction de mur porteur (structure et clos) sur 1 m² de parois et une isolation thermique (résistance thermique additive de 2.5 ° K/m²/w) pendant une annuité.

Pour le Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement (CETE), une unité fonctionnelle est la référence par rapport à laquelle est réalisée une analyse en cycle de vie, donc une FDES : l'unité fonctionnelle comporte trois grandeurs : quantité + fonction + temps ou durée de vie typique (DVT) [CETE Ouest, 2007]⁹⁰.

Les produits complémentaires (colles, vis etc..) peuvent être inclus dans l'unité fonctionnelle.

Enfin, pour le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) [LEMAIRE, 2006], les produits de construction ne sont pas comparables directement ; il est donc nécessaire de les assembler en solutions constructives pour qu'ils puissent constituer des ensembles comparables.

L'unité fonctionnelle est ainsi « *la seule échelle, avant de considérer le bâtiment tout entier, qui permette d'effectuer une comparaison entre éléments réellement comparables* » (action globale au sens de l'analyse multicritères), soit la même durée de vie pour les mêmes performances et pour la même quantité.

Nous proposons ainsi, en complément du système de classification élaboré (voir paragraphe 2.2.4.1), d'utiliser la notion d'unité fonctionnelle comme référence de comparaison entre différentes solutions constructives.

¹ FDES Florapan Plus, disponible sur INIES http://www.inies.fr/documents/produits/Prod153_doc1.pdf

² FDES lasure longue durée Blanchon, disponible sur INIES http://www.inies.fr/documents/produits/Prod52_doc1.pdf

³ FDES bloc monomur terre cuite à joints minces, disponible sur INIES http://www.inies.fr/documents/produits/Prod19_doc2.pdf

3.2.4 Proposition de systèmes constructifs majeurs (en lien notamment avec les enjeux actuels de performance énergétique)

Avant de centrer la méthodologie de travail sur le secteur des éco-matériaux pour la construction par comparaison à des solutions conventionnelles, il est important de définir les systèmes constructifs majeurs dans lesquels s'inscrivent ces éco-matériaux, en lien avec les nouveaux enjeux du monde du bâtiment : développement durable, environnement, performance énergétique, gestion des déchets, nouveaux métiers et savoir faire, qualité globale, service

Sans occulter les autres impacts environnementaux majeurs du secteur du bâtiment en France, la première préoccupation (chapitre 1, paragraphe 1.1, « construction et développement durable » et le paragraphe 2.2.4.3 « les critères partagés avec les acteurs de terrain ») est portée sur la consommation énergétique et les émissions liées de gaz à effet de serre (GES).

Selon l'Agence Qualité Construction [AQC, 2008]⁹¹, le parc immobilier français est composé de 30 millions de logements, dont 25 millions de résidences principales. La consommation énergétique en France du secteur habitat et tertiaire représente 46 % de la consommation totale et le chauffage représente 70 % des consommations des logements. L'eau chaude sanitaire (ECS) et les équipements ménagers représentant 30 %.

L'habitat est responsable de 23 % des émissions de GES nationales tous secteurs confondus et 65 % des logements ont été construits avant 1974, date de la première réglementation thermique.

Leur consommation moyenne est estimée à 370 kwh d'énergie primaire par m² et par an (limite RT 2005 250 kwh ep/m²/an, basse consommation pour 2010-2012 : 50 à 60 kwh d'énergie primaire (Ep) par m² et par an.

L'Agence pour l'Environnement et la Maîtrise de l'Energie (ADEME) en France quantifie ainsi les déperditions thermiques moyennes dans l'habitat pour une maison individuelle non isolée :

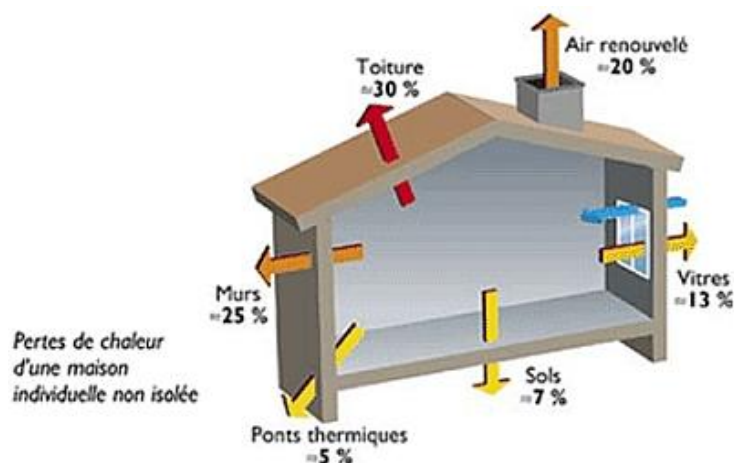


Figure 22 : Pertes de chaleur d'une maison individuelle non isolée, [ADEME, 2008]¹.

Selon l'enquête nationale des logements existants [Ministère du logement, 2002], 55 % des maisons individuelles n'ont pas fait l'objet de travaux d'amélioration thermique de la toiture (30 % des déperditions d'une maison) depuis 20 ans ; 41 % des logements sont équipés de simples vitrages (13 à 15 % des déperditions thermiques) ; 37 % ont recours à un

¹ Voir le guide de l'isolation thermique de l'ADEME publié sur son site web et disponible sur http://www.ademe.fr/particuliers/Fiches/isolation_thermique/rub1.htm

chauffage d'appoint et 38 % des logements ont une isolation thermique de qualité insuffisante

Une étude plus récente du club de l'amélioration de l'habitat [CAH, 2008]⁹² affine d'avantage certains chiffres : La consommation unitaire moyenne d'énergie en résidence principale est de 211 kWh ep par m² et par an en 2005, tous usages compris. Le premier poste de consommation est le chauffage (66%), puis l'électricité spécifique (16%), l'eau chaude sanitaire (12%) et enfin la cuisson (7%). Les logements représentent 29% de la consommation finale d'énergie en France et 13% des émissions nationales de gaz à effet de serre.

En 2005, chaque ménage consacre en moyenne 1 419 € par an pour l'énergie dans son logement. En 2004, 2,9 millions de ménages (soit 11,1% des ménages français) ont engagé des travaux de maîtrise de l'énergie dans leur logement.

Parmi eux, 2 millions ont fait des travaux d'isolation (dont 600 000 pour des travaux de changement de fenêtres et/ou de pose de double vitrage), soit 7,7% des ménages, 857 000 ménages sont intervenus sur leur système de chauffage (3,3% des ménages) et ont dépensé en moyenne 3 206 € pour ces travaux.

A partir de la figure 22 « schéma des déperditions thermiques d'une maison non isolée », nous pouvons rapprocher les postes de déperditions des solutions constructives correspondantes, conventionnelles et traditionnelles ou plus récentes et innovantes.

Il manque néanmoins l'identification d'une catégorie de déperditions souvent négligée en France car mal connue et donc peu ou pas du tout gérée par les entreprises de construction : l'étanchéité à l'air. Afin de d'assurer de bonnes conditions d'hygiène et de limiter le gaspillage d'énergie dans un bâtiment, il est nécessaire de maîtriser les flux d'air, Cette maîtrise requiert une bonne étanchéité des parois du bâtiment.

L'étanchéité à l'air ou perméabilité à l'air est souvent négligée dans les bâtiments, ce qui peut engendrer de gros problèmes de qualité d'air et d'inconfort thermique et acoustique, en plus du gaspillage d'énergie [CETE, 2006]⁹³.

En approche simplifiée, on peut schématiser les défauts d'étanchéité d'une maison conventionnelle et d'une maison passive (consommation de chauffage < 15 kwh d'énergie primaire par m² et par an) par un disque :

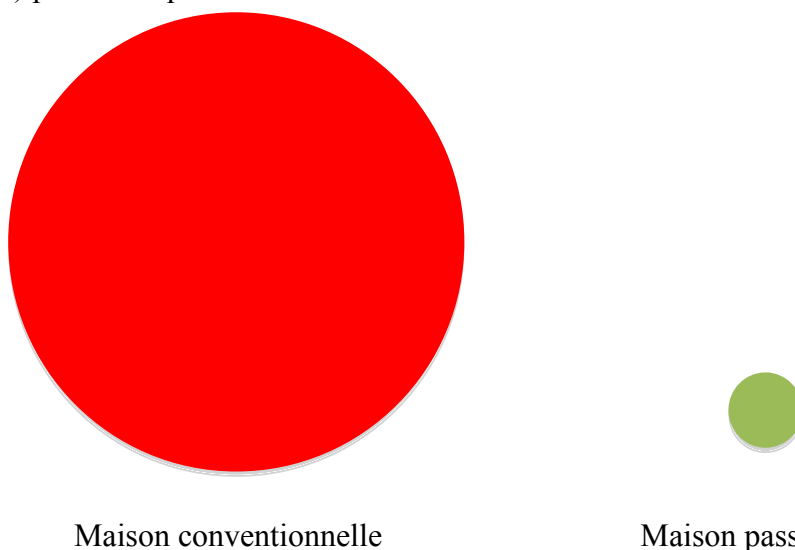


Figure 23 : Ordres de grandeurs de la surface équivalente de fuites d'air dans une maison conventionnelle¹ et pour une maison passive, pour un renouvellement d'air de 0,8 m³/ h/m².

¹ Maison conventionnelle : 110m², 2,75 hauteur sous plafond, volume de 275 m³ et surface froide de 196 m², Maison passive : mêmes caractéristiques mais étanchéité bien gérée.

Quantification des infiltrations	Maison conventionnelle ¼ du renouvellement d'air soit 25 %	Maison passive 8 % du renouvellement d'air
----------------------------------	---	---

En Allemagne, une étude a mis en évidence l'importance de la gestion des moindres détails pour une bonne application des stratégies d'étanchéité à l'air [DBZ 12/89, 2000].

Une surface de 1m par 1m, sur une épaisseur de 14 cm (isolation standard en Allemagne) a été étudiée avec le logiciel WUFI¹, programme calculant le transfert de chaleur et de masse dans les composants du bâtiment : pour des conditions de température intérieure de 20 °C, extérieure de -10 °C, une fente de 1 mm dans cette surface de 1 m² représente une augmentation de déperdition thermique de 4,8 X.

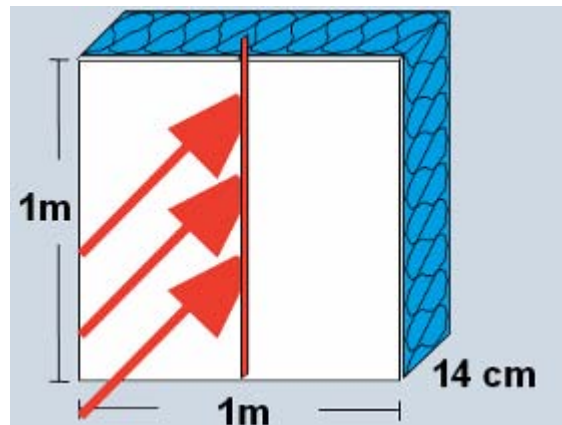


Figure 24 : Essai de structure d'isolation thermique, fente dans freine vapeur de 1mm devant mur isolé de 1 m² avec 14 cm d'isolation thermique, [PROCLIMA, 2007].

La valeur U ($U = 1/R$ et $R = e/\lambda$) est de 0,3 W/m².K sans fente (étanchéité à l'air théoriquement parfaite), et de 1,44 W/m².k avec une simple fente de 1mm. Une étanchéité à l'air pas ou mal gérée revient à anéantir complètement les performances théoriques annoncées de tout système d'isolation thermique.

L'interprétation de cette étude est sans équivoque : en France, la majorité des systèmes constructifs, et plus spécifiquement ceux relevant de la construction ossature bois, sont mis en œuvre sans gestion fine de l'étanchéité à l'air : absence de raccordement des menuiseries au bâti et des membranes d'étanchéité aux éléments adjacents, non gestion des passages de gaines, utilisation de produits (colles, adhésifs) non conformes, mise en œuvre non soignée. De nombreux témoignages de chantiers confirment cette tendance ; les formations des entrepreneurs aux économies d'énergies et aux offres globales (FEEBAT)² récemment lancées pour positionner tous les corps d'état sur le marché de la rénovation thermique.

Pour revenir aux systèmes constructifs pouvant être considérés comme majeurs, la clé d'entrée se situe donc au niveau des principales déperditions thermiques d'une enveloppe peu ou mal isolée.

Il est possible de faire correspondre ces déperditions à des solutions constructives ainsi qu'à des corps d'états (cf batiproduits) et des unités fonctionnelles telles que définies précédemment, pour déterminer des systèmes constructifs majeurs :

¹ WUFI, disponible sur www.wufi.de, Institut de Physique du Bâtiment de Stuttgart.

² FEEBAT, formations aux économies d'énergie dans le bâtiment, lancées en 2008 suite au grenelle de l'environnement. Voir

Principales déperditions thermiques	Murs : A	Toitures : B	Vitrages : C	Ponts thermiques : D	Sols : E	Etanchéité à l'air : F	Renouvellement d'air : G
Solutions constructives majeures							
<i>Fonctions cf DESHAYES</i>	- effet structurel - travail de la structure - thermique de l'enveloppe - contreventement - calepinage	- Thermique de l'enveloppe - infiltrations	- thermique de l'enveloppe - infiltrations	- thermique de l'enveloppe - tramage - calepinage	- Effet structurel et descentes de charge - Thermique de l'enveloppe	-Infiltrations -Gestion des dilatations -Tramage	-Infiltrations -Traitement des nuisances acoustiques
<i>UNICLASS (table G)</i>	- G25 Walls Frame - G 2-Isolated structural members	-G24 Roofs	G 32 Openings	- G 2 Frame, Isolated structural members	- G21 Fondations - G 22 Floors	- G 25 Walls - G 24 Roofs - G 32 Openings	- G52 Heating / Ventilation / Air conditioning
Corps d'état (batiproduits)	- Structures, maçonneries, façades -Doublages, cloisons, plafonds	-Couverture / toiture terrasse, étanchéité - Isolation, cloison, plafond	-Menuiseries extérieures	- Doublages, cloisons, plafonds -Structures, maçonneries, façades -Couverture / étanchéité -Menuiseries extérieures -Dalles	- Structure / maçonnerie / façades - Fondations -Revêtements de sol	Couverture / toiture terrasse, étanchéité	Ventilation, conditionnement d'air
Unités fonctionnelles associées (cf INIES & FDES)	- A0 : Assurer la fonction de mur porteur (structure et clos) sur 1 m ² de paroi pendant une annuité, tout en assurant une isolation acoustique (Rw(C,Ctr) de 54 (-3, -5) dB) additive à celle d'un doublage) et une isolation thermique (résistance thermique de 0,21 m ² .K/W additive à celle d'un doublage). - A1 : Assurer la fonction de mur porteur (structure et clos) sur 1 m ² de paroi et une isolation thermique (résistance thermique globale minimale : 2,3 m ² *K/W ¹) pendant une annuité - A2 : Assurer la fonction d'isolation thermique rapportée, sur 1 m ² de parois, pendant une annuité, en assurant les performances prescrites du produit (résistance globale du mur : 2,3 m ² *K/W) - A3 : Assurer la fonction de protection de 1 m ² de parois verticale type « bardage » ou « enduit », pendant une annuité, en assurant les performances propres à l'enveloppe du bâtiment.	- B1 : Assurer une fonction d'isolation thermique sur 1 m ² de toiture, (résistance thermique globale de 4 m ² *K/W ²⁵) sous forme de panneau semi rigide ou rouleau, ignifugé d'épaisseur 100mm, mis en œuvre sous un revêtement d'étanchéité (pare pluie HPV), pendant une annuité et sur une durée de vie typique de 50 ans. - B2 : Assurer la fonction de couverture de 1 m ² de toiture pendant une annuité - B3 : Assurer la fonction de supporter des éléments de plancher ou de toiture, pendant une annuité, représentant un volume de bois lamellé collé de 0,28 m ³ .	- C1 : Assurer la fonction d'un m ² de surface d'ouverture d'un bâtiment, par une fenêtre type ou porte fenêtre type, sur une durée de vie typique de 30 ans, avec les performances thermiques minimales Uw < 2,6 w/m ² .k et acoustiques Ra tr < 30 db (conformité NRA)	- D1 : Assurer la fonction de rupteur de pont thermique, sur une longueur de 1 mètre linéaire, pendant une annuité	- E0 : assurer la fonction de dalle porteuse plancher bas permettant une charge d'exploitaton, sur une surface de 1 m ² pendant une annuité - E1 : Assurer la fonction de dalle / plancher bas permettant une charge d'exploitation, tout en assurant une isolation thermique de l'ensemble de 2,3 m ² *K/W, sur une surface de 1 m ² pendant une annuité - E2 : assurer la fonction d'isolation thermique rapportée, sous ou sur 1 m ² de dalle / plancher, pendant une annuité.	- F1 Assurer la fonction de 1 m ² de frein vapeur, en assurant une étanchéité à la diffusion de vapeur d'eau variable (0,3 à 20 m) sur toiture chevrons classique, pendant une annuité	- G1 : Assurer la fonction de renouvellement d'air de 90 m ³ /h minimum (simple flux) ou de 20 m ³ /h (hygro b) pour une maison type de 4 pièces (arrêté du 28 octobre 1983) avec une consommation maximum de 0,25 Wh/m ³ par ventilateur (locaux à usages d'habitation), pendant une annuité

Tableau 36 : Proposition de correspondance « déperditions thermiques majeures » / solutions constructions / Unités fonctionnelles, en vue de la détermination de systèmes constructifs majeurs.

¹ Cf RT 2005, disponible sur <http://www.rt-batiment.fr>

Nous aboutissons ainsi à la mise en évidence de systèmes constructifs identifiés par

- Une solution constructive majeure : une fonction et une classification
- Une appartenance à un corps d'état
- Une définition d'une unité fonctionnelle

Chaque système constructif doit être ensuite analysé et re-décomposé de la manière la plus fine possible, pour en déterminer notamment le coût et le ratio main d'œuvre / produit nécessaire à la réalisation d'un raisonnement en coût global complet sur une durée de vie typique, mais également pour caractériser au plus juste les performances de chaque système (exemple performances thermiques cumulées de plusieurs matériaux représentant un système).

Nous pouvons donner un exemple de cette re-décomposition : prenons l'unité fonctionnelle : « Assurer la fonction de mur porteur (structure et clos) sur 1 m² de paroi et une isolation thermique (résistance thermique globale minimale : 2,3 m²*K/W¹) pendant une annuité ».

Les différents matériaux pouvant représenter cette unité fonctionnelle sont nombreux, les systèmes constructifs sont connus et font référence à une documentation technique unifiée² :

- mur porteur extérieur et isolation thermique rapportée par l'intérieur (DTU 20.1 & 45.1)
- mur porteur auto-isolant (brique monomur terre cuite, pierre ponce ou béton cellulaire) (DTU 20.1)
- mur porteur intérieur et isolation thermique rapportée par l'extérieur (DTU 20.1 et 45.1)
- mur composite ossature bois avec contreventement extérieur et isolation médiane (DTU 31.2)
- mur composite ossature métallique avec isolation rapportée (DTU 32 .1)
- mur en béton banché (DTU 23.1)

Le mur porteur auto-isolant à isolation dite « répartie » est ainsi décomposé comme suit :

Unité fonctionnelle	Système constructif type	Fonction	Classification Uniclass	Corps d'état	DTU	Descriptif et Composants ³
Assurer la fonction de mur porteur (structure et clos) sur 1 m ² de paroi et une isolation thermique (résistance thermique globale minimale : 2,3 m ² *K/W ⁴) pendant une annuité	Mur « monomur » à isolation répartie ⁵	- effet structurel - thermique de l'enveloppe - contreventement	G 25 & G2	Structures / Maçonneries / Façades	20.1	Descriptif : Fourniture et mise en oeuvre de briques creuses à perforations verticales de 30 cm d'épaisseur, en pose roulée au mortier colle (valeur incluse dans prix brique), Up : 0.37 W/m ² .K, (R= 2,7) pour murs extérieurs sans ouverture. Composants : BRIQUE TERRE CUITE MONOMUR 373 X 300 X 249 MM (20 KG) 10,7/M2 avec mortier colle pour mise en oeuvre à joint mince (maçonnerie dite « roulée »)

Tableau 37 : Proposition de dé-composition du système constructif « mur monomur à isolation répartie ».

¹ RT 2005, disponible sur <http://www.rt-batiment.fr>

² Règles professionnelles et Documents Techniques Unifiés (DTU) www.cstb.fr

³ Selon Batiprix – Le Moniteur, 2008 www.batiprix.com

⁴ RT 2005, disponible sur <http://www.rt-batiment.fr>

⁵ Groupement des industriels des briques et tuiles terre cuite, www.fft.org

Pour chaque unité fonctionnelle, nous pouvons proposer de lister les systèmes constructifs majeurs correspondant ;

Unité fonctionnelle	Système constructif 1	Système constructif 2	Système constructif 3	Système constructif 4
A0 : mur porteur sans isolation complémentaire	Mur parpaing béton maçonné ciment	Mur ossature bois	Mur béton armé	
<i>Descriptifs</i>	Mur en agglomérés ciment creux, de 20 cm d'épaisseur (20x50 cm, 20 kg), hourdés au mortier bâtard 350 kg, y compris affleurement des lits en montant et harpages	Mur extérieur droit à rez de chaussée pour façade ou pignon de MOB. Trame de départ ou d'arrivée long. 5,20 m, ht jusqu'à 2,75 m. Ossature 45x120, pas de 400 mm, contreventement OSB 10 mm	Voile périphérique ou refend ép. 0,20 m en béton armé à 400 kg, fabriqué sur le chantier, avec armature en treillis soudé, y compris coffrage en bois et décoffrage (en amortissement).	
A1 Mur porteur à isolation répartie	Mur monomur terre cuite	Mur monomur béton cellulaire	Mur monomur pierre ponce	
<i>Descriptifs</i>	Fourniture et mise en oeuvre de briques creuses à perforations verticales de 30 cm d'épaisseur, en pose roulée au mortier colle (valeur incluse dans prix brique), Up : 0.37 W/m2.K, pour murs extérieurs sans ouverture.	Murs en blocs de béton cellulaire de 30 cm d'épaisseur (25x62,5 cm, poids 28,6 kg), montage soigné au mortier colle, compris coupes et harpages	Mur en bloc monomur pierre ponce de 30 cm d'épaisseur montage maçonnerie traditionnelle mortier batard 350 kg/m3 pierre ponce /chaux hydraulique NHL	
A2 Isolation thermique rapportée sur mur	Doublage panneau de polystyrène expansé + plaque de plâtre	Doublage panneau laine de roche, garnissage plaque de plâtre	Doublage panneau de mousse de polyuréthane, garnissage plaque de plâtre	Doublage panneau de polystyrène expansé, Isolation par l'extérieur
<i>Descriptifs</i>	Fourniture et mise en oeuvre de doublage de murs par collage de panneaux polystyrène expansé garnis d'une plaque de plâtre (10+100 mm), compris finition des joints entre plaques par bandes et enduit spécial. (Rt 2,70 m2.K/W).	Fourniture et mise en oeuvre de doublage de murs par collage de panneaux de laine minérale (roche) garnis d'une plaque de plâtre (10+100 mm) sans pare-vapeur, compris finition des joints entre plaques par bandes et enduit spécial. (Rt 2,90 m2.K/W).	Fourniture et mise en oeuvre de doublage de murs par collage de panneaux de mousse de polyuréthane garnis d'une plaque de plâtre (10+100 mm), compris finition des joints entre plaques par bandes et enduit spécial. (Rt 3,75 m2.K/W).	Isolation thermique par l'extérieur pour construction neuve ou ancienne, sur structure maçonnée, comprenant isolant polystyrène de 50 mm ép. en fixation calée/chevillée et enduit de base et marouflage (pour finition par enduit organique à reprendre).
A3 Bardage et vêtture	Bardage clin pin des landes	Bardage PVC cellulaire	Enduit au mortier de ciment	Enduit au mortier de chaux hydraulique
<i>Descriptifs</i>	Bardage plan sapin du Nord raboté, classe 3, traité autoclave, comprenant toutes sujétions de découpes et fixations.	Bardage plan PVC cellulaire lisse blanc ou sable au pas de 166 mm, comprenant toutes sujétions de découpes et fixations	Enduit dressé au mortier de ciment de 20 mm d'épaisseur, sur parties verticales.	Enduit tyrolien de 3 à 5 mm d'épaisseur, sur parties verticales
B1 Isolation thermique de toiture	Isolation rouleaux de laine de verre sur solives	Isolation double couche sur solives et suspentes	Isolation laine de verre avec kraft pare vapeur agrafé	Isolation panneau de polystyrène expansé pour ITE
<i>Descriptifs</i>	Isolation des combles par feutre en laine de verre revêtue kraft quadrillé, 1 face, ép. 160 mm, (Rt 4.00 m2.K/W), déroulé sur solives (au m2 en plan).	Isolation des combles par double épaisseur de laine de verre, posée croisée, 1ère ép. 60 mm en panneau semi-rigide nu + 2ème ép. 120 mm rouleau avec par-vapeur kraft, embrochées sur suspentes métallique fixées aux chevrons.	Isolation thermique et acoustique des combles par feutre laine de verre revêtue kraft par-vapeur 1 face, ép. 90 mm avec 2 languettes pour agrafage entre chevrons	Isolation thermique et acoustique par panneau de polystyrène expansé, vissé sur voligeage en réhabilitation
B2 Couverture de toiture	Couverture en tuiles terre cuite	Couverture en plaques ondulées	Couverture en tuiles béton	Couverture en bardeaux bitumés
<i>Descriptifs</i>	Couverture en tuiles à emboîtement petit moule à onde douce, (20/m2) en terre cuite rouge ou vieillie. Pose à joints droits. Rampants jusqu'à 12 m de projection horizontale. Utilisation en zone 2, en site normal, sans écran de sous-toiture.	Couverture en plaques ondulées, non coins coupés 5 ondes de 158 x 92 cm en fibres-ciment sans amiante de teinte naturelle fixée sur charpente bois.	Couverture en tuiles planes en béton à emboîtement, long. 38x23 cm larg. hors tout, en teintes classiques, pour pureau long. 30,5 à 25,5 cm, (16,4 à 19,6 u/m2, poids unitaire 2,80 kg, soit 45,9 à 54,9 kg/m2). Pose à joints croisés.	Couverture en bardeaux bitumés 1,00 x 0,36 carrés posés à la française sur liteaux, pureau de 155 mm, y compris fixations par crochets inox à pointe.
B3 Structure de toiture	Poutres bois composite lamellé collé	Poutres acier métalliques	Charpente à fermettes industrialisées	Charpente traditionnelle avec fermes à entrain retroussé et pannes

<i>Descriptifs</i>	Solive en I avec âme en OSB de 89 x 200 mm, compris abouts de solive pour fixation par étriers	Charpente légère en tubes d'acier ronds, carrés ou rectangulaires 60x60x3,2 mm pour exécution d'abris, auvents, etc., avec poteaux, pannes et accessoires. Protection antirouille de l'ensemble.	Fermette 2 pans 45°, portée 5,41 à 6,60 m, combles habitables en bois résineux, traité classe 2, assemblés par connecteurs métalliques galvanisés cloués, espacée de 0,60 m (contreventements, filants, antiflambement, poutres au vent etc..).	Ferme simple en sapin de pays, assemblée en charpente traditionnelle. Panne intermédiaire en sapin de pays, pour charpente traditionnelle. + Chevonnage en sapin de pays sur charpente traditionnelle
C1 Ouverture de bâtiment	Fenêtre bois standard	Fenêtre de toit standard	Fenêtre aluminium	Fenêtre PVC standard
<i>Descriptifs</i>	fenêtre croisée standard ouvrant à la française, 1 vantail, oscillo battant, de ht 145 x 90 cm en chêne massif français, ép 56 mm (ouvrant), double vitrage 4-16-4 faible émissivité argon, poignée non comprise	fourniture et pose de fenêtre basculante menuiserie pin massif pour toit en pente, à double vitrage 4-16-4 argon faible émissivité, dimensions 134*98 cm, posée en première installation	Châssis oscillo-battant ht. 115 x 80 cm larg., 1 vantail, alu RPTH, laqué blanc. Dormant/ouvrant 60, appui 120 mm. Vitrage 4-16-4 ITR. Ferrage avec système de fermeture oscillo-battant et poignée laquée. Fixation, pose sur fond de joint et joint étanche	Croisée standard ouvrante à la française 1 vantail ht 115 x 80 cm, en PVC blanc ép. 60 mm, vitrage isolant 4-16-4 faible émissivité. Ferrage paumelles, crémone à galets 3 points, poignée époxy. Fixations et pose sur fond de joint et joint d'étanchéité.
D1 : Rupteur de pont thermique	Rupteur de pont thermique pour plancher			
<i>Descriptifs</i>	Rupteur de pont thermique transversal pour plancher EP 17 ou 20 cm			
E0 : dalle porteuse	Dalle porteuse coulée au ciment gris			
<i>Descriptifs</i>	Dallage désolidarisé de 15 cm d'ép. en béton prêt à l'emploi (BPS XC1 C25/30) dosé à 260 kg, compris treillis soudé (11 kg/m ²), finition tirée à la règle.			
E1 : dalle porteuse auto isolée	Dalle porteuse auto-isolée, sable de pierre ponce / chaux hydraulique	Dalle porteuse auto-isolée, sable de pierre ponce, ciment gris		
<i>Descriptifs</i>				
E2 : Isolation sur ou sous dalle	Isolation périphérique sous dalle en polystyrène expansé			
<i>Descriptifs</i>	isolation sous-face de plancher par panneaux en fibres bois agglomérées ciment à 2 faces brutes, épaisseur 50 mm de longueur 2,00 x 0,60 m largeur, compris fixations par spirales			
F1 : frein ou pare vapeur	Frein vapeur régulateur de vapeur (hygrovariable)	Ecran pare vapeur		
<i>Descriptifs</i>	film régulateur de vapeur à base de polyéthylène recyclé, pose en indépendance avec lés jointoyés par bande adhésive, multi-supports	Ecran pare vapeur à base de polyoléfine (FPO), ép 0,25 mm, pose en indépendance avec lés jointoyés par bande adhésive, sur support béton, béton cellulaire, tôle acier, bois ou dérivé du bois		
G1 : Renouvellement d'air	Ventilation mécanique contrôlée simple flux	Ventilation mécanique contrôlée, simple flux hygro B	Ventilation mécanique contrôlée, double flux	
	Kit VMC simple flux, 1 cuisine et 2 sanitaires, extracteur à 3 entrées et 1 sortie, avec bouches et manchettes et 3 liaisons acoustique, et avec 1 bouton minuterie. Débit d'air, extraction 90 m ³ /h mini à 250 m ³ /h maximum.	Kit VMC hygro réglable simple flux, 1 cuisine bouche électrique, 1 bain bouche électrique et 1 WC, 3 entrées et 1 sortie y compris manchettes à piquage- baïonnette et colliers	Kit, VMC double flux pour 1 cuisine et 3 sanitaires, comprenant 1 caisson d'extraction, 1 caisson d'insufflation et 1 caisson échangeur, piquages-baïonnette-3 pour extraction sanitaires, 1 pour la cuisine, 2 insufflations séjour et 3 pour chambres.	

Tableau 38 : Proposition de systèmes constructifs majeurs correspondant aux unités fonctionnelles correspondant aux principales déperditions thermiques.

3.3 Construction de familles de critères techniques, économiques et financiers par système constructif majeur

3.3.1 Hypothèses préliminaires

Pour faire référence à l'ébauche de définition et de choix d'indicateurs par famille de critères, permettant d'analyser chaque système constructif majeur, nous avons indiqué que :

« A chaque famille de produits et/ou solution constructive étudiée correspondent des critères techniques, financiers et économiques identiques mais aussi différents qu'il faut adapter au cas par cas » (paragraphe 2.2.4.2, chapitre 1).

Chaque système constructif majeur doit être décrit de la manière la plus exhaustive possible par des indicateurs communs et propres, répartis dans les champs techniques, financiers et économiques. Le champ environnemental sera abordé lors de la sélection d'éco-matériaux représentatifs du territoire d'étude, ie le Nord Pas de Calais.

Les critères de chaque famille seront définis de la manière la plus exhaustive possible, avec comme priorité de lister ceux qui sont incontournables ou fondamentaux, ainsi que ceux correspondant aux grands enjeux actuels auxquels doit répondre le secteur du bâtiment.

Par exemple, des critères fondamentaux correspondent aux caractéristiques incontournables et inhérentes à chaque famille de systèmes constructifs majeurs : une résistance à la compression pour un bloc destiné à la construction de murs extérieurs, une conductivité thermique ou un facteur de résistance à la diffusion de vapeur pour un isolant épais, une densité pour une plaque composite de bois multicouche etc...

Pour les enjeux actuels sociétaux, l'impact environnemental en terme de bilan carbone agrégé ou la dépense énergétique en phase process (énergie grise, cf. paragraphe 2.2.4.2) sont des indicateurs simplifiés, faciles de compréhension.

Des critères incontournables peuvent être communs à plusieurs familles de produits : par exemple le coût d'investissement initial ou le coût d'une taxation carbone éventuelle indexée sur le contenu carbone du produit, ou encore la durée de vie typique (DVT issue de l'analyse en cycle de vie).

3.3.2 Choix des indicateurs par famille de critères et systèmes constructifs majeurs

Reprenons les systèmes constructifs majeurs correspondant à chaque unité fonctionnelle associée aux principales déperditions thermiques.

Pour chaque système constructif, il est possible de proposer des indicateurs communs ou propres, correspondant aux familles de critères économiques, techniques et financiers, et d'en apporter une définition rigoureuse mais simple, selon le principe « KISS » :

Nous proposons d'abord une liste d'indicateurs communs à chaque unité fonctionnelle et système constructif présenté dans les champs techniques, économiques et financiers :

Familles de critères	1-Critères techniques			2-Critères économiques			3-Critères financiers			
	Indicateurs communs	N°	critère	définition	N°	critère	définition	N°	critère	définition
	1.0	Unité de référence	Unité de référence sur laquelle est basée l'unité fonctionnelle : m², kg de matière, m3...							
	1.1	Quantité / UF	Nb / quantité de matériaux ou composants correspondant à l'unité de référence du système constructif de l'unité fonctionnelle (UF)	2.1	Coût « matériaux » d'une unité fonctionnelle	Coût des matériaux (principaux et accessoires) pour la réalisation d'une du système constructif de l'unité fonctionnelle, en € HT par unité de référence (ex m² ou kg...)	3.0	Taux d'actualisation des valeurs monétaires	Le taux d'actualisation des valeurs monétaires permet de comparer un investissement effectué aujourd'hui avec des gains qui n'apparaîtront que dans le futur, c'est le principe de l'actualisation.	
	1.2	Heure de main d'œuvre	Quantité d'heure de main d'œuvre nécessaire à la réalisation de l'unité de référence du système constructif de l'unité fonctionnelle	2.2	Coût main d'œuvre pour une unité fonctionnelle	Coût de la main d'œuvre associée aux matériaux principaux, pour la réalisation de du système constructif de l'unité fonctionnelle : coût à l'heure de main d'œuvre ramené à l'unité de référence	3.1	Gains actualisés	Les gains ou bénéfices sont des valeurs exprimées en € réalisées soit en fonction des performances techniques propres au système constructif de l'unité fonctionnelle, soit en comparaison à d'autres performances d'un système constructif équivalent (un coût évité dans le champs économique s'inscrit dans le champ financier comme un « gain »).	
	1.3	DVT	Durée de vie typique du système constructif et/ou de ses constituants, de l'unité fonctionnelle	2.3	Coût « déboursé » total matériaux + main d'oeuvre	Coût total agrégé matériaux + main d'œuvre, pour la réalisation du système constructif de l'unité fonctionnelle, en € HT par unité de référence. Ce prix dit « déboursé » correspond au prix de vente par un professionnel, hors coefficient de frais généraux et hors coefficient de vente.	3.2	Temps de retour sur investissement simple	Le temps de retour sur investissement « simple » est le temps de retour au terme duquel la somme cumulée des gains financiers ou « bénéfiques » équivaut au montant de l'investissement consenti initialement. L'investissement devient rentable au terme de cette période. Objectivement, le temps de retour « simple » ou TRS doit être inférieur à la durée de vie économique de l'investissement.	
	1.4	Remplacements / Maintenance	Nombre de remplacements du système constructif et/ou de ses constituants sur la durée de vie typique (DVT) de l'unité fonctionnelle. Ces remplacements sont assimilés à de la maintenance sur la durée de vie typique du système constructif de l'unité fonctionnelle.	2.4	Coût déboursé ou « prix de revient »	Ce prix correspond au prix déboursé » pondéré par le coefficient correspondant aux frais généraux de l'entreprise (FG), soit en moyenne 30,5%, en € HT par unité de référence.	3.3	Prime / subvention	Aide de l'état français et/ou des collectivités locales pour le recours aux produits et services plus vertueux vis-à-vis de leur impact environnemental, venant minorer le montant d'investissement initial et le temps de retour sur investissement. Exprimée en % du montant de l'investissement ou en € par unité de référence.	
				2.4	Coût de vente ou « prix de vente » ou coût d'investissement initial	Ce prix correspond au prix de revient pondéré par un coefficient de vente de l'entreprise, concernant la main d'œuvre et les matériaux nécessaires à la réalisation du système constructif de l'unité fonctionnelle, en € HT par unité de référence. Ce coût correspond également à l'investissement initial.	3.4	Ratio coûts / bénéfices	Ce ratio actualisé permet de valoriser le temps de retour sur investissement « simple » d'un point de vue quantitatif : le projet mérite t-il d'être mené ou non.	

				2.5	Coût de maintenance	Coût correspondant au remplacement du système constructif et/ou de ses constituants sur la durée de vie typique (DVT) de l'unité fonctionnelle, en € HT par unité de référence	3.5	Valeur actuelle nette (VAN)	La Valeur actualisée Nette (VAN) exprime la différence entre les gains actualisés (cf 3.1 : bénéfices) et les dépenses actualisées (coût d'investissement initial actualisé), sur la durée de vie de l'investissement. Dès que la VAN est positive, l'investissement devient rentabilisé, on peut en déduire le temps de retour sur investissement correspondant
				2.6	Coûts de fonctionnement	Coût correspondant au fonctionnement associé ou annexe du système constructif de l'unité fonctionnelle, en € HT par unité de référence.			
				2.7	Coût global ou total	Coût global correspondant à la somme des coûts sur la durée de vie typique du système constructif de l'unité fonctionnelle : coût initial + coût de maintenance + coût de fonctionnement. En € HT par unité de référence.			
				2.8	Coût évité	Surplus de coût d'une solution souvent considérée comme « traditionnelle », par comparaison à une solution moins connue, dont les coûts de maintenance ou de fonctionnement sont moindres. La différence constitue des coûts évités pour la solution moins traditionnelle, permettant de légitimer son investissement par rapport à une solution plus traditionnelle. Exprimés en € par unité de référence			

Tableau 39 : Proposition d'indicateurs communs à chaque unité fonctionnelle et système constructif présenté, dans les champs techniques, économiques et financiers (liste non exhaustive).

Nous pouvons ensuite identifier des indicateurs spécifiques à chaque système constructif de chaque unité fonctionnelle correspondant aux déperditions thermiques « majeures », notamment dans le champ technique : ces indicateurs permettent spécifiquement de caractériser les propriétés fondamentales des matériaux associés au sein des systèmes constructifs décrits.

Reprenons les systèmes constructifs correspondant aux unités fonctionnelles choisies : le système constructif le plus commun, utilisé sur plus de 80 % des 250 à 300 000 maisons individuelles construites en France, est le mur parpaing béton maçonné ciment (A0-1) complété par une isolation thermique rapportée (A2-1).

Unité fonctionnelle	Système constructif 1	Système constructif 2	Système constructif 3	Système constructif 4
A0 : mur porteur sans isolation complémentaire	Mur parpaing béton maçonné ciment	Mur ossature bois	Mur béton armé	
A1 Mur porteur à isolation répartie	Mur monomur terre cuite	Mur monomur béton cellulaire	Mur monomur pierre ponce	
A2 Isolation thermique rapportée sur mur	Doublage panneau de polystyrène expansé + plaque de plâtre	Doublage panneau laine de roche, garnissage plaque de plâtre	Doublage panneau de mousse de polyuréthane, garnissage plaque de plâtre	Doublage panneau de polystyrène expansé, Isolation par l'extérieur
A3 Bardage et vêtur	Bardage clin pin des landes	Bardage PVC cellulaire	Enduit au mortier de ciment	Enduit au mortier de chaux hydraulique
B1 Isolation thermique de toiture	Isolation rouleaux de laine de verre sur solives	Isolation double couche sur solives et suspentes	Isolation laine de verre avec kraft pare vapeur agraphé	Isolation panneau de polystyrène expansé pour ITE
B2 Couverture de toiture	Couverture en tuiles terre cuite	Couverture en plaques ondulées	Couverture en tuiles béton	Couverture en bardeaux bitumés
B3 Structure de toiture	Poutres bois composite lamellé collé	Poutres acier métalliques	Charpente à fermettes industrialisées	Charpente traditionnelle avec fermes à entrain retroussé et pannes
C1 Ouverture de bâtiment	Fenêtre bois standard	Fenêtre de toit standard	Fenêtre aluminium	Fenêtre PVC standard
D1 : Rupteur de pont thermique	Rupteur de pont thermique pour plancher			
E0 : dalle porteuse	Dalle porteuse coulée au ciment gris			
E1 : dalle porteuse auto isolée	Dalle porteuse auto-isolée, sable de pierre ponce / chaux hydraulique	Dalle porteuse auto-isolée, sable de pierre ponce, ciment gris		
E2 : Isolation sur ou sous dalle	Isolation périphérique sous dalle en polystyrène expansé			
F1 : frein ou pare vapeur	Frein vapeur régulateur de vapeur (hygrovariable)	Ecran pare vapeur		
G1 : Renouvellement d'air	Ventilation mécanique contrôlée simple flux	Ventilation mécanique contrôlée, simple flux hygro B	Ventilation mécanique contrôlée, double flux	

Tableau 40 : Systèmes constructifs majeurs et unités fonctionnelles.

Le système constructif mur parpaing béton maçonné ciment est caractérisé par les critères techniques communs suivants :

Système constructif		A0-1
1.0	Unité de référence	1 m ² de mur porteur
1.1	Quantité / UF	10 blocs béton au m ² (dimensions : 20x20x50 cm, 20 kg unitaires) et 0,028 m ³ de mortier bâtard dosé à 350 kg/m ³ (ciment à 175 kg /m ³ et chaux à 175 kg/m ³)
1.2	Heure de main d'œuvre	1,098 heure / m ²
1.3	DVT	100 ans
1.4	Remplacements / Maintenance	0 sur DVT

Tableau 41 : Critères techniques simples du système constructif mur parpaing maçonné ciment.

Une représentation simple donnant les valeurs thermiques de référence et le profil de condensation de vapeur dans un tel mur peut être réalisée avec la base de données « matériaux de construction » du logiciel Suisse de simulation thermique d'une construction, LESOSAI¹.

mur parpaing seul

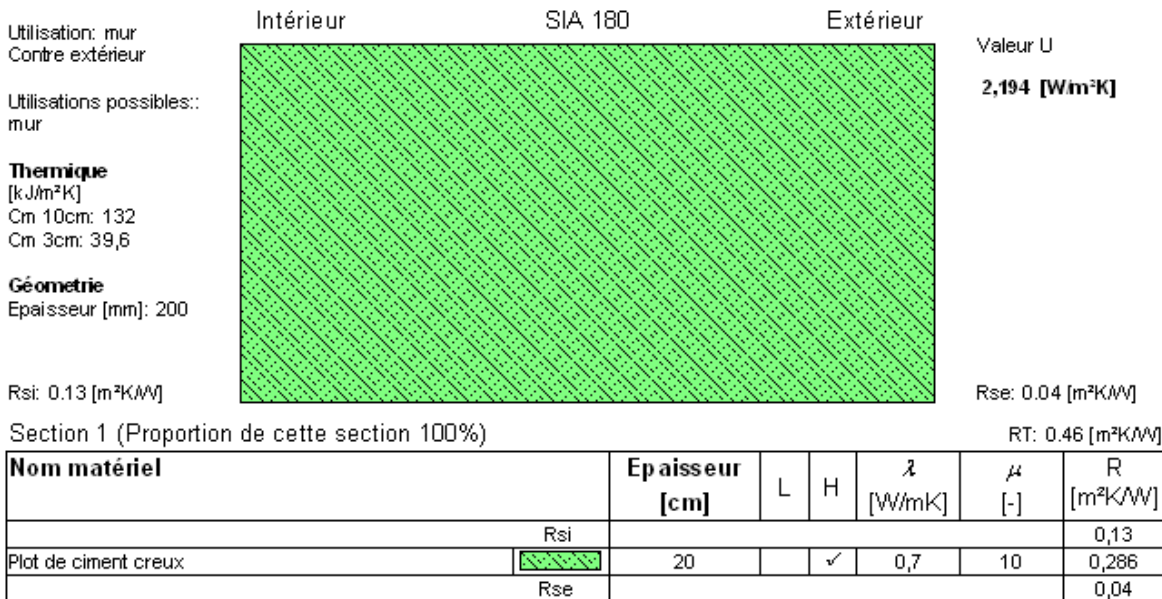


Figure 25 : Représentation d'un mur parpaing creux maçonné ciment, bibliothèque des systèmes constructifs, sous LESOSAI 6.0.

Le logiciel nous permet d'obtenir le profil de condensation de ce type de mur, sans isolation ni revêtement associé :

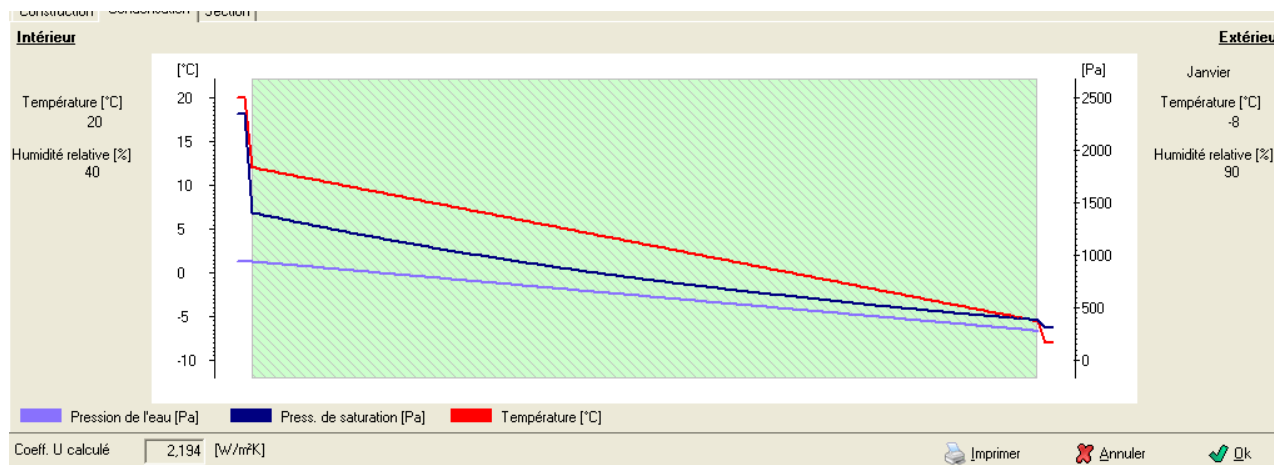


Figure 26 : Profil de condensation du mur parpaing creux maçonné ciment « brut », sous LESOSAI 6.0.

Il est intéressant de noter que ce type de mur, largement répandu dans les constructions précédant les premières réglementations thermiques en France (1975) n'isole pas (passoire thermique : $U = 2,194 \text{ W/m}^2\text{.K}$) mais ne condense pas non plus : la courbe bleu clair « pression de l'eau » ne croise jamais la courbe bleu foncé « pression de saturation ».

¹ LESOSAI, V 6.0 2008, EPFL, www.lesosai.com

En général, ce mur parpaing ne représente pas à lui tout seul un système constructif acceptable ; il est donc complété par les systèmes A2-1 et A3-3 pour le rajout d'une fonction d'isolation thermique et acoustique, de finition (esthétique) et de protection extérieure par rapport aux intempéries, conformément aux exigences techniques réglementaires en vigueur, notamment la réglementation thermique¹.

Les trois systèmes constructifs sont donc croisés pour représenter idéalement le système constructif « mur porteur isolé » mais caractérisé fréquemment sur le terrain par les acteurs professionnels comme système constructif fini.

Systèmes constructifs		A0-1	A2-1	A3-3
1.0	Unité de référence	1 m ² de mur porteur	1m ² de doublage isolant	1 m ² d'enduit CEM extérieur
1.1	Quantité / UF	10 blocs béton au m ² (dimensions : 20x20x50 cm, 20 kg unitaires) et 0,028 m ³ de mortier bâtard dosé à 350 kg/m ³ (ciment à 175 kg /m ³ et chaux à 175 kg/m ³)	1 m ² de panneau doublage polystyrène expansé (dimensions 2500x1200x10, 100 mm épaisseur), 1,8 kg de mortier adhésif, 0,45 kg de mortier en poudre et 1,5 ml de bande à joints	0,025 m ³ de mortier de ciment dosé à 500 kg / m ³ , au m ² .
1.2	Heure de main d'oeuvre	1,098 heure / m ²	0,54 heure au m ²	1,202 heure au m ²
1.3	DVT (sources : fabricants)	100 ans	50 ans	50 ans
1.4	Remplacements / Maintenance	0 sur DVT	0 sur DVT	0 sur DVT

Tableau 42 : Systèmes constructifs majeurs et unités fonctionnelles.

La nouvelle représentation simple du système constructif fini peut être simulée sous LESOSAI :

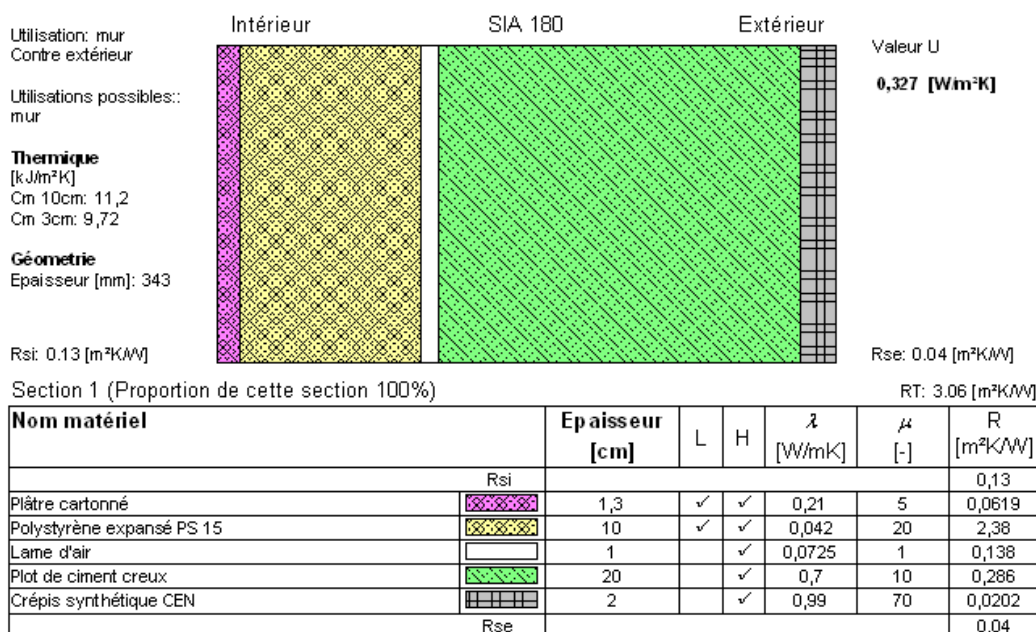


Figure 27 : Représentation d'un mur parpaing creux maçonné ciment, système « fini », bibliothèque des systèmes constructifs, sous LESOSAI 6.0.

¹ Réglementation thermique 2005 : réglementation thermique valable actuellement en France et fixant les exigences minimales à atteindre en terme de performance thermique de l'enveloppe du bâtiment et des composants extérieurs. Voir <http://www.rt-batiment.fr>

Le logiciel permet d'obtenir le profil de condensation de ce type de mur avec isolation thermique et acoustique, parement intérieur et revêtement extérieur associé :

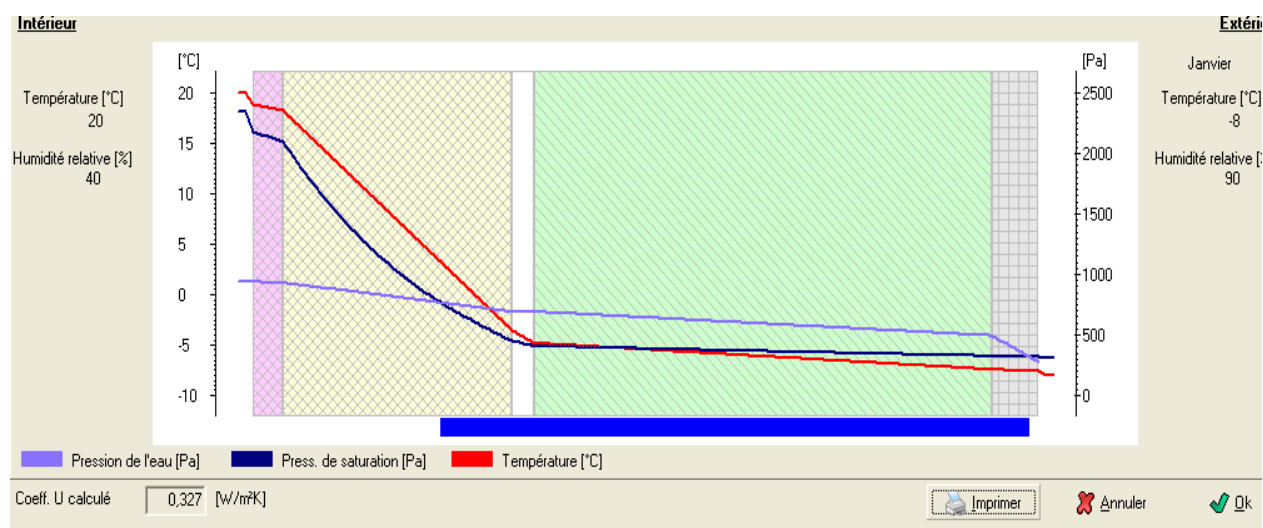


Figure 28 : Profil de condensation du mur parpaing creux maçonné ciment système « fini », sous LESOSAI 6.0.

Ce type de mur « fini », largement répandu dans les constructions suivant les premières réglementations thermiques en France (1975) isole ($U = 0,327 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) mais condense à deux reprises : la courbe bleu clair « pression de l'eau » croise la courbe bleu foncé « pression de saturation » avant la lame d'air entre l'isolation polystyrène expansé et le mur parpaing ciment, et au niveau de la fonction mur parpaing ciment / enduit CEM extérieur.

Cette simple constatation explique d'ailleurs à elle seule pourquoi les maisons traditionnelles en France sont considérées par les initiés comme des bocaux « tupperware » dans lesquels une extraction assistée de l'air vicié intérieur, chargé d'humidité, devient une condition nécessaire : la ventilation mécanique contrôlée.

L'isolation thermique rapportée par l'intérieur a certes eu un effet bénéfique en réduisant les consommations d'énergie par comparaison à un mur non isolé (facteur de 6,85 x) mais a contribué par la même occasion à dégrader fortement la qualité de l'air intérieur (effet bouteille thermo) tout en créant rapidement des sinistres liés à la condensation de vapeur d'eau (humidité accrue, développement de moisissures, points de rosée dans les murs..).

Pour caractériser de manière plus fine un mur porteur sans isolation rapportée complémentaire (A0-1), les critères techniques spécifiques suivants viennent compléter les critères communs présentés précédemment :

Systeme constructif	Critères techniques spécifiques	Définitions	Unités
A0-1 mur parpaing béton maçonné ciment	Densité ou masse volumique : ρ	Poids d'un matériau apparent rapporté au volume apparent	Kg/m ³
	Dilatation thermique α	Propriété d'un matériau à s'allonger sous l'effet d'un écart de température	m/m°C
	Température de fusion θ	Etat de passage d'un matériau à l'état solide à l'état liquide en fonction de sa température	°C
	Pouvoir calorifique ρ	Quantité d'énergie produite pendant la combustion d'un kilogramme de matériau donné,	Mj/kg
	Conductivité thermique : λ	Propriété d'un matériau à conduire la chaleur, en fonction de son épaisseur (1m) et pour un écart de température de 1°C.	W/m.°C
	Résistance thermique : R	Rapport de l'épaisseur d'un matériau divisée par sa conductivité thermique	m ² .°C/W
	Déperditions surfaciques :U	Pouvoir isolant de la paroi constituée par différents matériaux isolants, de différentes épaisseurs. $U = 1/R$	W/m ² .°C
	Capacité thermique : C	Propriété d'un matériau à accumuler de la chaleur puis à la restituer en fonction de son poids	Wh/m ³ .K ou J/°C
	Diffusivité thermique	La diffusivité caractérise la capacité de propagation d'un flux de masse ou de chaleur (diffusivité thermique) dans un matériau, en fonction de sa capacité thermique ou massique et de sa conductivité.	m ² /s ou m ² /h
	Résistance à la diffusion de vapeur μ d'eau	Nombre sans dimension également appelé coefficient de résistance à l'humidité, caractérisé par le rapport de la perméabilité (π) de l'air divisée par la perméabilité du matériau	Sd (= μd)
	Contrainte d'adhérence σ	Notion de résistance mécanique d'un matériau, résultant du rapport de la charge qui lui est appliquées divisés par sa surface d'application (ou section)	MPa
	Module d'élasticité longitudinal « module de Young » E	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	Pa, MPa ou Newton/mm ²
	Module de poisson : ν	Le coefficient de Poisson fait partie des constantes élastiques. Il permet de caractériser la contraction de la matière perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué. Il est compris entre -1 et 0,5. Les valeurs expérimentales obtenues dans le cas d'un matériau parfaitement isotrope sont très proches de la valeur théorique (1/4). Pour un matériau quelconque, on obtient en moyenne 0,3. Il existe également des matériaux à coefficient de Poisson négatif : on parle alors parfois de matériaux auxétiques.	Sd
	Contrainte tangentielle	Cf contrainte d'adhérence	MPa
	Contrainte de traction	Cf contrainte d'adhérence	Mpa
	Contrainte ou Classe de résistance « R » des blocs ciment creux (contrainte de compression)	La valeur R est déterminée par la valeur garantie de résistance à l'écrasement, résistance atteinte à la livraison ou au plus tard 28 jours après la fabrication	Mpa rapportée à la section brute du bloc (1 Mpa = 10 Kg/cm ²)
Indice d'affaiblissement acoustique Rw	R ou Rw exprimé en dB plus il est grand, plus le son est affaiblit, plus le son résiduel est minimisé, moins il est perceptible	dB	
Taux d'humidité τ	Taux d'humidité utile du matériau en œuvre : % en volume d'eau par volume de matériau	%	
Porosité totale Pt (%)	La porosité totale est égale à $((V_a - V_p) / V_a) \times 100$ ou V_a est le volume apparent, V_p le volume absolu	%	

Tableau 43 : Critères techniques¹ spécifiques du mur parpaing sans isolation (isolant thermique A2-1).

¹ Références : DTU 18-702 fév 1999 ; DTU P 18-702, fév. 2000 ; XP P 18-305, août 1996.

Cette caractérisation peut être considérée comme complète d'un point de vue technique : toutes les propriétés et caractéristiques des matériaux de construction correspondant au système constructif sont reprises.

3.3.3 Analyses critiques des familles de critères

Chacun des 40 autres systèmes constructifs présentés peuvent être décrits d'un point de vue technique de la même manière, avec une liste d'indicateurs communs et/ou avec une liste d'indicateurs spécifiques.

Mais certains critères sont trop précis et scientifiques pour intéresser et mobiliser les clients cibles de notre méthodologie d'analyse ; ces critères, par exemple les contraintes de traction (unité MPa) ou le module d'élasticité longitudinal (unité MPa ou newton / mm²), sont indispensables pour tester et caractériser un matériau base béton en laboratoire et valider des performances minimales par rapport à des références normatives ou de certification.

Une résistance mécanique à la compression à 28 ou 30 jours, une densité, une résistance thermique et une déperdition surfacique (respectivement kg/m³, m².°C/W et W/m².°C) correspondent à la limite normalement admissible de maîtrise des propriétés et caractéristiques d'un matériau de construction utilisé pour l'édification de murs porteurs extérieurs ; pourtant rares sont les acteurs de la construction hors prescripteurs (architectes, maîtres d'œuvre bureaux d'études spécialisés) à maîtriser ces critères alors même qu'ils sont sensés appliquer les préconisations minimales (valeurs « garde fou ») des réglementations en vigueur.

De nombreuses entreprises de bâtiment ne respectent donc tout simplement pas aujourd'hui une grande partie des réglementations applicables¹ par méconnaissance ou difficulté d'accès à l'information.

Nous utiliserons donc des critères techniques communs complétés par quelques critères plus précis « majeurs », en fonction de chaque système constructif étudié.

3.3.4 Simplification des familles de critères

Pour les raisons invoquées précédemment, tous les critères techniques spécifiques à chacun de ces systèmes ne seront pas détaillés, nous proposerons d'ailleurs de travailler ultérieurement avec ceux correspondant aux solutions éco-construites résultant des choix d'éco-matériaux régionaux, par comparaison aux solutions conventionnelles (voir chapitre 4).

La base de travail minimale reste les critères techniques communs présentés « *Proposition d'indicateurs communs à chaque unité fonctionnelle et système constructif présenté* », considérés comme indicateurs simplifiés.

D'autres critères simplifiés viennent compléter les champs techniques, économiques et financiers : les critères des familles de champs environnementaux et santé.

Pour rappel, il s'agit de cinq critères simplifiés permettant de qualifier un matériau ou composant de construction comme « éco » (écologique ou éco-conçu) : matières premières, énergie grise, recyclabilité, toxicité, lieu de fabrication.

¹ Ce constat est largement réalisé notamment lorsqu'on interroge les entreprises de construction, mais également les prescripteurs, sur leur connaissance et maîtrise des principaux documents faisant foi : les documentations techniques unifiés « DTU ».

3.4 Evaluation d'un échantillon de solutions constructives par familles de critères simplifiées

Nous proposons désormais de tester la méthodologie d'analyse développée sur un échantillon de solutions constructives conventionnelles et éco-construites, l'objectif final étant la traduction des résultats en indicateurs simplifiés permettant de juger facilement ou non de la décision d'investir ou non dans ces éco-technologies.

3.4.1 Hypothèses préliminaires

Dans le chapitre et les paragraphes précédents, des hypothèses préliminaires ont été posées et ont consisté à :

- proposer une définition consensuelle de ce que peut représenter un éco-matériau dans le secteur des produits et matériaux de construction, par rapport à une solution considérée comme traditionnelle ou conventionnelle (paragraphe 1.3.5 « *le consensus pragmatique* ») : « *les éco-matériaux et éco-produits sont des produits manufacturés destinés à être intégrés dans les ouvrages du bâtiment, compatibles avec les critères de développement « soutenable », éco-conçus et économiquement accessibles, tout en satisfaisant les critères de sécurité de fonctionnement après intégration dans lesdits ouvrages* »,
- établir une typologie croisée pour la classification en vue d'une comparaison, de matériaux conventionnels et d'éco-matériaux,
- privilégier l'utilisation de critères techniques, économiques et financiers facilement compréhensibles pour les utilisateurs finaux ciblés, complétés par quelques indicateurs environnementaux et de santé permettant de légitimer l'approche « éco-matériaux »,
- poser les bases du pendant des analyses en cycle de vie dans le monde économique et financier, l'analyse en coût global ou analyse en coûts complets en cycle de vie, avec ses hypothèses de travail incontournables : valeur actuelle nette, durée de vie typique, taux d'inflation et d'actualisation des valeurs monétaires,
- proposer un faisceau d'indicateurs financiers de management durable : surcoûts, coûts évités ou bénéfiques, temps de retour sur investissement et ratio coûts / bénéfiques actualisé,
- rajouter des critères sociétaux et de management durable qualifiés d'externalités souvent peu prises en compte dans les procédures de choix d'investissements, tel le nombre d'heures de travail générés par l'étape « amont » de la mise sur le marché du matériau / produit,
- définir une cible client privilégiée pour notre méthodologie, les professionnels de la construction, avec une expression des objectifs auxquels doit répondre notre comparaison : argumenter les propositions commerciales, intégrer les données économiques et financières, légitimer le recours à des éco-matériaux performants,
- associer des systèmes constructifs majeurs à des unités fonctionnelles définies en lien avec les principales déperditions thermiques d'un bâtiment (cf ADEME),
- et enfin proposer des indicateurs communs à chaque unité fonctionnelle et système constructif présenté dans les champs techniques, économiques et financiers,

Nous allons désormais définir 3 solutions construction de base, considérées comme conventionnelles, pour comparaison avec 3 solutions ayant la même aptitude à l'usage (même fonction) mais à caractère d'éco-construction.

Les critères environnementaux et de santé vont légitimer l'identification des solutions d'éco-construction ainsi que les retours de sondages effectués auprès de professionnels de la filière en euro-région au nord de Paris.

Les bases de prix utilisées pour la comparaison proviennent de multiples sources :

- **Base de données de prix pour les professionnels** de la construction « Batiprix¹ », éditée par le groupe « Le Moniteur » très connu pour ses outils dans le monde du bâtiment. La plupart des prix disponibles correspondent, sauf exception, aux prix de matériaux traditionnels.
- **Regroupement de catalogues de prix** en ligne disponibles sur les principaux sites internet de petits négoce² spécialisés en éco-matériaux en France
- **Enquêtes de prix – devis** réalisés auprès de **60 entreprises** du gros œuvre et du second œuvre, réalisant au minimum 20 % de leur chiffre d'affaires dans le secteur de l'éco-construction. Ces entreprises sont pour la plupart identifiées au sein du réseau régional des acteurs de l'éco-construction³ porté par le Cd2e, organisme dédié au développement de la filière éco-construction en région Nord Pas de Calais

3.4.2 Définition de solutions constructives de comparaison : 3 solutions conventionnelles et 3 solutions éco-construites

Les trois systèmes constructifs choisis pour représenter les solutions conventionnelles sont :

- **A0-1 / A2-1 et A3-3** : mur parpaing béton maçonné ciment avec doublage intérieur plaque de polystyrène parement plaque de plâtre, étanchéité extérieure enduit base ciment.
- **B1-2 / F1-2** : isolation thermique de toiture, isolation double couche sur solives et suspentes, avec écran pare vapeur scotché
- **C1-4** : fenêtre PVC standard

Les unités fonctionnelles associées à ces systèmes constructifs sont décrites comme suit pour le mur porteur à isolation rapportée intérieure :

A0 : mur porteur sans isolation complémentaire	Mur parpaing béton maçonné ciment
<i>Descriptifs</i>	Mur en agglomérés ciment creux, de 20 cm d'épaisseur (20x50 cm, 20 kg), hourdés au mortier bâtard 350 kg, y compris affleurement des lits en montant et harpages
A2 Isolation thermique rapportée sur mur	Doublage panneau de polystyrène expansé + plaque de plâtre
<i>Descriptifs</i>	Fourniture et mise en oeuvre de doublage de murs par collage de panneaux polystyrène expansé garnis d'une plaque de plâtre (10+100 mm), compris finition des joints entre plaques par bandes et enduit spécial. (Rt 2,70 m2.K/W).
A3 Bardage et vêtture	Enduit au mortier de ciment
<i>Descriptifs</i>	Enduit dressé au mortier de ciment de 20 mm d'épaisseur, sur parties verticales.

Pour l'isolation thermique de toiture entre chevrons :

¹ Batiprix 2007-2008 www.batiprix.com

² Négoce de petite et moyenne taille d'éco-matériaux en France www.la-maison-ecologique.com/distributeurs.php

³ Réseau régional des acteurs de l'éco-construction en nord pas de calais, www.cd2e.com/sections/fr/annuaire/reseau_regional_des

B1 Isolation thermique de toiture

Descriptifs

Isolation rouleaux de laine de verre sur solives
Isolation des combles par feutre en laine de verre revêtue kraft quadrillé, 1 face, ép. 160 mm, (Rt 4.00 m².K/W), déroulé sur solives (au m² en plan).

F1 : frein ou pare vapeur

Descriptifs

Ecran pare vapeur
Ecran pare vapeur à base de polyoléfine (FPO), ép 0,25 mm, pose en indépendance avec les jointoyés par bande adhésive, sur support béton, béton cellulaire, tôle acier, bois ou dérivé du bois

Enfin, pour une menuiserie extérieure :

C1 Ouverture de bâtiment

Descriptifs

Fenêtre PVC standard
Croisée standard ouvrante à la française 1 vantail ht 115 x 80 cm, en PVC blanc ép. 60 mm, vitrage isolant 4-16-4 faible émissivité. Ferrage paumelles, crémone à galets 3 points, poignée époxy. Fixations et pose sur fond de joint et joint d'étanchéité.

Par comparaison, les systèmes constructifs remplissant les mêmes fonctions, ayant un caractère lié ou proche des principes de l'éco-construction sont les suivants :

Définition UF	Unité fonctionnelle répondant à la définition	Systèmes constructifs	
		Construction conventionnelle	Eco-construction
Assurer la fonction de mur porteur (structure et clos) sur 1 m ² de paroi pendant une annuité, tout en assurant une isolation acoustique (Rw(C, Ctr) de 54 (-3, -5) dB) additive à celle d'un doublage) et une isolation thermique (résistance thermique de 0,21 m ² .K/W additive à celle d'un doublage).	A0 : mur porteur sans isolation complémentaire	Mur parpaing béton maçonné ciment	X ¹
Assurer la fonction de mur porteur (structure et clos) sur 1 m ² de paroi et une isolation thermique (résistance thermique globale minimale : 2,3 m ² *K/W ²) pendant une annuité	A1 Mur porteur à isolation répartie	X ³	Mur monomur terre cuite, béton cellulaire ou pierre ponce
Assurer la fonction d'isolation thermique rapportée, sur 1 m ² de parois, pendant une annuité, en assurant les performances prescrites du produit (résistance globale du mur : 2,3 m ² *K/W)	A2 Isolation thermique rapportée sur mur	Doublage panneau de polystyrène expansé + plaque de plâtre	Doublage isolant hygrophile bio-sourcé + plaque de fermacell
Assurer la fonction de protection de 1 m ² de parois verticale type « bardage » ou « enduit », pendant une annuité, en assurant les performances propres à l'enveloppe du bâtiment.	A3 Bardage et vêtture	Enduit au mortier de ciment	Enduit au mortier de chaux hydraulique, ou bardage bois pin des landes
Assurer une fonction d'isolation thermique sur un m ² de toiture, (résistance thermique globale de 4 m ² *K/W ⁹⁵) sous forme de panneau semi rigide ou rouleau, ignifugé d'épaisseur 100mm, mis en œuvre sous un	B1 Isolation thermique de toiture	Isolation double couche sur solives et suspentes	Doublage isolant hygrophile bio-sourcé avec suspentes

¹ Nous considérons volontairement qu'un mur porteur en contact avec l'extérieur, à très faible isolation thermique ou sans isolation thermique (rapportée ou répartie) ne peut représenter une solution dite d'éco-construction, les déperditions thermiques étant si élevées que le bilan énergétique et donc environnemental s'en trouve trop affecté.

² Cf RT 2005, disponible sur <http://www.rt-batiment.fr>

³ La famille des blocs dits monomurs à isolation répartie est considérée comme un système constructif relevant de l'éco-construction par les acteurs spécialisés de cette filière. Les constructions dites « HQE » en France s'en sont d'ailleurs largement inspiré au vu de la généralisation de l'usage des monomurs, par exemple terre cuite, dans les opérations de bailleurs sociaux privés.

revêtement d'étanchéité (pare pluie HPV), pendant une annuité et sur une durée de vie typique de 50 ans.

Assurer la fonction de 1 m² de frein vapeur, en assurant une étanchéité à la diffusion de vapeur d'eau variable (0,3 à 20 m) sur toiture chevrons classique, pendant une annuité

Assurer la fonction d'un m² de surface d'ouverture d'un bâtiment, par une fenêtre type ou porte fenêtre type, sur une durée de vie typique de 30 ans, avec les performances thermiques minimales $U_w < 2,6 \text{ w/m}^2 \cdot \text{k}$ et acoustiques $R_{a \text{ tr}} < 30 \text{ db}$ (conformité NRA)

F1 : frein ou pare vapeur

Pare vapeur étanche à la diffusion de vapeur (valeur $\mu = \infty$)

Frein vapeur régulateur de vapeur hygrovariable (valeur $\mu < 1 \text{ m}$ ou $> 10 \text{ m}$)

C1 Ouverture de bâtiment

Fenêtre PVC standard

Fenêtre bois certifié FSC, éco-conçue

Tableau 44 : Proposition de systèmes constructifs répondant aux principes de l'éco-construction, par comparaison aux systèmes conventionnels, pour les solutions constructives étudiées.

Nous cherchons désormais à légitimer le caractère environnemental des systèmes constructifs répondant aux principes de l'éco-construction.

Pour éviter toute ambiguïté relative au terme d'éco-construction, nous reprenons la simplification réalisée en dernière approche et proposée au paragraphe 2.2.4.2 : la construction de bâtiments à « qualité environnementale » résulte de la prise en compte de trois conditions :

- la conception bioclimatique
- le choix de matériaux et produits éco-conçus appropriés
- le choix de systèmes de production d'énergie renouvelable pour couvrir les besoins restants

Nous proposons ensuite de détailler chaque système constructif (conventionnel et relevant de l'éco-construction) sous l'angle des critères simplifiés, environnementaux, de santé et de développement soutenable retenus (chapitre 1, paragraphe 5-3-2), en vue d'une comparaison.

Les données présentées dans ce tableau sont issues de synthèses de chiffres, certes discutables, mais considérés par les professionnels de l'éco-conception comme relativement objectifs et représentatifs de moyennes acceptables.

Ils sont publiés par les sources suivantes et surtout disponibles gratuitement :

Il s'agit tout d'abord des Fiches de Déclaration Environnementales et Sanitaires (FDES) de la base de données française de référence sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits et matériaux de construction www.inies.fr,

Viennent ensuite les éco-devis proposés par la Conférence Suisse sur l'éco-construction : www.eco-bau.ch/franz/html/eco_devis.php3,

La société suisse des architectes et ingénieurs (SIA), publie également le tableau des caractéristiques des éléments de construction, disponible sur www.sia.ch/download/baustoffkennwerte-080710.xls,

Les recommandations de l'office fédéral suisse de la construction et de la logistique (OFCL-KBOB), données 2007 des éco-bilans pour les produits et matériaux de construction, sont disponibles sur <http://www.bbl.admin.ch/kbob/00493/00495/index.html?lang=fr>,

Les simulations réalisées avec le logiciel ECOBAT « Ecobalance Assessment Tool » sont également intéressantes, pour chaque système constructif étudié. Une version d'évaluation d'Ecobat est disponible sur www.eco-bat.ch .

La base de données « matériaux de construction » de l'outil « Méthode bilan carbone » de l'ADEME, peut être aussi valorisée ; elle est disponible après formation accréditation méthode bilan carbone de 3 jours.

Enfin, l'institut de Baubiologie de Rosenheim en Allemagne dispose de données intéressantes concernant les écobilans www.baubiologie.de/site/home.php

Systèmes constructifs	Critères environnementaux ¹			Critères de santé		Critères de « sustainable management »	
	Durée de vie typique	Matières premières constitutives	Energie grise ² en MJ ou Kwh / UF	Bilan carbone kg Eq CO ₂ / UF	Recyclabilité en fin de vie	Toxicité pour tout le cycle de vie	Localisation géographique
Mur parpaing béton maçonnerie ciment (mortier compris) – 100 ans	Ciment, sable, eau, granulats courants ou légers (ressources non renouvelables sauf eau)	174 MJ / m ² ou 48,37 kwh / m ²	16 kg / m ²	95 % des déchets sont des déchets inertes correspondant à l'élimination du produit en fin de vie ; possibilité de recyclage après traitement comme granulats secondaires (filière en cours de développement en France)	Valeur seuil respectées pour la radioactivité gamma et le radon, les émissions de COV et aldéhydes. Les micro-organismes ne s'y développent pas, les blocs sont non fibreux et sans particules susceptibles de contaminer l'air intérieur.	250 fabricants « locaux » répartis sur tout le territoire national ³	NC
Plaque de polystyrène expansé – 50 ans	Gaz naturel et pétrole (ressources non renouvelables)	170 MJ / m ² ou 47,26 kwh/m ²	6,55 kg / m ²	Polystyrène expansé 100 % recyclable, mais filières de récupération sur chantiers non opérationnelles pour permettre des retours vers les sites de production. Taux de recyclage effectif (2008) estimé à 10 %.	Emissions de COV dans l'air intérieur < 1000µg/m ³ (pas de seuil réglementaire existant), valeurs seuil respectées pour la radioactivité. Dans conditions normales d'utilisation, pas de développement de micro-organismes, nature non fibreuse du PSE le rend non concerné par l'émission de fibres dans l'air intérieur	18 usines de polystyrène expansé en France, réparties sur le territoire national, dont deux en Nord Pas de Calais	NC
Plaque de plâtre – 50 ans	Gypse naturel ou synthétique (sulfate de calcium). Le gypse n'est pas considéré comme ressource non renouvelable compte tenu de la taille des réserves disponibles dans le monde	51,5 MJ / m ² ou 14,317 kwh/m ²	2,725 kg / m ²	Les chutes de chantier de plaques Placoflam® BA13 peuvent faire l'objet d'un tri sélectif avec stockage en big-bags ou en bennes, fermées ou couvertes, en vue de leur expédition vers les ateliers de recyclage des sites de production. Les déchets de plaques Placoflam® BA13 sont stockés en centre d'enfouissement technique classe II	La coupe au cutter ne génère pas l'émission de poussières. Toute autre découpe génère des poussières pouvant être inhalées ou ingérées. L'émission de COV est inférieure à 1000µg/m ³ , la plaque de plâtre est généralement utilisée revêtue ce qui limite de ce fait les émissions. La radioactivité des plaques est insignifiante par rapport à la radioactivité naturelle.	3 groupes assurent 90 % de la production en France.	NC
Monomur terre cuite (100 ans)	Argile (98,91 %) et calcaire (0,04 %), polystyrène expansé	705 MJ / m ² soit 195,99 kwh / m ²	92,3 kg / m ²	Les déchets du monomur terre cuite, en fin de vie, constituent des déchets inertes valorisés	Les teneurs moyennes de différents COV sont largement inférieures aux valeurs de	Trois fabricants en France	NC

¹ Les indicateurs environnementaux sont calculés pour correspondre à l'unité fonctionnelle décrite, mais pour la durée de vie typique et non pas sur une année.

² 1 MJ = 0,278 kwh

³ Voir carte de fabricants « Blocalians » sur www.blocalians.fr/fr/connaitre-blocalians/blocalians-en-france/index.html

				en centre de stockage Classe 3, après démolition du bâtiment.	référence « très faibles émissions chimiques ». Aucune croissance de moisissures selon la norme NF EN 846 n'a pu être constatée. La teneur en radioéléments est proche des concentrations de l'écorce terrestre.		
Enduit au mortier de ciment (50 ans)	Sable, argile et calcaire	61,5 MJ / m ² soit 17,07 kwh/m ²	5,15 kg / m ²	Le mortier est un matériau inerte, dont la fin de vie dépend du matériau support : centres d'enfouissement de classe III (support inerte comme le bloc béton) ou classe II (support non inerte). Non recyclé en fin de vie.	Mortier généralement utilisé à l'extérieur, ne génère pas de poussières, non irritant. Si utilisé à l'intérieur, produit sans solvants, sans COV, non radioactif. Une fois durcit, n'est plus à l'origine d'émissions dans l'air.	NC	NC
Enduit au mortier de chaux (50 ans)	Sable, argile et calcaire	60,69 MJ / m ² soit 16,87 kwh/m ²	10,302 kg / m ²	Le mortier est un matériau inerte dont la fin de vie dépend du matériau support : centres d'enfouissement de classe II ou III.	Mortier généralement utilisé à l'extérieur, ne génère pas de poussières, non irritant. Si utilisé à l'intérieur, produit sans solvants, sans COV, non radioactif. Une fois durcit, n'est plus à l'origine d'émissions dans l'air. La chaux aérienne ou hydraulique peut être irritante : la mise en œuvre nécessite le port d'équipements de protection individuelle adéquats.	19 fabricants de chaux en France, répartis sur tout le territoire national.	NC
Bardage bois pin des landes (50 ans)	Bois	38 MJ / m ² soit 10,564 kwh / m ²	2,08 kg / m ²	Le bois est un matériau 100 % naturel, inerte, non toxique et recyclable. En fin de vie, la valorisation est possible en élément combustible si le bois n'est pas traité avec des produits toxiques, ou biodégradables.	Usage extérieur généralisé pour ce type de fonction	NC	
Isolant laine de verre (50 ans)	Bore, calcaire, carbonate de sodium, dolomie, sable, argile	94,7 MJ / m ² , soit 26,32 kwh / m ²	3,01 kg / m ²	La laine de verre est potentiellement recyclable à 100 % ; les rebuts de production sont valorisés sur site, en l'absence de filières de recyclage économiquement structurées, les laines de verre déconstruites sont mises en décharge en centre d'enfouissement technique de classe II.	Classement 3 des fibres minérales du niveau du CIRC « ne peut être classé quand à son effet cancérigène sur l'homme » ; l'exposition aux fibres minérales présentes dans l'air, notamment au niveau de la mise en œuvre, est inférieure aux seuils admissibles. Pour les émissions de COV dans l'air intérieur, l'absence de procédures normalisées ne permet pas de caractériser leur présence (valeur FDES 1,60 g/m ²). Pour les émissions	NC	NC

					radioactives, pas d'informations claires et détaillées sur le sujet.		
Isolant bio sourcé chanvre Florapan (50 ans)	Chanvre, coton, polyester	100 MJ / m ² soit 27,8 kwh / m ²	5,45 kg / m ² (le carbone stocké par le chanvre n'est pas comptabilisé dans la phase de production car le bilan sur la DVT est nul. Le carbone sera libéré en fin de vie par l'incinération ou la décomposition de l'isolant bio-sourcé	Pas ou peu de déchets générés en phase de mise en œuvre, les rebuts étant utilisés pour le calfeutrage. Pas de données sur le devenir en fin de vie.	Pas de données épidémiologiques sur les fibres de chanvre, ni de données sur leur taux de présence dans l'air. Pas d'informations claires et objectives sur le sujet. Traitement antifongique appliqué pour prévenir les risques de croissance fongique et bactérienne.	5 fabricants en France, non uniformément répartis géographiquement	NC
Plaque Fermacell	Gypse et fibres de cellulose recyclées	62,75 MJ / m ² soit 17,44 kwh / m ²	4,575 kg / m ²	Pas d'informations sur les déchets en fin de vie : à priori, gypse et fibres de cellulose peuvent être recyclées à 100 % ou servir de remblais inerte.	Les taux de radioactivité mesurés selon la formule de Leningrad, sont très inférieurs aux valeurs de référence de l'institut pour l'environnement de Munich. Pas de pollution mesurée par les substances PCB, DDT et plastifiants. Aucune pollution par COV n'est à relever. Le taux en poussières à gros grains ou fines est largement inférieur aux seuils autorisés. Pas d'émission d'isocyanates après la pose, la colle utilisée ne contient ni COV ni de solvant.	5 usines en Europe, aucune en France.	NC
Pare Vapeur bitumineux (90 ans)	Pétrole (bitume), gaz, calcaire, sable	192,6 MJ / m ² , soit 53,54 kwh / m ²	4,212 kg / m ²	Système étudié déclaré non dangereux, non inerte. En fin de vie, élimination par valorisation énergétique, recyclage ou stockage en centre technique classe II (% non précisé)	FDS des produits bitumineux d'étanchéité disponible sur le site www.etancheite.com ; l'impact des fumées émises lors de l'application par soudage sont connus et ont fait l'objet d'une étude INRS publiée par la CSRE en 2006. pas d'autres informations disponibles notamment sur les émissions de COV ou la radioactivité dégagée.	3 usines en France (Soprema, Henkel et Office des Asphaltes)	NC
Frein vapeur	Ethylène, propylène (pétrochimie)	345 MJ / m ² , soit 95,91 kwh / m ²	18,83 kg / m ²	Pas d'éléments identifiés pour la fin de vie	Pas d'éléments sur la toxicité en mise en œuvre ou en fdv	3 fabricants en Europe : Isover, Proclima, Ampack	

Fenêtre PVC standard (30 ans)	PVC (Sable, calcaire, sel -chlore), verre, acier	1443 MJ / m ² , soit 401,154 kwh / m ²	63,6 kg / m ²	Recyclage possible pour autant que les filières existent. Mise en place de PVC Recyclage par le syndicat des producteurs de profilés (SNEP) pour valoriser les déchets de produits en fin de vie. L'état mensuel de la collecte en France est disponible auprès du SNEP.	L'état de surface du PVC interdit le développement de moisissures à l'origine d'allergies. Un profilé a été testé comme inerte par le CSTB concernant son comportement face à une contamination fongique. Pour l'émission de COV dans l'air intérieur, les profils ne présentent pas de risques particuliers (classement C+ très faibles risques) d'après une étude menée au CSTB. Pourtant, dégagements mesurés en Allemagne de Phtalates et COV, gaz toxique en cas de combustion.	16 extrudeurs en France	20 ¹
Fenêtre bois certifié éco-conçue (30 ans)	Bois éco-certifié (pin sylvestre) origine France (22 % de la réserve de résineux français), ressource renouvelable (prélèvements < renouvellement annuel)	1192 MJ / m ² , soit 331,376 kwh / m ²	23,5 kg / m ²	NC	Pas de mesures de COV en vie en œuvre pour la fenêtre pin ; dans des conditions normales d'humidité et en respectant l'entretien, pas de risque d'attaque par des moisissures de surface. La radioactivité naturelle de la fenêtre n'a pas été mesurée. La mise en œuvre de la fenêtre ne nécessite aucune découpe du bois (seul un perçage) sans effet significatif sur la santé au niveau de la mise en œuvre.	Réseau de 20 fabricants en France (www.menuiseries21.com)	200 heures

Tableau 45 : Comparaison des matériaux / composants des systèmes constructifs étudiés, selon les critères « environnement, santé et management durable » simplifiés sélectionnés.

¹ Source : LIGNUM Fribourg, 2005. www.lignum.ch

Une comparaison peut être ensuite réalisée entre les différents matériaux associés au sein de systèmes constructifs représentatifs des unités fonctionnelles.

Pour chaque matériau / composant du système constructif de l'unité fonctionnelle nommée, nous présentons :

- l'unité fonctionnelle associée,
- le nom,
- la durée de vie typique admise, issue des fiches de déclarations environnementales et autres écobilans,
- le nombre de renouvellements sur la durée de vie typique¹ : la durée de vie typique d'un système constructif ne correspond pas forcément à la durée de vie typique des éléments / matériaux le constituant, d'autant que ces valeurs sont données pour des conditions théoriques normales de mise en œuvre qui ne sont que rarement rencontrées en pratique.

Exemple : la mise en œuvre d'un pare vapeur scotché mais percé (fente d'1 mm) qui a pour effet d'inhiber la performance de la laine minérale (isolation) associée ; celle-ci se tasse et accumule l'humidité jusqu'à tassement, noircissement et dégradation de ses performances thermiques. Elle nécessite alors un remplacement qui implique une déconstruction et une reconstruction des éléments du système constructif.



Figures 29 et 30 : Exemples de déconstruction / reconstruction avec remplacement des matériaux du système constructif sans respect des DTU & normes, [WIGNACOURT, 2008].

- l'énergie grise instantanée et totale sur la DVT, exprimée en kwh / m^2 (unité associée à l'unité fonctionnelle),
- le bilan carbone, en $\text{kg Eq C} / \text{m}^2$ associé à la dépense énergétique,
- la recyclabilité en fin de vie : Oui pour « recyclable », Non pour « non recyclable »,

¹ Données fournies à titre indicatif, selon une objectivité pouvant être qualifiée de bonne, basées sur le constat que plus de 60 % des entreprises du bâtiment ne connaissent pas les DTU et normes minimales d'application et, de ce fait, engendrent de fréquents désordres techniques se répercutant ensuite en sinistres à indemniser par les assurances décennales.

- l'impact sur la santé d'un point de vue toxicologique, avec un gradient par niveau de toxicologie : 0 pour « sans impact », 1 pour impacts minimums, 2 pour impacts moyens, 3 pour « impacts lourds »,
- l'aspect « ressources locales » et localisation géographique préférentielle : 0 pour ressource non disponible en Nord Pas de Calais, 1 pour ressource disponible en Nord Pas de Calais. Nous entendons par « disponible » l'implantation d'une usine de transformation – production sur le territoire régional,
- l'impact sociétal, traduit en heures de travail générées par la mise sur le marché du produit / matériau, avant son utilisation sur chantier.

Le tableau ci-après présente également quelques matériaux repris unitairement, non associés au sein d'un système constructif.

Le tableau suivant reprend le système constructif « **A0-1 / A2-1 et A3-3** » : mur parpaing béton maçonné ciment avec doublage intérieur plaque de polystyrène, parement plaque de plâtre, étanchéité extérieure enduit base ciment.

nom	DVT	rpts sur DVT	renouvelable	énergie grise kwh/m ²	énergie grise kwh/m ² sur DVT	énergie grise totale sur DVT	contenu carbone kg eq C/m ²	contenu carbone équivalent kg eq C/m ² sur DVT	contenu carbone équivalent total sur DVT	recyclabilité en fin de vie	toxicité : 0 absence - 1 faible - 2 moyenne - 3 forte	ressource locale (nord pas de calais) 0 - non, 1- Oui	impact sociétal	
comparaison de systèmes constructifs / unités fonctionnelles														
A0 & A2 & A3	plaque de plâtre	50	3	non en France (80 % gypse naturel)	14,317	42,951	57,268	2,725	8,175	10,9	oui, recyclage ou CET classe II	0	0 CORAMINE SAS (SAINT GOBAIN), Senlis, Oise	NC
	plaque polystyrène expansé	50	3	non, pétrole et matières plastiques liées	47,26	141,78	189,04	6,55	19,65	26,2	non (taux recyclage effectif < 10 %)	1	0, Saint Gobain Ecophon, Rantigny, Oise	NC
	parpaing béton	100	0	non, granulats et ciment gris	48,37	0	48,37	16	0	16	oui (déchets inertes), valorisation en tant que granulats secondaires	1	1 18 Nord Pas de Calais Picardie (Blocalians)	NC
	enduit mortier de ciment	50	4	non, sable et ciment gris	17,07	68,28	85,35	5,15	20,6	25,75	Non, CET classe II ou III	1	1 Usine de ciment de Dannes (62)	NC
TOTAL					127,017	253,011	380,028	30,425	48,425	78,85		3		

Tableau 46 : Synthèse de l'analyse environnement, santé et management durable du système constructif « mur parpaing maçonné ciment »

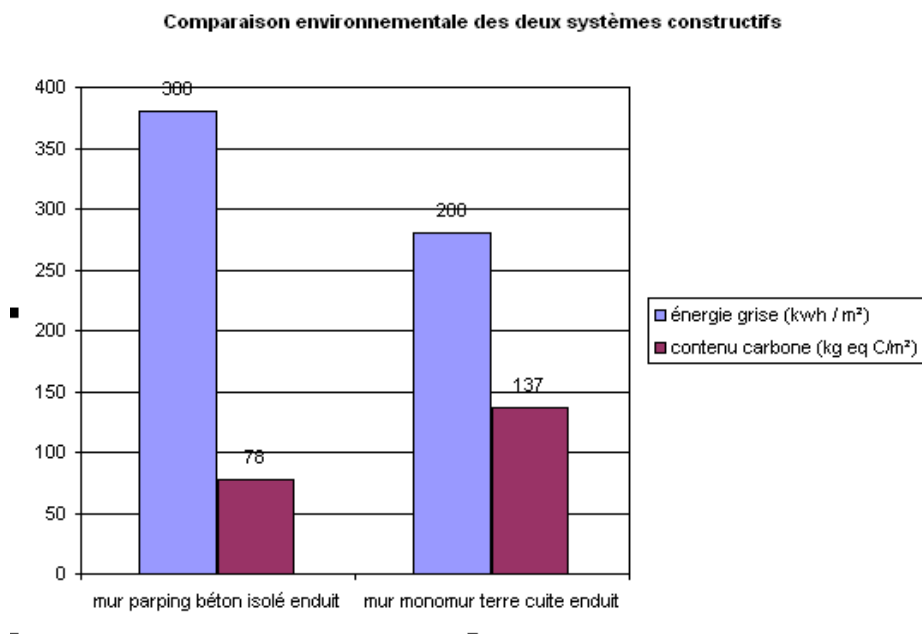
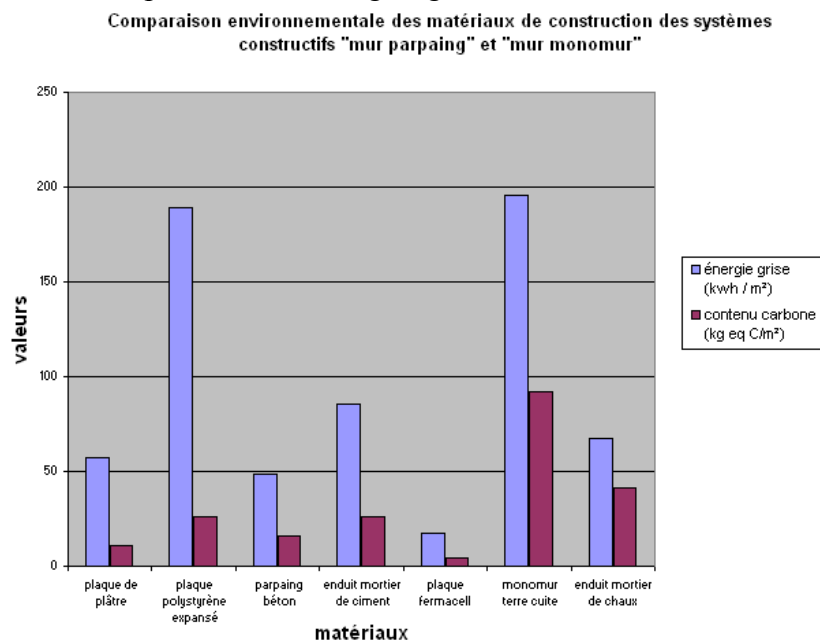
Le système constructif éco-construit équivalent, présumé performant dans le champ environnemental et santé, est représenté par une paroi composée de blocs monomurs terre cuite, avec enduit de finition à la chaux hydraulique et parement plaque de gypse – cellulose renforcée (Fermacell) - connue pour ses très bonnes performances acoustiques et son innocuité en vie en œuvre.

Le tableau suivant présente le système constructif A1-1 et A3-4 :

nom	DVT	rpts sur DVT	renouvelable	énergie grise kwh/m ²	énergie grise kwh/m ² sur DVT	énergie grise totale sur DVT	contenu carbone kg eq C/m ²	contenu carbone équivalent kg eq C/m ² sur DVT	contenu carbone équivalent total sur DVT	recyclabilité en fin de vie	toxicité : 0 absence - 1 faible - 2 moyenne - 3 forte	ressource locale (nord pas de calais) 0 - non, 1- Oui	impact sociétal	
comparaison de systèmes constructifs / unités fonctionnelles														
A1 & A3	plaque fermacell	NC	0	oui, plâtre et fibres de papier issues du recyclage	17,44	0	17,44	4,475	0	4,475	oui, recyclage ou CET classe II	0	0	NC
	monomur terre cuite	100	0	non, argile et polystyrène expansé (3 pour 1000)	195,99	0	195,99	92,3	0	92,3	non, CET classe III	1	1 Wienerberger, Hulluch	NC
	enduit mortier de chaux	50	3	non, chaux hydraulique ou aérienne	16,87	50,61	67,48	10,302	30,906	41,208	non, CET classe II ou III	1	NC	NC
TOTAL					230,3	50,61	280,91	107,077	30,906	137,983		2		

Tableau 47 : Synthèse de l'analyse environnement, santé et management durable du système constructif « mur monomur terre cuite ».

La comparaison des énergies grises et du contenu carbone des matériaux des deux systèmes constructifs peut être réalisée ainsi :



Figures 31 et 32 : Comparaisons environnementales simplifiées (énergie grise – bilan carbone) mur parpaing vs mur monomur terre cuite..

Le tableau suivant reprend le système constructif « B1-2 / F1-2 & A2 » : isolation thermique sous rampants de toiture, double couche, pare vapeur, parement gypse classique :

	nom	DVT	rpts sur DVT	renouvelable	énergie grise kwh/m ²	énergie grise kwh/m ² sur DVT	énergie grise totale sur DVT	contenu carbone kg eq C/m ²	contenu carbone équivalent kg eq C/m ² sur DVT	contenu carbone équivalent total sur DVT	recyclabilité en fin de vie	toxicité : 0 absence - 1 faible - 2 moyenne - 3 forte	ressource locale (nord pas de calais) 0 - non, 1- Oui	impact sociétal
B1 & F1	isolant laine de verre	50	3	non, silice extrudée (sable) parfois verre recyclé et de sable	26,32	78,96	105,28	3,01	9,03	12,04	non, CET classe II en l'absence de filières de recyclage en France	2	0	NC
	pare vapeur bitumineux	90	3	non, pétrochimie	53,54	160,62	214,16	4,212	12,636	16,848	non, valorisation possible mais stockage en CET classe II privilégié	2	0	NC
	plaque de plâtre	50	3	non en France (80 % gypse naturel)	14,217	42,651	56,868	2,725	8,175	10,9	oui, recyclage ou CET classe II	1	0 CORAMINE SAS (SAINT GOBAIN), Senlis, Oise	NC
TOTAL					94,077	282,231	376,308	9,947	29,841	39,788		5		

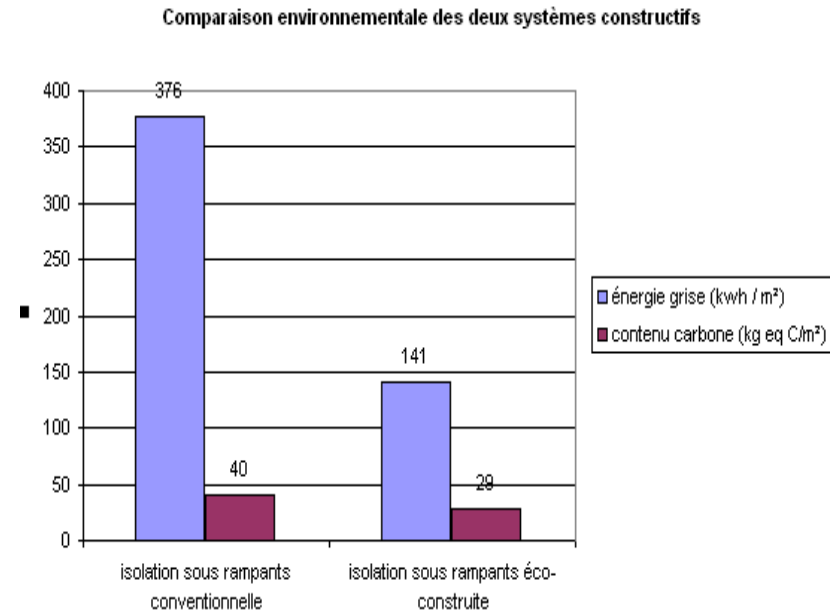
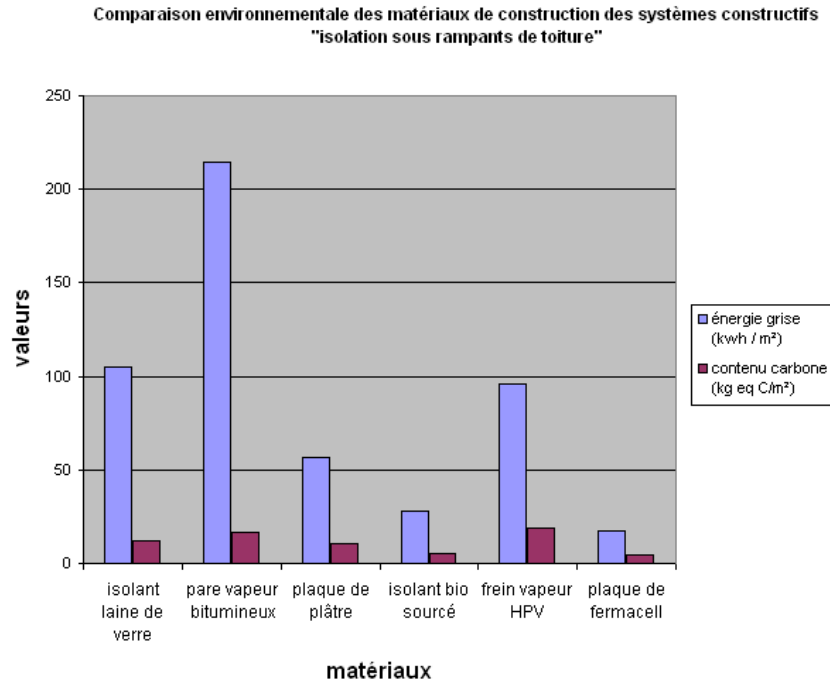
Tableau 48 : Synthèse de l'analyse environnement, santé et management durable du système constructif « isolation thermique sous rampants de toiture, laine de verre, pare vapeur et parement gypse ».

Le système constructif éco-construit équivalent, présumé performant dans le champ environnemental et santé, est représenté par une paroi de sous toiture composée d'isolant bio-sourcé, avec frein vapeur hygro-variable et parement en plaques de fibre de cellulose renforcée.

	nom	DVT	rpts sur DVT	renouvelable	énergie grise kwh/m ²	énergie grise kwh/m ² sur DVT	énergie grise totale sur DVT	contenu carbone kg eq C/m ²	contenu carbone équivalent kg eq C/m ² sur DVT	contenu carbone équivalent total sur DVT	recyclabilité en fin de vie	toxicité : 0 absence - 1 faible - 2 moyenne - 3 forte	ressource locale (nord pas de calais) 0 - non, 1- Oui	impact sociétal
B1 & F1	isolant bio sourcé	50	0	oui, sauf polyester (12 à 20 %) texturant	27,8	0	27,8	5,45	0	5,45	oui, en théorie mais pas de données disponibles	0	1 Metisse & AVR Isolation	NC
	frein vapeur HPV	NC	0	non, pétrochimie	95,91	0	95,91	18,83	0	18,83	Oui, polyéthylène recyclable à 100 % si les filières existent	1	0	NC
	plaque de fermacell	NC	0	oui, plâtre et fibres de papier issues du recyclage	17,44	0	17,44	4,475	0	4,475	oui, recyclage ou CET classe II	0	0	NC
TOTAL					141,15	0	141,15	28,755	0	28,755		1		

Tableau 49 : Synthèse de l'analyse environnement, santé et management durable du système constructif « isolation thermique sous rampants de toiture, isolant bio-sourcé, frein vapeur et Fermacell ».

La comparaison des énergies grises et du contenu carbone des matériaux des deux systèmes constructifs peut être réalisée :



Figures 33 et 34 : Comparaisons environnementales simplifiées (énergie grise – bilan carbone) isolation sous rampants conventionnelle vs isolation sous rampants éco-construite.

Le dernier système constructif étudié est plus simple : « C1 » : ouverture de bâtiment, fenêtre PVC standard.

Le système constructif éco-construit équivalent, présumé performant dans le champ environnemental et santé, est représenté par une menuiserie en pin français contrecollé, bois certifié comme issue d'une forêt gérée durablement (certification PEFC), par des fabricants impliqués dans la thématique d'éco-conception (www.menuiseries21.com).

	nom	DVT	rpts sur DVT	renouvelable	énergie grise kwh/m ²	énergie grise kwh/m ² sur DVT	énergie grise totale sur DVT	contenu carbone kg eq C/m ²	contenu carbone équivalent kg eq C/m ² sur DVT	contenu carbone équivalent total sur DVT	recyclabilité en fin de vie	toxicité : 0 absence - 1 faible - 2 moyenne - 3 forte	ressource locale (nord pas de calais) 0 - non, 1- Oui	impact sociétal
C1	fenêtre PVC	30	2	non, pétrochimie	401,154	802,308	1203,46	63,6	127,2	190,8	Oui, si filière de recyclage existante. Filière en cours de structuration par le SNEP en France	2	1 Nombreux fabricants en région	20
TOTAL					401,154	802,308	1203,46	63,6	127,2	190,8				
C1	fenêtre bois eco_certifiée	30	0	oui, matière principale renouvelable si taux d'exploitation < taux de renouvellement annuel	331,376	0	331,376	23,5	0	23,5	Oui, mais pas de données disponibles. Utilisation dans l'industrie des panneaux de bois.	1	1 Menuiserie du haut pays et Ets Bouillon	200
TOTAL					331,376	0	331,376	23,5	0	23,5				

Tableau 50 : Synthèse de l'analyse environnement, santé et management durable des systèmes constructifs « Ouverture de bâtiment : fenêtre PVC standard / fenêtre bois eco-certifiée.

La comparaison des énergies grises et du contenu carbone des matériaux des deux systèmes constructifs peut être réalisée :
Comparaison environnementale des deux systèmes constructifs

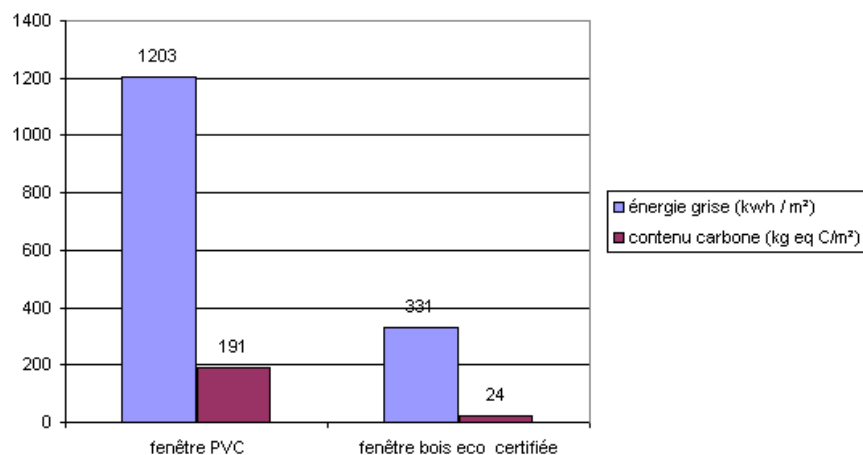


Figure 35 : Comparaisons environnementales simplifiées (énergie grise – bilan carbone) des systèmes fenêtre PVC / fenêtre bois éco-certifiée.

Enfin, nous pouvons reprendre les données environnementales de chaque matériau / composant, pris unitairement, non associé au sein de systèmes constructifs :

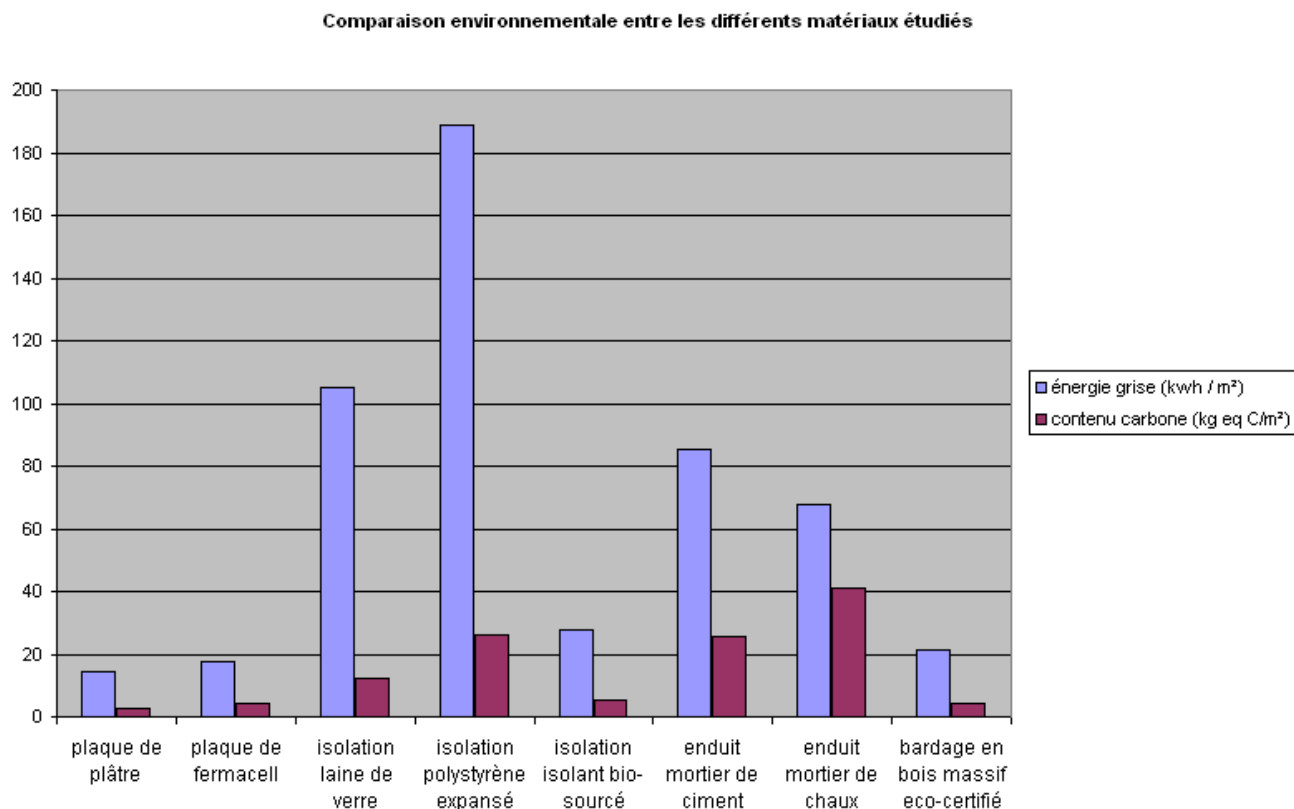


Figure 36 : Comparaisons environnementales simplifiées (énergie grise – bilan carbone) des matériaux conventionnels et d'éco-construction, pris unitairement.

Il est possible d'analyser l'importance relative des critères entre eux et surtout de voir comment procéder, sur la base de critères simplifiés (environnementaux, de santé et de développement soutenable), à une qualification de matériaux et produits pouvant relever de l'éco-construction :

- **Le type de matière première utilisée :** matière première renouvelable ou non, primaire ou secondaire.

Ce critère permet de prendre en compte l'aspect « renouvelabilité » des ressources utilisées pour fabriquer le produit de construction. Une ressource est dite renouvelable selon la définition proposée par l'OCDE si son taux d'utilisation est inférieur ou égal à son taux de renouvellement.

Ce taux de renouvellement doit être compatible avec la durée de vie moyenne humaine (100 ans), voir inférieur. Les matières cellulosiques (paille, agro-ressources...) sont renouvelables par excellence, avec un taux d'utilisation inférieur ou égal au taux de renouvellement annuel ; le bois est, quant à lui, renouvelable sur des périodes plus longues (15 à 30 ans pour des résineux européens) mais toujours compatibles avec des périodes de renouvellement correspondant au maximum à une durée de vie humaine (3 renouvellements sur 100 ans).

Une matière considérée comme renouvelable par rapport à la durée de vie humaine peut néanmoins présenter un problème d'adéquation entre prélèvement et renouvellement : c'est le cas des bois anciens exotiques (Moabi d'Afrique, Mérandi, Tec de Birmanie...) qui,

bien que certifiés « gestion durable de la ressource » (labels FSC, PEFC ou TFT), présentent des durées de renouvellement incompatibles avec le rythme actuel de consommation : 60 à 80 ans pour un Moabi exploitable, 60 ans pour un Mérandi.

La définition de l'OCDE présente une limite : une ressource théoriquement non renouvelable, disponible en très grandes quantités peut être considérée comme renouvelable par comparaison au rythme d'exploitation actuel et par rapport à la durée de vie typique humaine (100 ans).

Un exemple : l'argile naturelle, qui est issue d'une accumulation de sédiments marins. Elle est disponible selon les régions en très grandes quantités ; on l'utilise depuis des siècles pour la fabrication de céramiques: briques de terre crue, cuite ou de tuiles. Son usage est considéré comme traditionnel et normé en France et en Europe pour les produits semi finis ou finis qui la valorisent ; pour autant il s'agit d'une ressource non renouvelable par comparaison avec la DVT humaine; à 1 million d'années peut être (idem pour le pétrole issu de l'accumulation et de la dégradation de matière organique) si on maintient les conditions de sa renouvelabilité.

Une matière première primaire est une matière qui fait l'objet d'une première utilisation / transformation. Une matière première secondaire est une matière déjà utilisée, faisant l'objet d'un recyclage total ou partiel, en vue d'une ou plusieurs autres utilisations. Une matière secondaire potentiellement recyclable entièrement ou partiellement, et ce à de nombreuses reprises, peut être caractérisée comme une matière première renouvelable. Quelques exemples : le PVC ou les textiles recyclés représentent des matières premières secondaires renouvelables.

Comparaison mur parpaing béton / monomur terre cuite :

Dans le système constructif « parpaing béton » (tableau 41), la plaque de plâtre et le parpaing béton sont fabriqués à partir de ressources premières primaires non renouvelables (gypse naturel issu de carrières en France et granulats / ciment).

La plaque de plâtre classique peut tout de même être considérée comme un produit valorisant des matières premières secondaires renouvelables, une filière de recyclage des plaques existant en France (lien avec la colonne « filière de recyclage » disponible).

Quant au parpaing béton, même s'il peut bénéficier d'une filière de recyclage en fin de vie (valorisation en tant que granulats secondaires), il ne peut pas être considéré comme un produit valorisant des ressources secondaires.

Le polystyrène expansé n'est pas renouvelable (pétrole, taux de recyclage inférieur à 10 %), l'enduit base ciment non plus.

Pour le système constructif monomur terre cuite, le fermacell fabriqué à partir de gypse recyclé et de cellulose recyclée, valorise des matières premières renouvelables. En fin de vie, compte tenu des filières de recyclage existant en France, il peut faire l'objet d'un recyclage.

Le monomur terre cuite valorise lui des matières premières renouvelables au sens de la définition OCDE, mais n'est pas recyclable en fin de vie (stockage / enfouissement en CET classe II). Enfin, l'enduit mortier de chaux est fabriqué à partir de matière renouvelable (calcaire, argile) mais n'est pas recyclable en fin de vie (enfouissement CET classe II ou III).

Comparaison complexe d'isolation sous toiture :

Pour le système constructif « complexe d'isolation sous toiture », la laine de verre est fabriquée partiellement à partir de ressources premières (parfois verre recyclé et sable) renouvelables et n'est pas recyclable en fin de vie (absence de filières de recyclage, stockage ou enfouissement en CET classe II).

Le pare vapeur bitumineux n'est pas fabriqué à partir de ressources renouvelables (pétrole) et n'est pas recyclable en fin de vie.

La plaque de plâtre, bien que fabriquée à partir de ressources primaires non renouvelables, peut être considérée comme un produit valorisant des matières premières secondaires renouvelables.

Le même système constructif « complexe d'isolation sous toiture » valorise un isolant bio-sourcé et une plaque de gypse / cellulose et un frein vapeur hautement perméable à la diffusion de vapeur (HPV) présente une utilisation de matières premières renouvelables plus importante : cellulose agro-ressources pour l'isolant bio-sourcé, recyclable à 100 % en fin de vie (biodégradable ou recyclable), polyéthylène non renouvelable en tant que matière première primaire issue de la pétrochimie mais recyclable à 100 % en boucle continue en fin de vie – il s'agit donc de matière première secondaire renouvelable-.

La plaque de gypse cellulose renforcée est fabriquée à partir de gypse et de cellulose recyclés et valorise donc les matières premières secondaires renouvelables.

Comparaison menuiserie PVC / menuiserie éco-certifiée :

Pour les menuiseries, le PVC est fabriqué à partir de matières premières primaires non renouvelables (pétrochimie, industrie du verre), mais la filière de recyclage du PVC se structure en France. On peut considérer que le PVC utilisé en menuiseries sera, dans les années à venir, au minimum recyclé à 50 % (sources : SNEP) ; une part non négligeable des fenêtres PVC devrait être fabriquée à partir de matières premières secondaires renouvelables.

Quant à la menuiserie bois, elle valorise des ressources premières primaires renouvelables (bois) pour peu que le bois soit replanté et que le taux de renouvellement de l'essence soit compatible avec une exploitation raisonnable et la DVT humaine.

Le verre est lui automatiquement recyclé en France. Les éléments de menuiserie « bois » ne sont par contre pas recyclés en fin de vie en tant que matière première secondaire renouvelable. Ils finissent dans l'industrie des panneaux de bois compressés.

- **le contenu énergétique caché ou énergie grise** : il existe des différences parfois importantes, entre l'énergie grise d'un matériau X et celle d'un matériau Y, pour une même fonction :

Comparaison mur parpaing béton / monomur terre cuite : si on se limite exclusivement au système constructif et à la définition de l'unité fonctionnelle associée (A0 & A2 pour le mur parpaing, A1 pour le monomur terre cuite), le mur parpaing béton + isolant nécessite 237,41 kwh / m² sur son cycle de vie (compris 3 remplacements de l'isolant sur 50 ans), le monomur terre cuite demande, quant à lui, 180 kwh / m², soit 25 % de moins.

Pour le bilan carbone lié au flux énergétique, 42,2 kg eq C / m² pour le parpaing / isolant et 92,3 kg eq C / m² pour le monomur terre cuite, soit plus de 50 % de moins pour le système parpaing / isolant.

Comparaison complexe d'isolation sous toiture : le système est représenté par un isolant thermique épais, une membrane d'étanchéité à l'air qui interdit ou régule (en fonction des types) la migration de vapeur d'eau. Le système conventionnel laine minérale / pare vapeur / parement gypse, nécessite 376 kwh / m² sur sa durée de vie (y compris 3 remplacements sur durée de vie), le système présumé éco-construit représenté par un isolant bio-sourcé (chanvre, lin, fibre de bois...), un frein vapeur hautement perméable à la vapeur et un parement gypse renforcé de cellulose (type Fermacell) demande 141,15 kwh / m², soit 2,5 fois moins.

Pour le contenu carbone, 39,8 kg eq C/m² pour le système conventionnel, contre 28,75 kg eq C/m², soit 38 % de plus.

Comparaison menuiserie PVC / menuiserie éco-certifiée : le système est représenté par une fermeture type menuiserie extérieure (fenêtre). Le système conventionnel PVC nécessite 1203,46 kwh / m², le système éco-construit en bois certifié demande 331,376 kwh / m², soit 3,6 fois moins d'énergie. Pour le contenu carbone, les émissions représentent 190,8 kg eq C / m² pour le PVC et 23,5 kg pour le bois, soit 8 fois moins.

La question essentielle, derrière ces appréciations, est de savoir à partir de quel niveau de dépense énergétique, et donc de manière liée, de quelle quantité d'émissions de gaz « équivalent carbone » on peut ou ne peut pas qualifier un matériau / produit d'éco-matériau, au sens de la définition consensuelle proposée.

Il n'existe aucun référentiel officiel, y compris dans les cahiers des charges des éco-labels français et européens, faisant état d'une limite au-delà de laquelle un produit n'est plus considéré comme « éco ».

Dans l'absolu, tous les produits manufacturés mis sur le marché nécessitent de l'énergie pour être fabriqués et donc rejettent des émissions de GES, notamment en phase process.

Le meilleur choix ou la pratique considérée comme bonne peut être de choisir systématiquement, quand les données sont accessibles et compréhensibles, le produit le mieux disant, sur des critères que l'on estime être représentatifs de sa démarche (exemple choix de privilégier les matériaux à faible énergie grise pour la réhabilitation de bâtiments ERP par une collectivité publique).

Le mur parpaing béton peut ainsi être privilégié par rapport au fameux bloc monomur terre cuite pourtant considéré comme une solution d'éco-construction, l'isolant bio-sourcé associé à un HPV et un fermacell se positionne en premier choix presque automatiquement.

Enfin, la menuiserie PVC reste très énergivore et impactante sur le réchauffement climatique en émettant une large quantité de GES. La fenêtre bois, bien entretenue, est à privilégier pour le lot « fermetures extérieures ».

Pour autant quelle importance faut-il accorder, même dans l'optique d'un choix sélectif et d'une analyse simplifiée, au contenu énergétique ? En raisonnant en dépense énergétique instantanée, sans prise en compte du renouvellement sur la durée de vie du système constructif (isolant minéral pour le système mur parpaing béton), le monomur terre cuite nécessite beaucoup plus d'énergie pour sa fabrication que l'équivalent bloc parpaing / isolant : 196 kwh/m² contre 95,63 kwh/m², soit presque deux fois moins d'énergie !

Pour l'Office Fédéral Suisse de la Construction et de la logistique (OFCL-KBOB), qui gère notamment une conférence permanente sur l'éco-construction, l'énergie grise des

matériaux et composants est une vraie problématique qui mérite largement d'être prise en compte dans les procédures de choix / prescription de matériaux :

« L'énergie grise est une valeur permettant d'évaluer simplement les atteintes à l'environnement durant la production d'un matériau, de l'extraction des matières premières jusqu'aux derniers traitements. Elle permet d'évaluer globalement toutes les atteintes à l'environnement liées à l'utilisation d'énergie, notamment l'influence des GES et des principaux polluants de l'air. Pour les éco-inventaires de matériaux, les données énergétiques, contrairement aux indications sur les émissions, sont nombreuses, fiables et faciles à vérifier et à harmoniser d'un point de vue représentativité et limites du système » [Association de soutien Eco-devis, 2000]⁹⁴.

L'OFCL fixe la limite de différents seuils d'énergie grise acceptable en fonction des catégories de produits et matériaux :

- **400 MJ/m²** pour les isolants thermiques (écologiquement intéressant si inférieur ou égal à 400 MJ/m²)
- **250 MJ/m²** (écologiquement relativement intéressant) ou **100 MJ/m²** (écologiquement intéressant) pour les bardages bois, minéraux, synthétiques ou métal.
- **100 MJ/m²** (écologiquement relativement intéressant) ou **50 MJ/m²** (écologiquement intéressant) pour les accessoires et ossatures des bardages.

Ces valeurs sont directement issues de données collectées moyennes auprès des entreprises fabricants ; à retenir ces notions « d'écologiquement intéressant » ou « écologiquement relativement intéressant » qui permettent de fixer un curseur et d'établir qu'au-delà cette limite, le matériau, produit ou système constructif n'est pas considéré comme « écologiquement intéressant ».

L'énergie grise peut faire également l'objet d'un faux débat, notamment de la part des industriels manufacturiers de produits et matériaux de construction. Dans les Fiches de Déclaration Environnementales et Sanitaires (FDES) utilisées précédemment pour comparer les données environnementales des différents systèmes constructifs retenus, pour les matériaux d'isolation thermique présentant des caractéristiques thermiques intéressantes de part leur nature et leur fonction (un coefficient de conductivité thermique λ faible $< 0,05$ W/m².k, une résistance thermique R minimale de 2 à 2,5 m².k/W qui dépend elle-même de l'épaisseur de l'isolant considérée), la dépense énergétique nécessaire pour fabriquer le matériau isolant est rendue négligeable par comparaison aux économies d'énergie « chauffage » ou « ventilation » engendrées par la fonction de l'isolant (isoler) au sein du système constructif dans lequel il est utilisé, et ce sur la durée de vie typique du même système constructif.

Il s'agit de la méthode de « l'évitement d'énergie » : le calcul d'évitement d'énergie a pour objectif la mise en évidence de la fonction principale du produit : l'isolation thermique. Un isolant permet d'économiser de l'énergie dans le cas où l'ouvrage est chauffé, pour atteindre une température de confort. Cet évitement dépend de plusieurs facteurs, comme le type d'isolation, le lieu d'implantation du bâtiment (zones climatiques de la RT...), la situation initiale de l'ouvrage ou sa forme.

Lorsque le bâtiment n'est pas chauffé, il ne peut y avoir d'économie d'énergie.

Une référence représentant la situation initiale doit être introduite : ce peut être par exemple un bâtiment non isolé, soit un bâtiment isolé de manière minimale, par exemple conforme à la Réglementation Thermique existante RT2000 ou RT 2005. En général, la plupart des fabricants déclarant une FDES prennent en considération l'état initial non isolé, le plus représentatif de la maximisation d'économies d'énergie apportées par l'ajout d'un système isolant (schéma le plus simple et le moins contraignant).

Le calcul d'évitement d'énergie est basé sur une appréciation simple de la thermique du bâtiment : un coefficient R d'un isolant, pris en compte au sein d'un système constructif telle une paroi opaque avec la valeur U ($U=1/R$, U max et U ref repris dans les réglementations thermiques) permet d'économiser une quantité X de Kwh/m².an.

Ramené au type d'énergie utilisée dans un bâtiment et à son coût au kwh unitaire, un ajout d'isolation sur un bâtiment non isolé ou une réfection d'isolation sur un bâtiment mal isolé peut s'apprécier en kwh économisés par an, avec une corrélation en terme de coût ramenée en €/m².

L'investissement « isolant » peut ainsi être légitimé par un temps de retour sur investissement simple, le plus souvent intéressant si inférieur à 10 ans (moyenne d'appréciation de l'utilité d'un investissement).

Un exemple de calcul d'énergie évitée par l'utilisation de différents systèmes connus pour apporter des performances en terme d'isolation thermique est disponible auprès d'un bureau d'étude thermique spécialisé en énergie : les calculs sont effectués sur la base d'une construction type « maison individuelle à usage d'habitation », en zone climatique H1, pendant 1 an [TRIBU, 2007]⁹⁵. Les calculs ont été réalisés en fonction des types de systèmes isolants et d'énergie utilisée pour le chauffage :

	Surface (m ²)	Caractéristique thermique	Evitement d'électricité (kWh elec)	Evitement de gaz naturel (kWh PCI)
Toiture isolée	100	R = 5	2 995	3 161
Murs isolés	85	R = 2	2 278	2 402
Double vitrage	15	U = 2,9	571	601
Sol ss face	100	R = 1,94	1 968	2 075
Sol dalle flottante	100	R = 1,05	1 874	1 976

Tableau 51 : Quantification de l'énergie évitée par l'utilisation de systèmes isolants, sur maison individuelle type, en climat H1, par an et en fonction du type d'énergie utilisée pour le chauffage. [TRIBU Energie].

L'évitement d'énergie est calculé à partir :

- du type d'isolation,
- de la résistance thermique équivalente,
- de la superficie de l'isolation.

Dans le cas d'un isolant classique type laine minérale qui représente 80 % des cas d'isolation de bâtiments neufs et existants en France, les chiffres suivants sont donnés par la FDES :

- consommation d'énergie primaire (total cycle de vie de l'isolant) : 97,7 MJ/m², ramenés à l'unité fonctionnelle, durée de vie typique : 50 ans, soit pour ramener les MJ à des kwh/m² : 26,32 kwh /m²
- sur la DVT du système isolant, soit 50 ans, 12 393 MJ/m² sont économisés dû à l'évitement soit 3445 kwh/m² [ISOVER, 2006]⁹⁶
- ramenée à une année, le contenu énergétique du système isolant est de 0,5264 kwh/m²/an (26,32 / 50)
- ramenés à une année, les Kwh économisés dus au calcul d'évitement sont : 69 kwh/m²/an (3445 / 50)
- l'énergie évitée grâce aux performances du système isolant représente donc 131 x l'énergie utilisée pour fabriquer le système isolant : 69/0,5264 = 131.

Ce calcul met bien en évidence le rapport contenu énergétique / énergie économisée : 0,76 %, ce qui peut être considéré comme négligeable.

Qualifier un système d'isolation thermique sous l'approche environnementale de l'énergie grise pour légitimer un caractère d'éco-construction est, suivant ce raisonnement, non approprié car peu significatif (0,76 %).

Prenons le cas d'un isolant bio sourcé considéré comme plus compatible à priori avec les critères d'éligibilité « éco-matériau » : son contenu énergétique initial est plus élevé que celui du système isolant de comparaison (isolant minéral) : 27,8 kwh/m² contre 26,32 kwh/m² [. Il affiche des performances thermiques (conductivité, épaisseur) équivalentes à celles de la laine de verre. L'évitement d'énergie est donc identique sur la DVT.

Ramenée à la DVT et avec la prise en considération d'un taux de renouvellement¹ de l'isolant minéral plus important que celui de l'isolant bio-sourcé (3 remplacements sur la DVT pour l'isolant minéral, 0 pour l'isolant bio-sourcé), la comparaison devient plus favorable pour l'isolant bio-sourcé : 105,28 kwh/m² contre 27,8 kwh/m². Ces valeurs sont des dépenses d'énergie initiales mais ramenées également à la DVT qui est de 50 ans.

Ramenés à une année, les contenus énergétiques actualisés des deux isolants sont les suivants : 105,28 / 50 = 2,1 kwh/m²/an pour laine de verre et 27,8 / 50 = 0,556 kwh/m²/an pour l'isolant biosourcé.

L'évitement d'énergie est identique (mêmes performances d'isolation thermique pour les deux isolants), soit 69 kwh/m²/an. L'évitement d'énergie représente désormais 32 x le contenu énergétique de l'isolant laine de verre (69/2,1=32), et 124 x le contenu énergétique de l'isolant bio-sourcé (69/0,556=124).

Le rapport contenu énergétique / énergie économisée devient : 2,1 / 69 = 3 % pour l'isolant laine de verre et 0,556 / 69 = 0,8 % pour l'isolant bio-sourcé. 3 % est moins négligeable que 0,8 %.

	Evitement d'énergie du au pouvoir isolant : kwh/m²/an	Contenu énergétique sur DVT kwh/m²	Contenu énergétique / an kwh/m²/an	Ratio énergie économisée/contenu énergétique	Ratio contenu énergétique / énergie économisée
Isolant laine de verre	69	26,32	0,5264	131 x	0,76 %
Isolant bio-sourcé	69	27,8	0,556	124 x	0,8 %

Tableau 52 : Synthèse de la comparaison des contenus énergétiques de matériaux d'isolation par rapport à l'évitement d'énergie, sur la DVT des systèmes constructifs (1/2).

¹ Ce raisonnement implique l'utilisation d'une pondération qui peut être apportée sur la base notamment de retours d'expériences scientifiques et/ou de terrain qui témoignent d'un nécessaire nombre de renouvellements plus important pour des isolants conventionnels que pour des isolants bio-sourcés. Ce postulat est émis dans des conditions normales de mise en œuvre de produits et matériaux de construction, c'est-à-dire le plus souvent dans de mauvaises conditions.

Nous reviendrons sur le contexte de ces pondérations au paragraphe 5. Ces pondérations sont essentielles à l'application de notre méthodologie de comparaison ; sans elles, les calculs n'ont aucune légitimité ou pertinence.

	Nb de rpts sur DVT	Contenu énergétique actualisé sur DVT kwh/m ²	Contenu énergétique actualisé /an kwh/m ² /an	Ratio énergie économisée / contenu énergétique actualisé = A	Ratio contenu énergétique / énergie économisée = B
Isolant laine de verre	3	105,28	2,1	32 x	3%
Isolant bio-sourcé	0	27,8	0,556	124 x	0,8 %

Tableau 53 : Synthèse de la comparaison des contenus énergétiques de matériaux d'isolation par rapport à l'évitement d'énergie, sur la DVT des systèmes constructifs (2/2).

En interprétation simplifiée, plus le ratio A est élevé, plus le matériau présente une énergie grise faible au regard des économies d'énergies apportées par son pouvoir isolant pendant sa durée de vie typique, plus le matériau peut être qualifié d'éco-matériau.

Plus le ratio B est important, plus le contenu énergétique est important par rapport aux économies d'énergie apportées par le pouvoir isolant du matériau pendant sa durée de vie typique, moins le matériau peut être qualifié d'éco-matériau.

Cette réflexion basée sur la notion d'évitement d'énergie, n'est valable que dans le cas d'une comparaison par rapport à une situation de référence (bâtiment pas isolé ou isolé au minimum conforme à la Réglementation Thermique en cours). Elle suppose également que le bâtiment soit chauffé et nécessite un certain niveau de consommation énergétique, notamment pour couvrir les besoins de chauffage pendant 6 mois de l'année.

Nous avons vu précédemment (paragraphe 3.3.2 « systèmes constructifs majeurs ») que la clé d'entrée, pour déterminer des systèmes constructifs majeurs, en lien avec les problématiques actuelles auxquelles est confronté le secteur du bâtiment, se situe donc au niveau des principales déperditions thermiques d'une enveloppe peu ou mal isolée.

L'approche de l'évitement d'énergie néglige par contre l'importance du contenu énergétique des matériaux et composants assemblés au sein de systèmes constructifs, dont l'association représente en fait le bâtiment dans son ensemble. Ce contenu énergétique est peu important dans un bâtiment conventionnel, isolé et chauffé selon les normes et références en vigueur.

Par contre, dès l'instant où l'on pousse le curseur de la prise en compte des déperditions énergétiques vers une conception ou re-conception (en cas de réhabilitation) intelligente, on aboutit in fine à des performances telles que le bâtiment nécessite de moins en moins d'énergie pour fonctionner voire presque plus du tout.

Des bâtiments conçus différemment peuvent présenter des niveaux de consommations énergétiques très éloignés :

	Maison I classique	Maison II bien orientée	Maison III bioclimatique
Surface	100 m ²	100 m ²	100 m ²
Volumes	250 m ³	250 m ³	250 m ³
Température hiver	19°C permanence	19 °C 15°C Nuit	19 °C 15 °C Nuit
Vitrages	16 m ² dont 3 m ² au sud	16 m ² dont 11 m ² au sud	28 m ² dont 22 m ² au sud
Nuit en hiver	Volets ouverts	Volets fermés	Volets fermés
Jour en été	Volets ouverts	Volets fermés à 85 %	Volets fermés à 85 %
Isolation des murs	7 cm int	7 cm int	10 cm ext
Isolation en toiture	14 cm	14 cm	20 cm
Besoins de chauffage	14 300 kwh	9420 kwh - 34 %	5070 kwh -65 %

Tableau 54: Consommations énergétiques de trois maisons conçues différemment, [SALOMON, 2006]⁹⁷.

On peut comparer les besoins de chauffage des trois types de maisons avec l'énergie grise de matériaux d'isolation pris comme exemples :

	Maison I classique	Maison II bien orientée	Maison III bioclimatique
Energie grise non actualisée des isolants			
Besoins de chauffage (Kwh/m ² /an)	143	94,2	50,7
Energie grise laine minérale kwh/m ² /an (non actualisé) sur 50 ans	Pour une épaisseur de 14 cm	Pour une épaisseur de 14 cm	Pour une épaisseur de 20 cm
	18,62 kwh/m ²	18,62 kwh/m ²	26,32 kwh/m ²
Ramenée à une année de DVT	0,372 kwh/m²/an	0,372 kwh/m²/an	0,526 kwh/m²/an
Energie grise isolant bio-sourcé kwh/m ² /an (non actualisé) sur 50 ans	Pour une épaisseur de 14 cm	Pour une épaisseur de 14 cm	Pour une épaisseur de 20 cm
	27,8 kwh/m ²	27,8 kwh/m ²	40 kwh/m ²
Ramenée à une année de DVT	0,556 kwh/m²/an	0,556 kwh/m²/an	0,8 kwh/m²/an
Comparaison énergie grise (non actualisé) / besoins de chauffage			
Laine minérale	0,26 %	0,39 %	1,03 %
Isolant bio-sourcé	0,388 %	0,59 %	1,57 %
Energie grise actualisée des isolants			
Besoins de chauffage (Kwh/m ² /an)	143	94,2	50,7
Energie grise laine minérale kwh/m ² (actualisé) sur 50 ans	Pour une épaisseur de 14 cm	Pour une épaisseur de 14 cm	Pour une épaisseur de 20 cm
	74,48 kwh/m ²	74,48 kwh/m ²	105,28 kwh/m ²
Ramenée à une année de DVT	1,489 kwh/m²/an	1,489 kwh/m²/an	2,105 kwh/m²/an
Energie grise isolant bio-sourcé kwh/m ² (actualisé) sur 50 ans	Pour une épaisseur de 14 cm	Pour une épaisseur de 14 cm	Pour une épaisseur de 20 cm
	27,8 kwh/m ²	27,8 kwh/m ²	40 kwh/m ²
Ramenée à une année de DVT	0,556 kwh/m²/an	0,556 kwh/m²/an	0,8 kwh/m²/an
Comparaison énergie grise (actualisé) / besoins de chauffage			
Laine minérale	1,04 %	1,58 %	4,15 %
Isolant bio-sourcé	0,38 %	0,59 %	1,57 %

Tableau 55 : Proposition de ratio des énergies grises non actualisées et actualisées d'un isolant conventionnel (laine minérale) et d'un isolant éco-matériaux (isolant biosourcé) sur les besoins en chauffage de trois différents types de bâtiments.

En synthèse, ramené à une année de durée de vie typique (DVT) un isolant conventionnel du type laine minérale peut représenter jusqu'à 4,15 % de la dépense énergétique ramenée au m² de surface hors œuvre nette (SHON), un isolant bio-sourcé représentera, quand à lui, au maximum 1,57 % de la dépense énergétique nécessaire pour chauffer le bâtiment.

Le calcul présenté dépend principalement de postulats variables, comme par exemple le taux de renouvellement du matériau sur la durée de vie typique du système constructif dans lequel il est mis en œuvre : 0 renouvellement pour un isolant bio-sourcé, 3 renouvellements

pour la laine minérale. En se basant sur un nombre suffisant de retours d'expérience « chantiers » et de témoignages d'entreprises spécialisées dans l'expertise de désordres techniques et mobilisées par les compagnies d'assurance, il est possible de témoigner qu'en général les prescriptions de mise en œuvre des normes (DTU, règles professionnelles...) sont rarement respectées et sont à l'origine de la dégradation rapide des performances d'un certain nombre de produits et matériaux de construction à usage courant.

Le cas de la laine minérale est particulièrement flagrant d'une dégradation rapide en cas de mauvaise mise en œuvre (l'isolation thermique bénéficie d'une mauvaise mise en œuvre depuis plus de 25 ans en France).

- **Les émissions « équivalent carbone » ou « bilan carbone »**

La méthode bilan carbone version Française a été présentée en 2002 par un ingénieur spécialiste des questions climatiques - Jean Marc JANCOVICI - pour le compte de l'ADEME nationale.

Cette méthode permet à une entreprise qui fabrique des produits ou qui propose un service d'estimer les émissions de gaz à effet de serre dont elle est à l'origine, c'est-à-dire d'évaluer son impact général en termes d'émissions de gaz à effet de serre.

Dans la grande majorité des cas, il est inenvisageable de mesurer directement les émissions à l'aide de capteurs ; la seule manière de procéder est d'évaluer ces émissions à partir d'autres données.

La méthode bilan carbone permet donc d'estimer des ordres de grandeur d'émissions de gaz présentant un pouvoir de réchauffement climatique important. Les gaz retenus dans les accords internationaux pour le calcul d'émissions de GES sont les suivants :

- le gaz carbonique (CO_2)
- le méthane (CH_4)
- l'oxyde nitreux (N_2O)
- les hydrofluorocarbures ($\text{C}_n\text{H}_m\text{F}_p$)
- les perfluorocarbures ($\text{C}_n\text{F}_{2n+2}$)
- l'hexafluorure de soufre (SF_6)

L'effet du relâchement dans l'atmosphère d'un kilo de gaz à effet de serre n'est pas le même quel que soit ce gaz. Chaque gaz à effet de serre possède un pouvoir de réchauffement global qui a pour vocation de quantifier sa nocivité sur le climat. Plus ce PRG est élevé, plus l'effet de serre additionnel engendré par le relâchement d'un kilo de ce gaz dans l'atmosphère est important.

Par convention celui du CO_2 vaut 1. Les PRG utilisés dans le bilan carbone sont ceux à 100 ans issus de l'IPCC⁹⁸.

L'unité de mesure des gaz à effet de serre est le gramme équivalent carbone (gC) et ses multiples (notamment la tonne équivalent carbone, que l'on notera aussi tonne de C). Par convention un kg de gaz carbonique vaut 0,274 kg d'équivalent carbone.

Pour le secteur des produits et matériaux de construction, le bilan carbone simplifié concerne l'équivalent Carbone des émissions de gaz à effet de serre émis lors de la fabrication du produit (phase process) dans l'usine directement.

Il est possible, pour chaque produit ou matériau de construction, de décomposer toutes les phases de production qui nécessitent de l'énergie et engendrent l'émission de flux, voire de décomposer individuellement chaque matière première primaire ou secondaire entrant dans la composition du produit fini (cf analyse en cycle de vie exhaustive); il est également possible de se référer à des bases de données types d'émissions par catégories et types de produits.

L'une des principales bases de données est disponible en Suisse : les écobilans pour les produits et matériaux de construction de l'OFCL suisse via l'organisme KBOB (Les recommandations de l'office fédéral suisse de la construction et de la logistique (OFCL-KBOB), données 2007 des éco-bilans pour les produits et matériaux de construction, disponibles sur : www.bbl.admin.ch/kbob

Comparaison mur parpaing béton / monomur terre cuite :

Pour le bilan carbone lié au flux énergétique, 42,2 kg eq C / m² pour le parpaing / isolant et 92,3 kg eq C / m² pour le monomur terre cuite, soit plus de 50 % de moins pour le système parpaing / isolant.

Comparaison complexe d'isolation sous toiture :

Pour le contenu carbone, 39,8 kg eq C/m² pour le système conventionnel, contre 28,75 kg eq C/m², soit 38 % de plus.

Comparaison menuiserie PVC / menuiserie éco-certifiée : Pour le contenu carbone, les émissions représentent 190,8 kg eq C / m² pour le PVC et 23,5 kg pour le bois, soit 8 fois moins.

L'analyse pour ce critère est simple : il est acceptable de privilégier les systèmes constructifs composés de matériaux de construction à faible pouvoir de réchauffement climatique, donc à contenu équivalent carbone faible. L'analyse devient pertinente et prend tout son sens en raisonnant sur la DVT du système constructif, avec prise en compte du taux de renouvellement de certains matériaux ou produits moins durables que d'autres, ce qui impacte la quantité de GES émis pour la fabrication des produits utilisés.

- **La recyclabilité en fin de vie**

Ce critère est intimement lié au premier critère de ressource renouvelable. Il permet de caractériser une matière première secondaire issue d'une filière de recyclage performante comme matière première renouvelable ; il permet également de pointer les disfonctionnements majeurs de notre société de consommation en terme de prélèvement de ressources non renouvelables, de non recyclabilité des produits en fin de vie (pour cause d'absence de filière, de difficultés technologiques ou d'absence de volonté civile ou politique) et de responsabilité collective.

Un exemple typique de produits à priori recyclables et qui pourtant ne le sont pas en réalité: les plaques de plâtre cartonées associées à un complexe d'isolation polystyrène expansé. Il s'en vend des millions d'unités par an dans toutes les GSB et grossistes « low cost » en matériaux de construction conventionnels. Il s'en utilise donc d'énormes quantités, notamment dans l'habitat ancien pour la réhabilitation thermique (isolation par rajout d'un complexe intérieur).

Il s'en déconstruit également d'énormes quantités tous les ans alors qu'il s'agit d'un système non recyclable : la plaque de plâtre cartonée collée sur le polystyrène n'est pas

dissociable à faible coût de son voisin, le complexe termine sa vie en centre d'enfouissement technique ad vitam eternam...

Pour autant, on continue à en produire, à en vendre et à en utiliser d'énormes quantités par an...Aucune taxe recyclage n'existe sur ces produits non recyclables.

Pour la majorité des produits de construction analysés précédemment (tableaux 41, 42, 43, 44, 45), les filières de recyclage n'existent pas ou peu, y compris pour certains des matériaux relevant de la filière « éco-construction » : fenêtre bois, plaques de Fermacell, isolant bio-sourcé.

La majorité des produits de construction (éco ou non) finissent donc, au terme de leur DVT, en centre de stockage technique de classe II ou III en fonction de leur impact environnemental.

• **La toxicité des produits et matériaux de construction**

La toxicité des produits et matériaux de construction est un indicateur aggloméré qui consiste à évaluer essentiellement l'impact sur la santé, dans une moindre mesure sur l'environnement, des matériaux de construction à différentes phases de leur cycle de vie.

Afin d'éviter les analyses en cycle de vie trop exhaustives, il est possible de se concentrer sur trois phases essentielles qui sont :

- la mise en œuvre sur chantier,
- l'impact en vie en œuvre sur la durée de vie typique des systèmes constructifs et de l'ouvrage bâti,
- et l'impact et le devenir en fin de vie, notamment lors de la déconstruction et de la phase stockage en tant que déchets plus ou moins inertes.

Un ouvrage particulièrement pertinent [DEOUX, 2004]⁹⁹ est disponible pour caractériser tous les produits et matériaux de construction selon leur composition, la nature des substances utilisées (notamment leur classement ou non dans des phrases de risques), la dangerosité pour l'homme et l'environnement de leur particularités techniques (fibres bio-accumulables pour les matières minérales fibreuses ou pour les produits dérivés du bois etc..).

Une attention particulière est accordée sur la thématique « habitat et santé des occupants » à la qualité de l'air intérieure, notamment en phase de vie en œuvre qui correspond à la DVT des systèmes constructifs et de l'ouvrage en globalité.

Un guide particulièrement intéressant est proposé par le ministère de l'environnement Australien [AFME-IBO, 2000]¹⁰⁰ sur la chimie de l'habitat.

Une synthèse des effets sur l'être humain (et plus globalement l'environnement) des différentes sources de pollution est proposée, par typologie de substances. Des actions de remédiation sont listées par familles d'effets.

Effets sur l'être humain	Type de substance incriminée	Sources possibles	Actions de remédiation
Exzéma, dermatose, asthme, inflammations conjonctivites	Allergènes	Poussières, moisissures, matériaux de construction, latex, équipements mobiliers, plantes	Aspirateurs spéciaux, produits de construction antiallergiques, éviter les animaux à l'intérieur
Cancers de la langue, du péritonéum,	Asbestos	Matériaux de protection anti-feu, les appareils de stockage de chaleur	Asbestos enlevés par un expert
Maux de tête, nausées, attaques du système nerveux, PCP, cancers	Biocides	Produits de préservation du bois, peintures, tapis, pesticides, vaporisateurs électriques	Enlever les matériaux qui libèrent des substances toxiques, ne pas utiliser de fumigènes anti-toxiques
Irritation des membranes muqueuses (nez, yeux), de la gorge, difficultés à respirer, cancer possible	Formaldéhydes	Fumée de tabac, émissions de panneaux de particules et du mobilier, peintures, désinfectants	Introduction de zones non fumeur, lecture des étiquettes sur les produits, enlever ou « isoler » les sources d'émission de formaldéhydes.
Stress, dû aux odeurs, sensations d'inconfort possibles	Odeurs	Peintures de sols, laques, matériaux naturels, les tuyaux d'évacuation, les huiles de senteurs	Trouver et éliminer les sources d'odeurs
Stress dû aux odeurs, irritation des voies respiratoires, affectation du système nerveux, sensation d'inconfort	Hydrocarbonés volatils (VOC)	Solvants, peintures, couleurs, adhésifs, nettoyeurs à sec	Utilisation de produits qui ne contiennent pas de solvants, aération fréquente des pièces, trouver et isoler les sources d'émissions.
Odeurs, qui engendrent des cancers	Composés aromatiques polycycliques	Adhésifs sous parquets, sols pvc produits de couverture bitumineux	Couvrir ou enlever les sources.

Tableau 56 : Effets sur l'être humain des principales substances présentes dans les produits et matériaux de construction [DEOUX, 2004].

Selon l'Agence de l'Environnement Australienne, environ 60000 substances différentes rentrent dans la composition des produits et matériaux de construction, tels les matériaux d'isolation, blocs, peintures de finition, revêtements intérieurs etc..

La majorité d'entre eux n'ont pas été testés quant à leur innocuité sur l'environnement, et leur impact sur la santé.

Pour pouvoir qualifier la toxicité des matériaux et produits comparés précédemment, nous avons détaillé le niveau de toxicité pour tout le cycle de vie en prenant en compte les données qualitatives disponibles sur les fiches de déclarations environnementales et sanitaires relevant de la norme NF P01-010, et téléchargeables sur la base de données INIES.

Nous avons ensuite pondéré ces données qualitatives par l'application d'une note, donnant le niveau de toxicité : **0** absence - **1** faible - **2** moyenne - **3** forte. Cette pondération a été appliquée pour l'analyse des tableaux 41 à 45.

Cette méthode comporte certes des faiblesses mais présente l'avantage de simplifier l'appréciation du critère « toxicité ».

Cette évaluation simplifiée correspond au niveau de risque présenté par le produit de construction ;

Comparaison mur parpaing béton / monomur terre cuite :

La toxicité globale cumulée des produits constituant le système constructif « mur parpaing béton » est de 3 (1+1+1, cf tableau 41), celle cumulée des produits du système constructif « bloc monomur terre cuite » est de 2 (1+1 cf tableau 42). Plus la note est faible, moindre est l'impact « toxicité » du système constructif.

Comparaison complexe d'isolation sous toiture :

La toxicité globale cumulée des produits du système constructif « complexe isolation sous toiture conventionnel » est de 5, celle du système constructif « complexe d'isolation sous toiture éco-constructif » est de 1. Plus la note est faible, moindre est l'impact « toxicité » du système constructif.

Comparaison menuiserie PVC / menuiserie éco-certifiée :

La toxicité globale cumulée des produits du système constructif « fenêtre pvc » est de 2, celle du système constructif « menuiserie bois » est de 1.

- **La localisation géographique préférentielle ou « sourcing local »**

Sur le modèle des Associations pour le Maintien de l'Agriculture Paysane (AMAP) dans le domaine agricole, le « sourcing local » dans le monde du bâtiment, ou approvisionnement sur une zone de chalandise géographique peu éloignée, est basé sur une idée simple : produire et consommer localement. Transposition du « think global, act local », ce concept permet de repositionner la valeur ajoutée générée par une activité au plus près des territoires de proximité, tout en favorisant les circuits courts « production – distribution – consommation » générateurs de moindres impacts environnementaux.

Ces schémas d'approvisionnement de proximité se font désormais de plus en plus courants ; les matériaux et produits de construction ne sont pas des biens que l'on fait voyager sur de longues distances quand le coût du transport augmente constamment ; le coût des énergies non renouvelables utilisées majoritairement pour transporter les marchandises en France, joue un rôle non négligeable.

Le critère est simple : la zone de chalandise la plus simple et pleine de bon sens peut être le niveau régional français : le produit ou matériau de construction est-il fabriqué en région ?

Si non, est-il fabriqué à moins de 200 km de sa zone de chalandise principale (marché principal) ?

Comparaison mur parpaing béton / monomur terre cuite :

Le système constructif parpaing béton est constitué de matériaux de construction locaux pour la majorité :

- parpaing béton : 18 fabricants en Nord Pas de Calais Picardie
- plaques de plâtre : aucun fabricant en Nord Pas de Calais, 1 fabricant en Picardie (Oise)
- plaque de polystyrène expansé : pas de fabricant en Nord Pas de Calais, 1 fabricant dans l'Oise
- mortier de ciment : 1 fabricant au minimum en Nord Pas de Calais

Tous les matériaux sont fabriqués dans un rayon de moins de 200 kilomètres par rapport à Lille (59).

Pour le système constructif « monomur terre cuite », bien que considéré comme système relevant de l'éco-construction, les matériaux ne sont majoritairement pas locaux :

- plaque de gypse cellulose : pas de production en nord pas de calais, mais production à moins de 200 km de Lille pour une marque « Gyproc » (équivalent fermacell)
- bloc monomur terre cuite : pas de production locale en nord pas de calais jusque septembre 2008, production locale depuis à Hulluch (62), avec valorisation des déchets de terrils.
- Mortier à la chaux : pas de production locale en nord pas de calais, ni à moins de 200 kilomètres.

Comparaison complexe d'isolation sous toiture :

Pour le système constructif « complexe d'isolation sous toiture » conventionnel, les matériaux de construction ne sont majoritairement pas locaux :

- laine de verre : pas de production en nord pas de calais, ni à moins de 200 km de Lille
- plaque de plâtre : pas de production en nord pas de calais, mais production en Picardie dans l'Oise.
- Pare vapeur bitumineux : pas de production en nord pas de calais, ni à moins de 200 km de Lille

Pour le système constructif « complexe d'isolation sous toiture » relevant de l'éco-construction, les matériaux de construction sont principalement locaux :

- isolants bio-sourcés disponibles localement en région Nord Pas de Calais : isolant textile recyclé, isolant laine de mouton, isolant étoupe de lin (région Picardie)
- plaques de gypse / fibre de cellulose recyclée : pas de fabricant en région nord pas de calais, un fabricant d'un produit équivalent en Belgique (Rigidur de Gyproc)
- film frein vapeur HPV : pas de fabricant en région Nord Pas de Calais, ni à moins de 200 kilomètres de Lille.

Comparaison menuiserie PVC / menuiserie éco-certifiée :

Pour les systèmes constructifs « menuiseries », la fabrication des matériaux constitutifs est locale pour la filière bois et pour la filière PVC.

- menuiseries PVC : nombreux fabricants en Nord Pas de Calais (chiffre non disponible estimations disparates)
- menuiseries bois : deux fabricants impliqués dans la démarche Menuiseries21¹ en Nord Pas de Calais

¹ Menuiseries 21 : www.menuiseries21.com

- **L'impact sociétal :**

Ce critère, déjà présenté (paragraphe 2.2.4.2, « les typologies d'indicateurs ») relève d'une approche socio-économique du management durable. Quel impact le produit génère-t-il sur l'économie locale, positif ou négatif, et comment la valeur ajoutée qu'il contribue à créer de par sa production, sa commercialisation, son utilisation et sa prescription, est-elle redistribuée aux acteurs de la « supply chain » ?

En termes simplifiés, un indicateur simple peut être utilisé pour illustrer cet impact sociétal : le nombre d'heures de travail généré par la fabrication d'un produit, avant sa mise sur le marché. Sans prendre en considération les théories économiques du marché (concurrence pure et parfaite, loi de l'offre et de la demande...), un produit de construction peut être caractérisé par cette valeur simplifiée.

L'exemple cité en 1.3.5 concernait la comparaison entre heures de travail pour une fenêtre en bois et heures de travail pour une fenêtre en PVC : 200 contre 20, soit un écart de plus de 10 x.

En l'absence d'études complètes sur chacune des filières, il nous est seulement possible de donner ces valeurs pour les systèmes constructifs « menuiseries extérieures ». Les autres filières ne bénéficient pas d'études identiques pour aujourd'hui.

3.4.3 Comparaison des performances de solutions conventionnelles et éco-construites, selon l'outil proposé

Reprenons les solutions constructives de comparaison définies précédemment (paragraphe 4-2)

Les systèmes constructifs standards sont toujours :

- **A0-1 / A2-1 et A3-3** : mur parpaing béton maçonné ciment avec doublage intérieur plaque de polystyrène parement plaque de plâtre, étanchéité extérieure enduit base ciment.
- **B1-2 / F1-2** : isolation thermique de toiture, isolation double couche sur solives et suspentes, avec écran pare vapeur scotché
- **C1-4** : fenêtre PVC standard

Les systèmes constructifs remplissant les mêmes fonctions, ayant un caractère lié ou proche des principes de l'éco-construction sont toujours :

- **A1-1** Mur monomur terre cuite, béton cellulaire ou pierre ponce
- **A3-4 et A3-1** Enduit au mortier de chaux hydraulique ou bardage bois pin des landes
- **B1** Doublage isolant hygrophile biosourcé avec suspentes
- **F1-1** Frein vapeur régulateur de vapeur hygrovariable
- **C1-1** Fenêtre bois certifié FSC éco-conçue

Pour la suite de notre raisonnement, nous sélectionnons un type de système constructif standard, présentant un équivalent proche des principes de l'éco-construction : une fenêtre PVC standard et une fenêtre bois certifié FSC, éco-conçue¹.

Nous appliquons désormais le raisonnement de classification qui nous permet de comparer les systèmes constructifs entre eux, selon un classement scientifique et opérationnel de leurs composants (paragraphe 2.2.4.1) :

¹ Fabricant adhérent à la charte « Menuiseries 21 » www.menuiseries21.com

	Fenêtre PVC	Fenêtre bois certifiée FSC
Type de matière première	Primaire	Primaire
matières	Synthétiques	Naturelles
Science des matériaux	Composites	Organiques
Application et usages	Application moderne	Application moderne et traditionnelle
Matériaux de terrain	Matériau de protection	Matériau de protection
Classement général	Matériau du second oeuvre	Matériau du second oeuvre
Uniclass		
G	G 26 Frame/isolated structural members	G26 Frame/isolated structural members
J	JL - Windows/Doors/Stairs	JL - Windows/Doors/Stairs
N	N3 - Performance	N3 - Performance

Tableau 57 : Comparaison des systèmes constructifs sélectionnés selon le système de classification retenu.

La décomposition des systèmes constructifs étudiés donne les résultats suivants (selon le modèle proposé au paragraphe 2.2.4) :

Unité fonctionnelle	Système constructif type	Fonction	Classification Uniclass	Corps d'état	DTU	Descriptif et Composants ¹
<p>« Ouverture de bâtiment »</p> <p>C1-1 & C1-4 Assurer la fonction d'un m² de surface d'ouverture d'un bâtiment, par une fenêtre type ou porte fenêtre type, sur une durée de vie typique de 30 ans, avec les performances thermiques minimales $U_w < 2,6 \text{ w/m}^2.k$ et acoustiques $R_a \text{ tr} < 30 \text{ db}$ (conformité NRA)</p>	Fenêtre PVC ou Fenêtre bois certifié PEFC	<ul style="list-style-type: none"> - Thermique de l'enveloppe - Infiltrations 	G 26	Menuiseries extérieures	36 et 37	<p>Descriptif fenêtre PVC : Croisée standard ouvrante à la française 1 vantail ht 115 x 80 cm, en PVC blanc ép. 60 mm, vitrage isolant 4-16-4 faible émissivité. Ferrage paumelles, crémonne à galets 3 points, poignée époxy. Fixations et pose sur fond de joint et joint d'étanchéité.</p> <p>Descriptif fenêtre bois : fenêtre croisée standard ouvrant à la française, 1 vantail, oscillot battant, de ht 145 x 90 cm en chêne massif français, ep 56 mm (ouvrant), double vitrage 4-46-4 faible émissivité argon, poignée non comprise</p> <p>Composants fenêtre PVC : PVC (Sable, calcaire, sel -chlore), verre, acier</p> <p>Composants fenêtre bois : Bois éco-certifié (pin sylvestre) origine France (22 % de la réserve de résineux français), ressource renouvelable (prélèvements < renouvellement annuel)</p>

Tableau 58 : Décomposition des systèmes constructifs étudiés.

Les critères techniques, économiques et financiers peuvent être détaillés

Les critères techniques sont déterminés à partir des données de la base française de référence pour caractériser les prix des systèmes constructifs « batiprix » (www.batiprix.com) ; les données liées à la durée de vie typique sont issues de la base INIES portant sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits et matériaux de construction (www.inies.fr).

¹ Selon Batiprix – Le Moniteur, 2008 www.batiprix.com

Systèmes constructifs		C1-1	C1-4
1.0	Unité de référence	1 m ² d'ouverture de bâtiment	1 m ² d'ouverture de bâtiment
1.1	Quantité / UF	Fenêtre croisée standard ouvrant à la française, 1 vantail, oscillot battant, de ht 145 x 90 cm en chêne massif français, ep 56 mm (ouvrant), double vitrage 4-46-4 faible émissivité argon, poignée non comprise	Croisée standard ouvrante à la française 1 vantail ht 115 x 80 cm, en PVC blanc ép. 60 mm, vitrage isolant 4-16-4 faible émissivité. Ferrage paumelles, crémone à galets 3 points, poignée époxy. Fixations et pose sur fond de joint et joint d'étanchéité.
1.2	Heure de main d'œuvre		
	Mise en œuvre du système constructif	1,65 heure	1,65
	Maintenance	0	0,5
	fonctionnement	1	0
1.3	DVT (sources : fabricants)	30 ans	30 ans
1.4	Remplacements / Maintenance	0 sur DVT	1 sur DVT

Tableau 59 : Critères techniques des systèmes constructifs étudiés.

Les critères économiques sont déterminés à partir des données de la base française de référence pour caractériser les prix des systèmes constructifs « batiprix » (www.batiprix.com)

Systèmes constructifs		C1-1	C1-4
2.1	Coût « matériaux » d'une unité fonctionnelle		
	Fenêtre	470 €	280 €
	Kit de pose et étanchéité	40 €	14,26 €
	Poignées	4,42 €	0 €
	<i>Coût total matériel (débourré)</i>	<i>514,42 €</i>	<i>294,26 €</i>
2.2	Coût main d'œuvre pour une unité fonctionnelle		
	coût heure de MO	22,81 €	22,81 €
	Coût mise en œuvre (débourré)	37,64 €	37,64 €
2.3	Coût « débourré » total matériaux + main d'œuvre	552,06 €	331,90 €
2.4	Coût débourré ou « prix de revient » (34 %)	739,76 €	444,74 €
2.5	Coût de vente ou « prix de vente » ou coût d'investissement	821,13 €	493,66 €

	initial (11%)		
2.6	Coût de maintenance		
	Coûts de démantèlement de l'ancien système constructif (en fonction du nb d'heures de MO nécessaires et du coût des heures de MO)	0 €	16,53 € (11,405 € déboursé)
	Coûts de remplacement du système constructif	0 €	493,66 €
	Coûts totaux de maintenance	0 €	510,19 €
2.7	Coûts de fonctionnement	€	0 €
	Coût MO pour le lasurage du système constructif (en fonction du nombre d'heures de MO et du coût de l'heure de MO)	9,39 € (6,71 € déboursé)	0 €
	Coût Matériaux lasure / papier abrasif pour le lasurage du système constructif	0,90 € (0,62 € déboursé)	0 €
	Coût total MO + matériaux pour le lasurage extérieur du système constructif	10,29 € (7,35 € déboursé)	
	Fréquence de lasurage sur DVT	6	0
	Coûts totaux de fonctionnement sur DVT	61,74 €	0 €
2.8	Coût global ou total (somme des coûts initiaux et intermédiaires en cycle de vie)	882,87 €	1003,85 €
2.9	Coût évité brut	120,98 €	

Tableau 60 : Critères économiques des systèmes constructifs étudiés

Enfin, les critères financiers sont déterminés à partir des données financières françaises ou internationales moyennes (taux d'actualisation des valeurs monétaires), à partir de calculs issus de systèmes normalisés financiers (temps de retour sur investissement, valeurs actualisées, ratio coûts / bénéfices) et enfin de primes et subventions régionales ou nationales.

⇒ Taux d'actualisation des valeurs monétaires

Le taux d'actualisation des valeurs monétaires est utilisé pour déprécier des flux futurs et déterminer leur valeur actuelle, c'est à dire leur valeur à la date d'aujourd'hui. La valeur donnée au temps étant le fondement de l'actualisation, ce taux est toujours positif.

Le taux souvent choisi est égal à celui du taux d'intérêt sur le marché. Il est possible de prendre en référence un taux utilisé sur la zone euro : l'Euribor « *Euro interbank offered rate* » (taux interbancaire offert en euro), l'un des IBOR (*Interbank offered rate*) qui représente les taux auxquels une banque de première catégorie, à un moment donné et pour une échéance donnée, prête à une autre banque de première catégorie en blanc (unsecured lending).

Le taux Euribor 360 jours est fixé au 07/11/2008 à 4,58 % (11 mois)¹.

⇒ Les gains actualisés

Les gains actualisés sont calculés à partir des gains annuels ou économies générées par la prescription ou l'utilisation d'un système constructif ou d'un système de production d'énergie renouvelable, en comparaison avec un autre considéré comme conventionnel.

Par exemple, une maison « ré-isolée » devient plus performante d'un point de vue thermique ; les premiers gains annuels peuvent être exprimés en kwh économisés qui représentent des « € » en fonction du mode de chauffage utilisé. Les gains actualisés tiennent compte du taux d'actualisation des valeurs monétaires défini précédemment.

Les gains annuels nets sont définis par la somme des gains annuels du projet dont on déduit les dépenses, excepté les coûts financiers (emprunt).

⇒ Le temps de retour sur investissement simple

Ce temps « simple » peut être défini comme la période au terme de laquelle la somme cumulée des gains financiers générés par le projet équivaut au montant de l'investissement initial. Le « TRS » est calculé en divisant l'investissement par le gain annuel net. Pour être intéressant, Il doit être inférieur à la durée de vie économique du projet.

⇒ Les primes / subventions :

Les primes et subventions viennent en déduction du montant de l'investissement réalisé. Les aides publiques contribuent, par un effet levier direct, à la perception que l'investissement consenti est moins important donc plus acceptable. En fonction de comment et à quoi elles sont destinées (favoriser l'isolation thermique des maisons existantes ou l'investissement dans un système de production d'énergie renouvelable), ces aides sont plus ou moins efficaces d'un point de vue global pour la collectivité.

En France, depuis la loi de finances pour 2005 et pour 2006 (articles 90 de la loi de finances pour 2005 et 83 de la loi de finances pour 2006)², le crédit d'impôt pour les dépenses en faveur du développement durable (économies d'énergies, énergies renouvelables), favorise les dépenses en faveur d'équipements énergétiques durables tels que :

- les équipements de chauffage (chaudières basse température et à condensation) ;
- les matériaux d'isolation ;
- les appareils de régulation de chauffage ;
- les équipements utilisant des énergies renouvelables ;

¹ Voir Taux actualisés Euribor sur Boursorama.com www.boursorama.com/devises/taux_euribor.phtml

² Article disponible sur www.legifrance.gouv.fr

- les pompes à chaleur dont la finalité essentielle est la production de chaleur ;
- les équipements de raccordement à certains réseaux de chaleur alimentés majoritairement par des énergies renouvelables ou des installations de cogénération.

Le crédit d'impôt est donné à concurrence de 15 à 50 % du prix en € TTC fourni par un artisan installateur et ne concerne que le coût de l'équipement, hors main d'œuvre.

Ce crédit d'impôt a largement contribué depuis 2006 à la dynamisation du marché des énergies renouvelables, dans une moindre mesure celui de l'isolation des bâtiments existants. Les menuiseries extérieures sont reprises dans le système d'aides du crédit d'impôt dans la rubrique « matériel d'isolation thermique des parois vitrées ».

Depuis la crise financière initiée par les « sub primes » américains en septembre 2008, le marché de la construction de maisons individuelles, qui portait jusqu'alors la croissance du secteur du bâtiment en France, s'est considérablement ralenti avec -20 % de demandes sur les permis de construire entre septembre 2008 et septembre 2009, une baisse des prix de l'immobilier de 10 % en moyenne nationale, un durcissement des conditions d'obtention d'un prêt immobilier par les banques. Les effets négatifs sont directs : une réduction des emplois non garantis dans le secteur du bâtiment, une diminution de la visibilité des entreprises à moyen terme qui naviguent désormais à court terme (visibilité moyenne des carnets de commande des entreprises de moins de 10 salariés inférieure à 6 mois en juin 2009).

Des effets positifs se font également ressentir : les entreprises investissent dans la formation de leur salariés, notamment les formations aux économies d'énergie (FEEBAT), remettent en question leurs pratiques (émission de devis dans des délais raisonnables, démarche commerciale et qualité auprès des clients, remises, rabais ristournes importantes) et s'intéressent progressivement au marché de la rénovation thermique jusque là plus ou moins délaissé car trop compliqué à appréhender sauf pour certains spécialistes.

Les conditions d'éligibilité au crédit d'impôt en faveur des travaux d'amélioration thermique et de l'installation de systèmes de production d'énergie renouvelable sont détaillés ci après :

Matériaux d'isolation thermique des parois vitrées	Caractéristiques et performances
Fenêtres ou portes-fenêtres	Exigence au 01/01/2008 : PVC : $U_w \leq 1,6 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$ bois : $U_w \leq 1,8 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$ métallique : $U_w \leq 2 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$ Exigence au 01/01/2009 : PVC : $U_w \leq 1,4 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$ bois : $U_w \leq 1,6 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$ métallique : $U_w \leq 1,8 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$
Vitrages à isolation renforcée (vitrages à faible émissivité)	$U_g \leq 1,5 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$
Doubles fenêtres (seconde fenêtre sur la baie) avec un double vitrage renforcé	$U_g \leq 2 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$

U_g, U_w : coefficient de transmission surfacique . La performance thermique d'une paroi vitrée dépend de la nature de la menuiserie, des performances du vitrage et de la qualité de la mise en œuvre de la fenêtre.

Tableau 61: Conditions d'éligibilité au crédit d'impôt 2006-2009 des matériaux d'isolation thermique des parois vitrées, installés par un professionnel

Pour tous ces matériaux d'isolation thermique, le taux du crédit d'impôt est de 25%.

Ce taux est porté à 40 % à la double condition que ces équipements soient installés dans un logement achevé avant le 1/1/1977 et que leur installation soit réalisée au plus tard le 31 décembre de la 2^{ème} année qui suit celle de l'acquisition du logement.

Le taux retenu ici sera le taux maximum de 40 % pour un logement achevé avec le 1/1/1977¹.

⇒ **Le ratio coûts / bénéfices actualisés**

Comme présenté au chapitre 1 (2.2.4.5), ce ratio permet de valoriser le temps de retour sur investissement simple d'un autre point de vue plus quantitatif : les coûts divisés par les bénéfices d'un projet permettent de comprendre immédiatement si un projet mérite d'être réalisé ou non.

Si le ratio coûts / bénéfices > 1 : les coûts sont supérieurs aux bénéfices, le projet n'est pas considéré comme rentable.

Si le ratio coûts / bénéfices < 1 : les coûts sont inférieurs aux bénéfices, le projet peut être considéré comme rentable.

Si le ratio coûts / bénéfices = 1 : les coûts sont égaux aux bénéfices, le projet mérite une attention qui peut être complétée par des ratios complémentaires avant de finaliser la décision d'investissement.

⇒ **La valeur actuelle nette (VAN)**

Elle représente la différence entre les gains actualisés et les dépenses actualisées sur la durée de vie du projet de laquelle on déduit l'investissement initial.

Quand la VAN est supérieure à 0, au bout d'un certain nombre d'années, cela indique que la somme cumulée des gains financiers générés par le projet est égale au montant de l'investissement initial, tenant compte de l'évolution des gains générés et de l'actualisation. On parle également de Temps de Retour Elaboré (TRE, période).

Compte tenu des valeurs dont nous disposons à cette étape du raisonnement, il est possible d'indiquer certains critères financiers pour les deux systèmes constructifs étudiés :

Systemes constructifs		C1-1	C1-4
3.0	Taux d'actualisation des valeurs monétaires	4,58 %	4,58 %
3.1	Gains actualisés	NC	NC
3.2	Temps de retour sur investissement simple	NC	NC
3.3	Prime / Subvention		
	Coût matériel (prix de vente) hors main d'œuvre en € HT /m ²	765,14 €	437,68 €
	Crédit d'impôt de 40 %	306,056 €	175,072 €
	Coût réel matériel après crédit d'impôt	459 ,084 €	262,608 €
3.4	Ratio coûts / bénéfices	NC	NC
3.5	Valeur actuelle nette (VAN)	NC	NC

Tableau 62 : Critères financiers des systèmes constructifs étudiés

¹ Ce type de logements représente environ 17,5 Millions de bâtiments sur les 30 millions que comporte le parc français, soit 67 %. Au rythme voulu par le gouvernement, pour rénover tous ces logements d'ici à 2050 et diminuer par 4 leurs émissions de gaz à effet de serre (GES), il faudrait en rénover 425 000 par an.

Les autres critères seront complétés au fur et à mesure du raisonnement en coût global actualisé et de l'application des différentes pondérations.

3.4.4 Analyses et synthèses des résultats

Reprenons les deux systèmes constructifs étudiés : une menuiserie extérieure en bois et une menuiserie extérieure en PVC.

La description de leur performance et leur classification ont été réalisées, notamment la définition de l'unité fonctionnelle, les DTU de référence, la description du système constructif associé.

Les trois familles de critères techniques, économiques et financiers ont été complétées en fonction des informations disponibles à cette étape du raisonnement.

La caractérisation environnementale et santé a été réalisée (paragraphe 3.4.2) et a notamment permis de mettre en évidence les critères simplifiés contenu énergétique et contenu carbone, pour les deux systèmes constructifs.

D'un point de vue technique, les deux systèmes constructifs sont équivalents en termes de performances initiales (performances techniques, thermiques pour l'éligibilité au crédit d'impôt).

D'un point de vue économique, une menuiserie bois en raisonnement économique simple non actualisé sur la durée de vie typique est plus chère qu'une menuiserie PVC, avant et après crédit d'impôt.

Type de menuiserie / Systèmes constructifs	C1-1 (bois)	C1-4 (PVC)
Coût global non actualisé (matériel hors main d'œuvre) hors crédit d'impôt	765,14 €	437,68 €
Crédit d'impôt sur matériel (40 %)	306,056 €	175,072 €
Coût global non actualisé (matériel) après crédit d'impôt	459,084 €	262,608 €

Tableau 63 : Comparaison des coûts globaux actualisés avec ou hors crédit d'impôt matériel, des systèmes constructifs étudiés

D'un point de vue financier, deux critères sur les cinq présentés et retenus (paragraphe 3.3.2) sont complétés : le taux d'actualisation des valeurs monétaires et les primes / subventions du moment.

Pour dérouler notre raisonnement comparatif de solutions dites de développement durable, à partir de l'exemple retenu (les systèmes techniques d'isolation thermique des parois vitrées), il est possible d'effectuer une pondération par certains critères ciblés complémentaires, pondération proposée au paragraphe suivant.

3.5 Pondération des critères techniques, économiques et financiers

3.5.1 Hypothèses préliminaires : détermination des types de pondération

Nous avons vu précédemment qu'il existe différents types de critères permettant de caractériser les systèmes constructifs étudiés. Ces critères peuvent être eux-mêmes présentés par rapport à différents contextes qui vont influencer leur valeur, leur crédibilité et leur compréhension.

Par pondération on entend « *l'utilisation de modélisations pour étudier la probabilité de différentes situations* » [Tisseau & Pitrat, 1996]¹⁰¹.

Ces différentes modélisations ont chacune leur avantage propre ; pour obtenir une fiabilité supérieure dans la prédiction de chacune d'entre elles, plutôt que prises séparément, on peut privilégier une pondération de contexte.

La pondération de contexte est d'ailleurs un domaine de recherche active dans le domaine de l'intelligence artificielle.

Les systèmes constructifs étudiés présentent des particularités fonctionnelles spécifiques en terme d'isolation thermique ; ils sont également identifiés comme techniques dites de développement durable et d'économies d'énergie au niveau des articles 83 et 90 des lois de finance de 2005-2006.

Nous proposons plusieurs types de pondérations basées sur :

- la performance technique thermique des systèmes étudiés (pondération 1),
- les prescriptions des réglementations thermiques existantes (RT) (pondération 2),
- les systèmes de management de la qualité environnementale dans le bâtiment (SMQE) et/ou systèmes de certification énergétique (pondération 3),
- les utilisateurs finaux, artisans et entreprises de construction de maisons individuelles, qui utilisent les systèmes constructifs étudiés et sont assurés pour leur mise en œuvre (pondération 4),
- deux indicateurs environnementaux simplifiés : le potentiel de recyclabilité effective en fin de vie évalué par le coût associé de traitement des déchets (pondération 5) et les émissions carbone équivalent liées aux émissions de gaz à effet de serre (GES) (pondération 6),
- et enfin un indicateur sociétal : les heures de travail générées par la mise sur le marché des systèmes constructifs, converties en nombre d'emplois équivalent. (pondération 7).

3.5.2 Pondération technique, la performance thermique simple des systèmes étudiés

La première pondération proposée concerne la performance thermique des systèmes étudiés. Les menuiseries extérieures présentent des caractéristiques d'isolation thermique différentes des matériaux d'isolation thermique conventionnels.

On caractérise les performances thermiques d'une menuiserie extérieure comportant un vitrage, un dormant (cadre fixe extérieur) et un ouvrant (cadre mobile intérieur) par les indices $U_w - U_g - U_f$, pour :

- U_w : coefficient de déperdition thermique surfacique de la fenêtre dans sa globalité (w pour « window » en anglais),
- U_g : coefficient de déperdition thermique surfacique du verre uniquement (g pour « glass » en anglais),
- U_f : coefficient de déperdition thermique surfacique des cadres, principalement le cadre fixe « dormant » (f pour « frame » en anglais).

Système constructif	C1-1 « fenêtre bois »	C1-4 « fenêtre PVC »
Ug (verre)	1,2 W/m ² .°k	1,2 W/m ² .°k
Uf (cadres)	1,65 W/m ² .k	2 W/m ² .°k
Uw (fenêtre complète)	1,44 W/m ² .k	1,53 W/m ² .°k

Tableau 64 : Comparaison des performances thermiques valeurs U des systèmes constructifs étudiés.

Pour comparer les menuiseries extérieures étudiées, il faut définir un système de comparaison de référence, en l'occurrence une menuiserie extérieure moins performante : double vitrage installé dans les années 1990, correspondant à la réglementation thermique 2000 : $U_w < \text{ou égal à } 2,9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°k}$, ou Th5 dans la réglementation ACOTHERM française (à partir de 2005, la classe Th6 est remplacée par la classe Th5).

Classe Th	Menuiserie de type 1. et 2. U en W/(m ² .K)
Th5	$2,9 \geq U > 2,5$
Th6	$2,5 \geq U > 2,2$
Th7	$2,2 \geq U > 2,0$
Th8	$2,0 \geq U > 1,8$
Th9	$1,8 \geq U > 1,6$
Th10	$1,6 \geq U > 1,4$
Th11	$U \leq 1,4$

Tableau 65 : Valeurs des coefficients de transmission surfacique U_w maximum par types de classe Th en lien avec la réglementation thermique 2000 (RT 2000)

Le nombre de points attribués pour cette solution technique « menuiseries » est le minimum : 1 point pour Th5 [DGUHC, 2001]¹⁰².

Un tableau de comparaison des performances thermiques et de la rentabilité de l'investissement « fenêtre bois » vs « fenêtre pvc » peut être réalisé :

Les hypothèses de calcul sont les suivantes :

- surface à isoler : 1 m²,
- durée de vie de l'investissement : 30 ans,
- degrés jours base Lille / Lesquin (station météo) : 2693 K.jours,
- ratio degrés jours équivalents / degrés jours normaux : 0,8,
- énergie utilisée pour le chauffage : gaz naturel,
- coût du kwh de gaz naturel avec abonnement : 0,05 €,
- évolution du prix moyen de l'énergie par an : 6 %,
- aides publiques (crédit d'impôt) sont déjà intégrées dans le coût de l'investissement.

Pour le système constructif C1-1 « fenêtre bois », le tableau de comparaison « situation initiale / changement de menuiserie bois vitrage 4-16-4 argon ITR, cadre bois 70 mm » est le suivant :

Isolation changement de Menuiseries bois		
Dans l'état initial : menuiserie $U_w = 2,9 \text{ W/m}^2.k$		
Surface à isoler	1	m ²
Durée de vie de l'investissement	30	années
U	2,90	W/m ² .K
U total (U * surface à isoler)	2,90	W/K
Degré jours normaux (Lille Lesquin)	2693,00	K.Jours
Ratio Degj_équiv/ Degj_normaux	0,80	
Degrés jours équivalents	2154,40	K.Jours
Dépense annuelles par le système menuiserie existante	6247,76	W.Jours/an
	149,95	kWh/an
	149,95	kWh/m ² .an
Après changement menuiserie $U_w = 1,44 \text{ W/m}^2.k$		
Surface à isoler	1	m ²
Durée de vie de l'investissement	30	années
U	1,44	W/m ² .K
U total (U * surface à isoler)	1,44	W/K
Degrés jours normaux (lille Lesquin)	2693,00	K.Jours
Ratio Degj_équiv/ Degj_normaux	0,80	
Degrés jours équivalents	2154,40	K.Jours
Dépense annuelles par le système menuiserie	3102,34	W.Jours/an
	74,46	kWh/an
	74,46	kWh/m ² .an
Economie d'énergie par année	75,49	kWh/an
Economie sur la durée de vie de l'investissement	2264,71	kWh
Prix du kWh utile de chaleur en 2008 (kwh gaz, août 2008)	0,05	€
Coût du système constructif "menuiserie" au mètre carré	353	€/m ²
Coût total d'isolation	353	€
Coût investissement avec aides publiques	353	€
Gain annuel en 2008 (économie d'énergie par an * prix annuel du kwh utilisé pour le chauffage)	3,77	€
Taux d'actualisation	4,6%	
Accroissement prix énergie utilisée	6,0%	

Tableau 66 : Comparaison des performances thermiques de deux systèmes constructifs « menuiseries extérieures » et évaluation des gains annuels en € générés par le changement de menuiserie (bois).

Le temps de retour sur investissement simple peut être calculé, ie la période au cours de laquelle la somme cumulée des gains financiers générés par le projet est égale au montant de l'investissement initial. Ce temps de retour simple est calculé par le ratio dépense initiale totale / gains annuels nets.

Pour le cas présent : $353 \text{ €} / 3,77 \text{ € par an} = 93,63 \text{ ans}$. Ce temps de retour simple est largement supérieur à la durée de vie économique de l'investissement (30 ans) qui n'est pas considéré comme « rentable ».

En seconde analyse, on introduit le temps de retour sur investissement élaboré ie la période au cours de laquelle la somme cumulée des gains générés par le projet d'investissement, en l'occurrence ici l'investissement dans une fenêtre bois est égale au montant de l'investissement initial mais en tenant compte de l'évolution des gains générés et de l'actualisation.

Cette durée annule également la valeur actuelle nette (VAN) qui est la somme des gains annuels actualisés à laquelle on soustrait l'investissement initial.

Le tableau des gains actualisés et des VAN peut ainsi être réalisé en utilisant :

- le taux d'actualisation des valeurs monétaires,
- et l'inflation annuelle du coût de l'énergie.

Pour que les gains actualisés année après année soient croissants, il est indispensable que le taux d'actualisation des valeurs monétaires soit inférieur à l'inflation annuelle du coût de l'énergie puisque cette inflation permet de maximiser les bénéfices annuels pris en compte dans le calcul.

On obtient ainsi le tableau suivant :

Année	Gain	Gain actualisé	VAN	Année	Gain	Gain actualisé	VAN
0,00	3,77	3,77	-349,23	33,00	25,82	5,93	-190,72
1,00	4,00	3,83	-345,40	34,00	27,37	6,01	-184,71
2,00	4,24	3,88	-341,52	35,00	29,01	6,09	-178,62
3,00	4,50	3,93	-337,59	36,00	30,75	6,18	-172,45
4,00	4,77	3,99	-333,60	37,00	32,60	6,26	-166,18
5,00	5,05	4,04	-329,56	38,00	34,55	6,35	-159,84
6,00	5,35	4,10	-325,46	39,00	36,63	6,43	-153,40
7,00	5,68	4,15	-321,31	40,00	38,82	6,52	-146,88
8,00	6,02	4,21	-317,10	41,00	41,15	6,61	-140,27
9,00	6,38	4,27	-312,83	42,00	43,62	6,70	-133,56
10,00	6,76	4,33	-308,50	43,00	46,24	6,80	-126,76
11,00	7,17	4,39	-304,11	44,00	49,01	6,89	-119,87
12,00	7,60	4,45	-299,66	45,00	51,95	6,99	-112,89
13,00	8,05	4,51	-295,16	46,00	55,07	7,08	-105,81
14,00	8,53	4,57	-290,58	47,00	58,38	7,18	-98,63
15,00	9,05	4,63	-285,95	48,00	61,88	7,28	-91,35
16,00	9,59	4,70	-281,25	49,00	65,59	7,38	-83,97
17,00	10,16	4,76	-276,49	50,00	69,53	7,48	-76,49
18,00	10,77	4,83	-271,66	51,00	73,70	7,58	-68,91
19,00	11,42	4,89	-266,77	52,00	78,12	7,69	-61,22
20,00	12,11	4,96	-261,80	53,00	82,81	7,79	-53,43
21,00	12,83	5,03	-256,77	54,00	87,78	7,90	-45,53
22,00	13,60	5,10	-251,67	55,00	93,04	8,01	-37,52
23,00	14,42	5,17	-246,50	56,00	98,63	8,12	-29,40
24,00	15,28	5,24	-241,26	57,00	104,54	8,23	-21,17
25,00	16,20	5,31	-235,95	58,00	110,82	8,34	-12,83
26,00	17,17	5,39	-230,56	59,00	117,46	8,46	-4,37
27,00	18,20	5,46	-225,10	60,00	124,51	8,58	4,21
28,00	19,29	5,54	-219,57	61,00	131,98	8,69	12,90
29,00	20,45	5,61	-213,96	62,00	139,90	8,81	21,72
30,00	21,68	5,69	-208,27	63,00	148,30	8,94	30,65
31,00	22,98	5,77	-202,50	64,00	157,19	9,06	39,71
32,00	24,36	5,85	-196,65	65,00	166,63	9,18	48,89

Tableau 67 : Tableau des gains actualisés sur la durée de vie économique de l'investissement menuiserie Bois.

La lecture de ce tableau permet de mettre en évidence la durée nécessaire pour que la VAN soit annulée (VAN = 0), c'est-à-dire 59 à 60 ans.

59 à 60 ans en temps de retour sur investissement élaboré (temps qui annule la VAN) contre 93 ans pour le temps de retour sur investissement simple.

Il est donc plus que conseillé de raisonner en temps de retour sur investissement élaboré tenant compte de l'évolution des gains générés et de l'actualisation.

Pour le système constructif C1-4 « fenêtre PVC », le tableau de comparaison « situation initiale / changement de menuiserie PVC vitrage 4-16-4 argon ITR, cadre PVC 80 mm » est le suivant :

Isolation changement de Menuiseries		
Dans l'état initial : menuiserie $U_w = 2,9 \text{ W/m}^2.k$		
Surface à isoler	1	m ²
Durée de vie de l'investissement	30	années
U	2,90	W/m ² .K
U total (U * surface à isoler)	2,90	W/K
Degré jours normaux (Lille Lesquin)	2693,00	K.Jours
Ratio Degj_équiv/ Degj_normaux	0,80	
Degrés jours équivalents	2154,40	K.Jours
Déperditions annuelles par le système menuiserie	6247,76	W.Jours/an
	149,95	kWh/an
	149,95	kWh/m ² .an
Après changement menuiserie : menuiserie $U_w = 1,53 \text{ W/m}^2.k$		
Surface à isoler	1,00	m ²
Durée de vie de l'investissement	30,00	années
U	1,53	W/m ² .K
U total (U * surface à isoler)	1,53	W/K
Degrés jours normaux (lille Lesquin)	2693,00	K.Jours
Ratio Degj_équiv/ Degj_normaux	0,80	
Degrés jours équivalents	2154,40	K.Jours
Déperditions annuelles par le système menuiserie	3296,23	W.Jours/an
	79,11	kWh/an
	79,11	kWh/m ² .an
Economie d'énergie par année	70,84	kWh/an
Economie sur la durée de vie de l'investissement	2125,10	kWh
Prix du kWh utile de chaleur en 2008 (kwh gaz, août 2008)	0,05	€
Coût du système constructif "menuiserie" au mètre carré	285	€/m ²
Coût total d'isolation	285	€
Coût investissement avec aides publiques	285	€
Gain annuel en 2008 (économie d'énergie par an * prix annuel du kwh chauffage)	3,54	€
Taux d'actualisation	4,6%	
Accroissement prix énergie utilisée	6,0%	

Tableau 68 : Comparaison des performances thermiques de deux systèmes constructifs « menuiseries extérieures » et évaluation des gains annuels en € générés par le changement de menuiserie (PVC).

Le temps de retour sur investissement simple peut également être calculé : ce dernier est calculé par le ratio dépense initiale totale / gains annuels nets.

Pour le cas présent : $285 \text{ €} / 3,54 \text{ € par an} = 80,5 \text{ ans}$.

Ce temps de retour simple est toujours largement supérieur à la durée de vie économique de l'investissement (30 ans) qui n'est pas considéré comme rentable.

En seconde analyse, on introduit de nouveau le temps de retour sur investissement élaboré.

Le tableau des gains actualisés et des VAN peut ainsi être réalisé en utilisant :

- le taux d'actualisation des valeurs monétaires,
- et l'inflation annuelle du coût de l'énergie.

Pour que les gains actualisés année après année soient croissants, il est toujours indispensable que le taux d'actualisation des valeurs monétaires soit inférieur à l'inflation annuelle du coût de l'énergie puisque cette inflation permet de maximiser les bénéfices annuels pris en compte dans le calcul

On obtient alors :

Année	Gain	Gain actualisé	VAN	Année	Gain	Gain actualisé	VAN
0,00	3,54	3,54	-281,46	28,00	18,10	5,19	-159,79
1,00	3,75	3,59	-277,87	29,00	19,19	5,27	-154,53
2,00	3,98	3,64	-274,23	30,00	20,34	5,34	-149,19
3,00	4,22	3,69	-270,54	31,00	21,56	5,41	-143,78
4,00	4,47	3,74	-266,80	32,00	22,86	5,49	-138,29
5,00	4,74	3,79	-263,00	33,00	24,23	5,56	-132,73
6,00	5,02	3,84	-259,16	34,00	25,68	5,64	-127,09
7,00	5,33	3,90	-255,26	35,00	27,22	5,72	-121,37
8,00	5,65	3,95	-251,31	36,00	28,86	5,80	-115,58
9,00	5,98	4,01	-247,30	37,00	30,59	5,88	-109,70
10,00	6,34	4,06	-243,24	38,00	32,42	5,96	-103,74
11,00	6,72	4,12	-239,13	39,00	34,37	6,04	-97,71
12,00	7,13	4,17	-234,95	40,00	36,43	6,12	-91,58
13,00	7,55	4,23	-230,72	41,00	38,62	6,21	-85,38
14,00	8,01	4,29	-226,43	42,00	40,93	6,29	-79,09
15,00	8,49	4,35	-222,08	43,00	43,39	6,38	-72,71
16,00	9,00	4,41	-217,68	44,00	45,99	6,47	-66,25
17,00	9,54	4,47	-213,21	45,00	48,75	6,55	-59,69
18,00	10,11	4,53	-208,68	46,00	51,68	6,64	-53,05
19,00	10,72	4,59	-204,08	47,00	54,78	6,74	-46,31
20,00	11,36	4,66	-199,43	48,00	58,06	6,83	-39,48
21,00	12,04	4,72	-194,71	49,00	61,55	6,92	-32,56
22,00	12,76	4,79	-189,92	50,00	65,24	7,02	-25,54
23,00	13,53	4,85	-185,07	51,00	69,16	7,12	-18,42
24,00	14,34	4,92	-180,15	52,00	73,30	7,21	-11,21
25,00	15,20	4,99	-175,17	53,00	77,70	7,31	-3,90
26,00	16,11	5,05	-170,11	54,00	82,37	7,41	3,52
27,00	17,08	5,12	-164,99	55,00	87,31	7,52	11,03
				56,00	92,55	7,62	18,65

Tableau 69 : Tableau des gains actualisés sur la durée de vie économique de l'investissement menuiserie PVC.

La lecture de ce tableau met en évidence la durée nécessaire pour que la VAN soit annulée (VAN = 0), c'est-à-dire 54 à 55 ans.

54 à 55 ans en temps de retour sur investissement élaboré (temps qui annule la VAN) contre 80,5 ans pour le temps de retour sur investissement « simple ». Il est donc vivement conseillé de raisonner en « temps de retour sur investissement élaboré » tenant compte de l'évolution des gains générés et de l'actualisation.

Si on synthétise les données concernant les deux systèmes constructifs étudiés à savoir une menuiserie bois et une menuiserie PVC à « basse consommation d'énergie » par comparaison avec une menuiserie moins performante d'un point de vue thermique, on peut présenter le tableau suivant :

Menuiserie de base pour la comparaison	$U_w = 2,9 \text{ W/m}^2.k$	$U_w = 2,9 \text{ W/m}^2.k$
Menuiseries étudiées	Menuiserie Bois $U_w = 1,44 \text{ W/m}^2.k$	Menuiserie PVC $U_w = 1,53 \text{ W/m}^2.k$
Investissement initial (coût global non actualisé, HT hors main d'œuvre, crédit d'impôt déduit), ramené au m^2 d'UF.	353 €	285 €
Gains annuels (économies d'énergie)	3,77 €	3,54 €
Temps de retour sur investissement simple	93,63 ans	80,5 ans
Temps de retour sur investissement élaboré	59 ans	54 ans

Tableau 70 : Synthèse des gains annuels et temps de retour sur investissements simples et élaborés pour les deux systèmes d'isolation des parois vitrées étudiés.

Notre analyse est la suivante : la simple pondération technique thermique des différents critères de différenciation entre une menuiserie bois relevant de l'éco-construction et une menuiserie PVC relevant de la construction conventionnelle n'est pas suffisante pour éco-différencier les systèmes constructifs.

A performance technique thermique identique, la menuiserie PVC bénéficie même de temps de retour sur investissement simples et élaborés plus intéressants que pour la menuiserie bois : 80,5 ans et 54 ans, contre 93 et 59 ans.

Dans les deux cas et compte tenu des hypothèses de travail de départ pourtant en phase avec le contexte actuel (taux d'actualisation et inflation des cours de l'énergie), les temps de retour sont incompatibles avec la durée de vie économique des investissements équivalents aux durées de vies typiques des systèmes installés, 30 ans.

Des systèmes constructifs de type « menuiseries extérieures » performantes à haut pouvoir isolant (ITR) sont néanmoins importants pour la contribution à l'obtention d'un bâtiment basse consommation d'énergie (BBC). Mais prises individuellement, les économies d'énergie générées par les deux systèmes constructifs sont insuffisantes et/ou trop proches pour :

- légitimer une décision d'investissement uniquement sur ce critère, et sa traduction en € économisés par an,
- différencier sur la base de ce critère, les performances de la menuiserie bois et de la menuiserie PVC et les convertir en € économisés ou bénéfiques, pouvant apparaître dans un ratio coûts / bénéfiques.

3.5.3 Pondération par les prescriptions des réglementations thermiques existantes

La réglementation thermique de base régissant les règles de construction pour les bâtiments neufs et/ou à rénover en France en matière de performances thermiques minimales est la réglementation thermique « RT » réévaluée tous les 5 ans.

Nous n'isolons en France les maisons que depuis les années 1974 ; avant cette date et le premier choc pétrolier, les économies d'énergies n'étaient pas d'actualité.

Chaque évolution des réglementations thermiques s'est accompagnée d'une diminution des seuils maxima autorisés de consommation d'énergie, exprimés en kwh d'énergie primaire par m² de surface habitable.

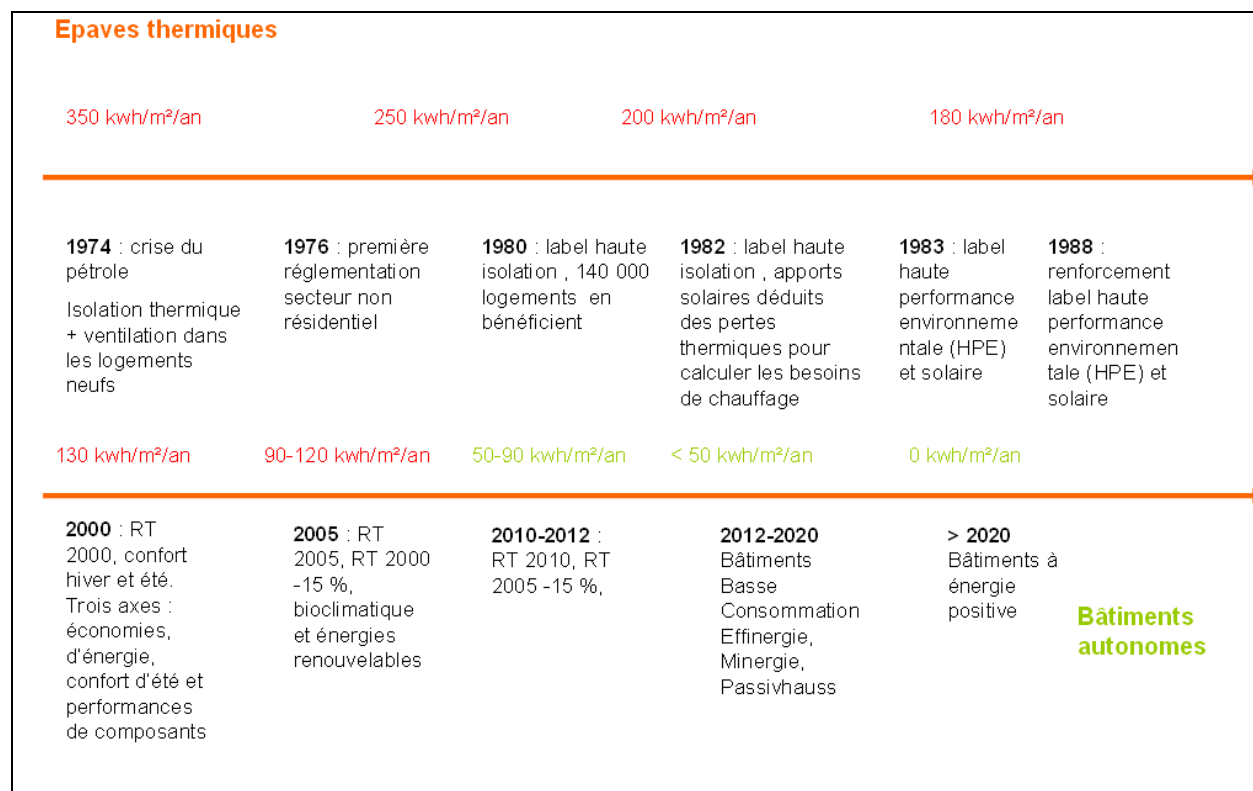


Figure 37 : Synthèse des évolutions des réglementations thermiques françaises depuis les années 1970 : niveaux de performances et thématiques associées.

Il est possible d'atteindre les niveaux de performance recherchés en appliquant :

- les règles de calcul de la consommation conventionnelle d'énergie,

Ce sont les règles TH-C et TH-E pour « *calcul des consommations d'énergie dans le bâtiment* » et « *calcul des températures pour le confort d'été* », dont les algorithmes sont annexés à l'arrêté "caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments".

Le Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement met ces modèles à la disposition des professionnels sous forme de logiciels libres de manière à donner les mêmes instruments à l'ensemble de l'ingénierie française et à favoriser une bonne application de la réglementation.

Les éditeurs de logiciels prennent en charge la réalisation des interfaces répondant aux besoins des industriels, concepteurs et bureaux d'études thermiques.

Le CSTB et l'Ecole des Mines de Paris modélisent depuis un an les consommations de climatisation.

Ces outils doivent aider les professionnels à déterminer les solutions les plus appropriées pour chaque type de bâtiment.

- les solutions techniques plus « vulgarisées »

Les constructeurs peuvent se référer à des solutions techniques attachées à des familles de bâtiments définies par leur destination et leurs principes constructifs et architecturaux (petit gymnase en bois, locaux scolaires, maisons individuelles en maçonnerie...).

Chaque solution technique indique les combinaisons de produits et d'équipements, repérés par leurs caractéristiques thermiques fournies par l'étiquetage ou le fabricant, qui garantissent le respect de la consommation d'énergie de référence et du confort d'été fixés par la réglementation.

Le Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement (Direction Générale de l'Urbanisme de l'Habitat et de la Construction) a produit notamment une solution technique applicable aux maisons individuelles. [DGUHC, 2001].

Les différents ouvrages et équipements se voient attribuer des points en fonction de leurs caractéristiques thermiques. Le constructeur vérifie que l'addition des points correspondant aux produits et équipements choisis atteint un montant total autorisé. En deçà, il devra parvenir au résultat en ajustant ses choix par itérations successives.



Figure 38 : Exemple de points attribués en fonction des performances thermiques globales de matériaux d'isolation des parois vitrées (menuiseries extérieures) pour l'application de la RT 2000. [DGUHC, 2001].

Industriels, constructeurs ou concepteurs peuvent élaborer leurs propres solutions techniques mais elles doivent recevoir, au préalable, l'agrément du Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement pour que leur application ait valeur de respect de la réglementation thermique en vigueur.

Pour revenir aux systèmes constructifs étudiés, ie une menuiserie extérieure en bois PEFC double vitrage ITR et une menuiserie PVC double vitrage ITR, par comparaison à une menuiserie base « ACOTHERM Th 5 », la pondération de leurs performances par l'évolution des valeurs seuils des réglementations thermiques est difficile à réaliser en prenant en compte les critères conventionnels de caractérisation de leur performance thermique : le coefficient U_w de déperditions surfaciques.

Les autres critères associées à la certification ACOTHERM « Air / Eau / Vent » ne pondèrent pas plus facilement les menuiseries étudiées, notamment quant à leur rattachement au champ de l'éco-construction et à la définition proposée d'un éco-matériau.

Le dernier critère thermique qui caractérise la performance des matériaux d'isolation de parois vitrées est le facteur solaire qui représente la proportion de l'énergie solaire entrant

à l'intérieur d'un bâtiment, comparée avec l'énergie reçue à l'extérieur de la paroi vitrée. Idéalement, ce facteur solaire doit être élevé en hiver pour que le bâtiment puisse bénéficier des apports solaires et bas en été pour que le bâtiment puisse être protégé des surchauffes.

Ce facteur solaire varie considérablement en fonction des types de vitrages utilisés :

Type de vitrage	Coefficient K W/m ² .K	Transparence %	Facteur solaire %
Verre claire			
Simple vitrage, 4 mm	6.0	88	83
Double vitrage à lame d'air (4-12-4)	3.0	80	76
Double vitrage avec traitement de surface "low E" à lame d'Argon (4-12-4)	1.5	77	65
Triple vitrage à lame d'air (4-12-4-12-4)	2.0	72	67
Triple vitrage avec traitement de surface "low E" à lame d'Argon	1.2	70	60
Double vitrage à vide avec traitement de surface "low E" (4-12-4)	0.5	77	65
Verre réfléchissant			
Double vitrage moyennement réfléchissant avec traitement de surface "low E" (6-12-6)	1.6	29	39
Double vitrage, Bronze avec traitement de surface "low E" (6-12-6)	1.6	9	13

Tableau 71 : Tableau comparatif des facteurs solaires de différents vitrages utilisés dans les menuiseries extérieures. [OUTILS SOLAIRES, 2008]¹

Un simple vitrage ne freine que 17 % de l'énergie solaire reçue, un double vitrage avec traitement de surface et gaz rare « 4-12-4 » en freine 35 %.

Les menuiseries étudiées bois « PEFC ITR » et « PVC ITR » présentent les mêmes facteurs solaires, la pondération par la simple réglementation thermique n'est pas ici différenciante.

3.5.4 Pondération par les systèmes de management de la qualité environnementale dans la construction et les référentiels de certification basse énergie

Un autre essai de pondération peut être proposé par la prise en compte des SMQE et/ou référentiels de certification « basse énergie » développés et synthétisés au paragraphe 2.1 « Place et importance des matériaux de construction dans les systèmes et référentiels internationaux de management de la qualité environnementale dans la construction (MQEB) ».

Parmi les 9 étudiés, seuls 2 systèmes rendent obligatoire le recours à des matériaux et produits qualifiés d'éco-matériaux pour l'obtention des performances recherchées et 4 valorisent les caractéristiques techniques différenciantes des éco-matériaux par rapport aux matériaux plus conventionnels.

Les deux systèmes qui rendent le recours obligatoire à des éco-matériaux sont la certification Minergie Eco et l'approche de conception architecture solaire bioclimatique, tandis que les systèmes Maison Passive – Minergie – Green Building Brussel et Architecture solaire valorisent les caractéristiques techniques différenciantes.

¹ Outils solaires, www.outilssolaires.com

Le système Minergie Eco présente certes le mérite d'exister mais n'est pas suffisamment développé eu égard à celui de Minergie « classique » (10 497 selon Minergie en Suisse et depuis peu en France, 26 selon Minergie Eco et 6 selon Minergie P Eco) pour pouvoir mettre en évidence des avantages économiques ou financiers intéressants.

Les maisons Minergie classiques coûtent en général 5 à 6 % plus cher que les maisons conventionnelles, et se négocient à la revente (sondage réalisé par une banque cantonale de Zurich) environ 12 % plus cher au bout de 30 ans.

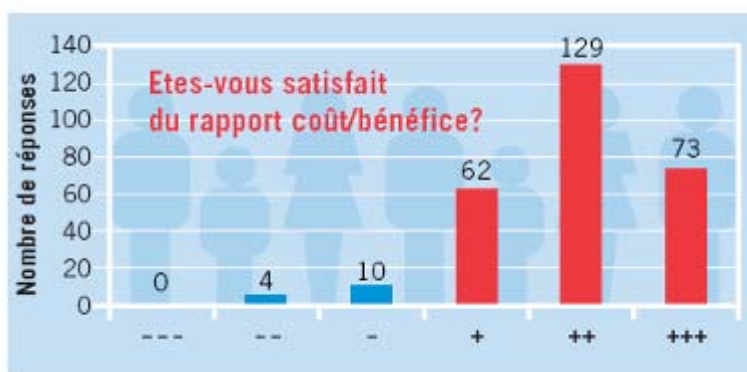


Figure 39 : Avantages du concept Minergie en Suisse et évaluation du rapport coût / bénéfice, Sources : Flyer Minergie en Questions, Mars 2007.

La satisfaction liée au rapport coût / bénéfice sur les maisons ayant développé la certification Minergie Eco n'est pas évaluée et disponible pour l'instant.

Le concept architecture solaire bioclimatique ne fait pas, quant à lui, référence à une démarche de management ou de certification officielle, il s'agit plutôt d'une logique de bon sens pour laquelle l'appréciation de la contribution de l'utilisation d'éco-matériaux est délicate à évaluer du point de vue bénéfice économique ou financier.

Enfin, les 4 systèmes valorisant le recours aux performances techniques différenciantes des éco-matériaux valorisent des performances techniques réellement différenciantes :

- les autres critères souvent méconnus en termes de performance thermique des systèmes constructifs : l'inertie séquentielle de transmission et/ou l'inertie d'accumulation restitution,
- l'hygroscopicité ou la capacité des systèmes constructifs à absorber / restituer une partie de l'humidité contenue dans l'air intérieur,
- la non dégradation des performances techniques essentielles de certains systèmes constructifs (notamment les isolants thermiques et phoniques) en cas d'humidification courte ou prolongée,
- dans une moindre mesure, les capacités d'isolement et de réduction aux bruits aériens et solidiens, plus importantes pour certains matériaux renouvelables que pour d'autres matériaux conventionnels (liège expansé vs polystyrène expansé).

Cette valorisation s'effectue principalement pour les systèmes de certification basse énergie par une attribution de performances thermiques et hygrométriques supplémentaire venant impacter favorablement le ratio final de consommation d'énergie ramené en kwh d'énergie primaire par m² par an.

L'utilisation, par exemple, d'un matériau présentant une classe d'inertie d'accumulation restitution plus importante qu'une autre augmente la classe d'inertie globale

de la construction (passage de la classe « inertie faible » à « inertie moyenne ») et favorise les économies d'énergie.

Cette capacité thermique est utilisée pour le calcul du facteur d'utilisation des gains solaires et internes

Elle peut être calculée en approche simplifiée en utilisant le tableau suivant :

Plancher	Plafond	Parois	Bâtiment	kJ/m ² K
lourd*	lourd	lourde	très massif	>400
-	lourd	lourde	massif	200-400
lourd	-	lourde	massif	200-400
lourd	lourd	-	massif	200-400
-	-	lourde	moyenne	100-200
-	lourd	-	moyenne	100-200
lourd	-	-	légère	50-100
-	-	-	très légère	<50

Tableau 72 : Tableau comparatif des capacités thermiques de bâtiments différents, rapportée à la surface de plancher brute, [LESOSAI 6.0].

Le comparatif entre deux matériaux de construction présentant a priori les mêmes aptitudes à la fonction, une brique de terre crue et une brique de terre cuite utilisées en remplissage d'éléments d'ossature bois (inertie d'accumulation / restitution), peut être réalisé :



Figure 40 : Déphasage thermique d'un mur de briques de terre crue en remplissage d'éléments d'ossature bois.

type	épaisseur	diffusivité thermique en m ² /h	déphasage (en heure)	vitesse de propagation de l'onde en cm/h
brique de terre cuite	0,11	0,0014	4,06	2,71
	0,22	0,0014	8,11	2,71



4,06 heures

8,11 heures

Figure 41 : Déphasage thermique d'un mur de briques de terre cuite en remplissage d'éléments d'ossature bois.

Pour une épaisseur de 11 cm, la terre crue non cuite favorise un déphasage de 5 heures contre 4,06 pour la terre cuite, ce qui représente potentiellement des économies d'énergies intéressantes (1 heure de chauffage en moins) restant à quantifier : kwh économisés, types de chauffage, degrés jours de la zone étudiée, coût du chauffage utilisé, bénéfices dégagés (coûts des kwh économisés).

Pour revenir aux systèmes constructifs étudiés, les menuiseries « Bois PEFC ITR » et « PVC ITR », aucune n'est concernée par les performances techniques réellement différenciantes listées.

La pondération par les SMQE et/ou plutôt les systèmes de certification basse énergie pour les systèmes constructifs menuiseries extérieures est donc inappropriée (elle l'est pour d'autres matériaux ou produits).

3.5.5 Pondération par les utilisateurs finaux¹ qui utilisent les systèmes constructifs étudiés et assurés pour leur mise en œuvre (pondération 4)

Les utilisateurs finaux ont également un avis plus qu'intéressant sur la durabilité effective de matériaux et produits de construction.

Les ressources disponibles présentant des avis sur les systèmes constructifs étudiés, menuiserie bois ITR et menuiserie PVC ITR, et considérés comme statistiquement représentatifs puisque prononcés par des professionnels du bâtiment, sont relativement peu nombreuses :

La première présente des données issues d'un séminaire de recherches en économie forestière en France, réalisé à l'ECOFOR de Paris en octobre 2006 [Costa & Garcia & Ibanez, 2006]¹⁰³. La question de l'article était de connaître les déterminants dans le choix des matériaux bois ou PVC pour les consommateurs.

¹ Utilisateurs finaux : artisans et entreprises de construction de maisons individuelles, mais également particuliers.

Les caractéristiques techniques sont parfaitement évaluées par les consommateurs (connaissances techniques exhaustives), les consommateurs donnent d'ailleurs une valeur à chaque caractéristique du bien mais le poids et l'importance des caractéristiques, notamment le prix, ne sont ni introduits, ni expliqués.

968 consommateurs représentatifs de la population en 2003 furent questionnés quant à leurs goûts, attitudes, croyances et perceptions sur les menuiseries bois ou PVC.

Les résultats issus du sondage sont les suivants :

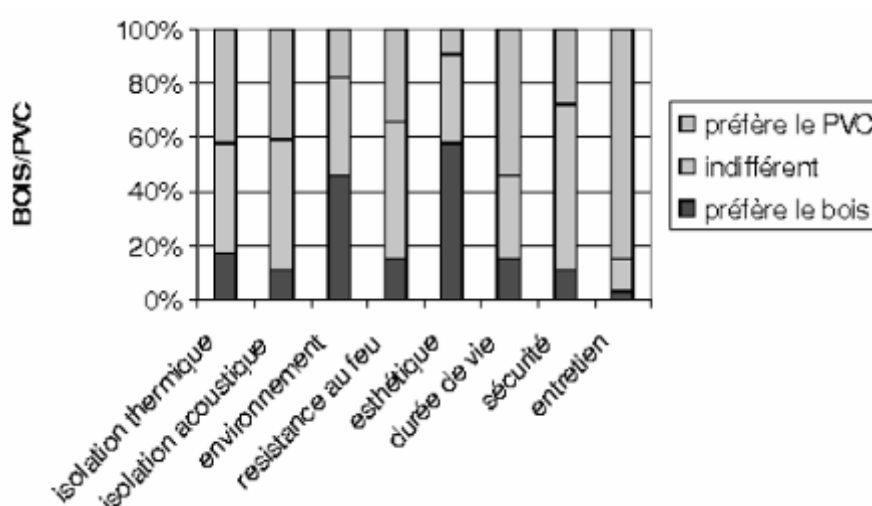


Figure 42 : Croyances sur les caractéristiques des fenêtres bois et PVC, Sources : ECOFOR 2006.

L'analyse des résultats montre que les menuiseries bois sont privilégiées pour leurs qualités esthétiques (58 %), leur impact environnemental favorable (45 %) et leur pouvoir d'isolation thermique (18 %) tandis que les fenêtres PVC sont recherchées pour la facilité d'entretien (90 %), leur durée de vie estimée (58 %) et leur pouvoir d'isolation thermique et acoustique (40 % respectivement).

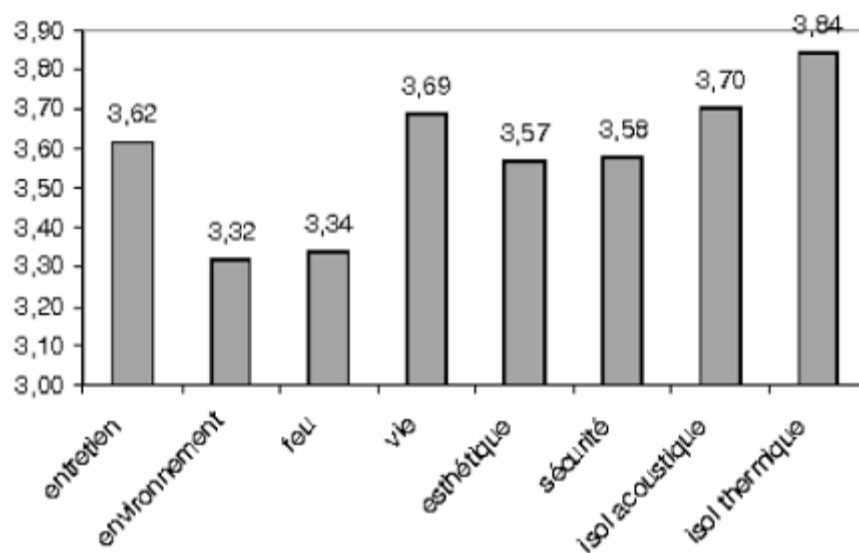


Figure 43 : Poids accordé aux caractéristiques des fenêtres bois et PVC, sources : ECOFOR 2006.

L'analyse des résultats de la figure 43 montre qu'un poids prépondérant dans le processus de choix d'une menuiserie est accordé à l'isolation thermique, l'isolation acoustique et la durée de vie.

Vient ensuite l'entretien, l'esthétique et la sécurité, enfin la résistance au feu et en dernier l'impact environnemental.

Même si les préjugés concernant l'impact environnemental de fenêtres en bois sont bons (analyse 1), les caractéristiques environnementales dans le poids d'un processus de choix d'une menuiserie viennent en dernière position. Les aptitudes techniques supplantent largement le critère environnemental.

Cette analyse explique simplement le positionnement et les parts de marché des menuiseries PVC en France aujourd'hui [BATIM ETUDES, 2007]¹⁰⁴: Sur 12,5 millions de fenêtres vendues en France en 2006, le PVC représente 70 % soit environ 8,75 millions d'unités. Les fenêtres bois représentent, quant à elles, 15 %. Le marché de la rénovation représente 70 % des volumes enregistrés dont 49 % pour les seules maisons individuelles. Ceci étant, la durée de vie typique des deux systèmes constructifs étudiés est évaluée à 30 ans dans les FDES « menuiseries » disponibles sur la base INIES.

Cela signifie qu'au bout de 30 ans d'utilisation, les menuiseries doivent être changées et remplacées par des nouvelles, bois ou PVC.

Le PVC est choisi par les consommateurs (croyances et poids accordé par les consommateurs finaux) pour notamment ses bonnes aptitudes en terme de durée de vie et de facilité d'entretien (figure 43).

Pour autant, une compagnie d'assurance française refuse d'assurer les nouveaux artisans pour la mise en œuvre de menuiseries PVC. La plupart des fabricants de menuiseries PVC les garantissent à 15 ans.

Un seul fabricant fournit des fenêtres pour une durée de vie de 140 ans (Tryba).

Selon cet assureur, « *Le PVC est un dérivé de plastique, avec 80 kg de double vitrage, notamment en été, la fenêtre se déforme et se voile, laissant passer en haut et en bas le froid ou le chaud et surtout le bruit* ».

L'Agence Qualité Construction (AQC) constate également un taux élevé de sinistres dû aux menuiseries PVC « *Au niveau des charnières (fixation des gonds dans la fenêtre) avec le poids et la force des ouvertures et fermetures successives, il se produit une ovalisation du PVC qui est empirique. L'ovalisation de la charnière dans le PVC engendre un affaissement de la fenêtre.* »

Une étude récente sur les comparatifs de prix (prix de vente) menée auprès de 60 professionnels de l'éco-construction du Nord Pas de Calais Picardie permet d'appréhender, lorsque la question de la durabilité des menuiseries extérieures est évoquée, une durabilité « ressentie » vérifiée ou non (avec ou sans constatations) moindre pour les menuiseries PVC que pour les menuiseries bois de dernière génération (postérieures à 2005, utilisation de faibles sections de bois pin lamellé collé).

La limite de garantie des menuiseries PVC classiques (15 ans) est évoquée pour l'estimation du taux de renouvellement sur la durée de vie typique du système constructif « menuiserie + précadre + étanchéité du bâti ».

Selon ces constatations et retours d'expériences, un taux de renouvellement de 2 fois peut être avancé sans trop de risques pour qualifier le renouvellement des menuiseries PVC de qualité normale sur la DVT du système constructif global.

Enfin, on peut synthétiser un tableau pour représenter les avantages et inconvénients des systèmes menuiseries bois et PVC perçus par les professionnels du bâtiment impliqués de

près ou de loin dans les démarches d'éco-construction mais surtout impliqués dans les démarches de performance énergétique et de basse consommation d'énergie dans la construction :

		Bois	PVC
Performance	Isolation thermique	La meilleure	Excellentes et suffisantes pour la plupart des cas
	Isolation acoustique		
	Durabilité	Très bonne si la qualité est bonne	
Prix		Un peu plus cher, mais les prix baissent	Le plus économique
Esthétique		Matériau le plus noble ! Toutes les couleurs, formes, détails ...	Moins noble que le bois ou l'alu.
Entretien		Une couche de lasure/peinture tous les 10 ans	Aucun
Protection environnement		Produit naturel, noble et recyclable	Moins écologique qu'on le dit !
Divers		Grande taille possible avec lamelé-collé (baie vitrée)	Pas adapté aux grands formats

Tableau 73 : Tableau comparatif des avantages / inconvénients des menuiseries Bois et PVC perçus par les professionnels du bâtiment [CD2E, 2008].

L'analyse de ce tableau montre que les caractéristiques d'isolation thermique sont jugées bonnes pour les deux menuiseries et que la durabilité est a priori équivalente. L'esthétique est considérée plus noble pour les menuiseries valorisant le bois. Concernant l'impact environnemental, déconnecté des performances thermiques, le matériau PVC est jugé beaucoup moins écologique que le bois.

L'organisme suisse ECO-Bau précise dans sa fiche technique « Eco-devis : Menuiseries » que « *pour des fenêtres avec cadres en matières synthétiques, les composants éco-déterminants sont avant tout les stabilisateurs choisis, en Europe ces systèmes sont quasi exclusivement à base de plomb (Pb) ou calcium zinc (CaZn). Les stabilisateurs à base de plomb Pb sont toxiques à cause de la présence de plomb, ils ne sont pas repris dans les Eco-devis* »¹

Si on considère un taux de remplacement des menuiseries PVC ITR deux fois plus important que pour une menuiserie Bois PEFC ITR, cela signifie que le coût d'une menuiserie PVC ramené à l'unité fonctionnelle UF, doit donc comprendre les coûts de maintenance tels que détaillés précédemment (paragraphe 3.4.3).

Les coûts de maintenance comprennent le démantèlement de l'ancienne menuiserie, la pose et la fourniture d'une nouvelle menuiserie et la réalisation des étanchéités, soit un montant de 510,19 € HT pour l'unité fonctionnelle, prix de vente main d'œuvre et fourniture matériel hors crédit d'impôt puisque celui-ci ne s'applique plus.

- Le coût global de l'investissement menuiserie PVC ITR sur 30 ans comprenant
- deux mises en œuvre de menuiseries PVC,
 - deux fournitures matériel et deux réalisations d'étanchéité,
 - ainsi qu'un démantèlement / réfection.

¹ Eco-devis : menuiseries, voir www.eco-bau.ch/francais/files/ed371F.pdf

est donc de : 318,60 € HT/UF (avec déduction crédit d'impôt) + 510,19 € HT/UF = 828,79 € HT pour 1 Unité fonctionnelle (fenêtre de 114x80 cm), ramené à 1 m² de menuiserie : 900, 85 € HT.

Ce montant peut donc être indiqué en remplacement du montant d'investissement présenté au paragraphe 3.5.2 : 285 € HT/m².

La valeur actuelle nette de ce nouvel investissement devient positive au bout de la 110^{ème} année, en prenant les mêmes paramètres et hypothèses de calcul :

- taux d'actualisation des valeurs monétaires : 4,6 %
- inflation annuelle du coût de l'énergie : 6 %

Le taux de retour sur investissement élaboré (TRE) de la menuiserie PVC non actualisée était précédemment de 54 ans (paragraphe 3.5.2), il est désormais de 110 ans pour le système menuiserie actualisé, c'est-à-dire avec prise en compte de sa durabilité technique et de son taux de renouvellement sur la durée de vie typique étudiée (30 ans).

La menuiserie bois actualisée présente, quant à elle, un temps de retour sur investissement élaboré de 65 ans.

3.5.6 Deux indicateurs environnementaux simplifiés : le traitement des déchets en fin de vie (pondération 5) et son coût associé, et les émissions carbone équivalent liées aux émissions de gaz à effet de serre (GES) (pondération 6),

Les caractérisations environnementales précédemment réalisées nous ont permis de qualifier et quantifier certains critères environnementaux des systèmes constructifs étudiés, considérés comme les plus significatifs pour notre étude. (paragraphe 3.4.2).

Les performances liées à deux critères (recyclabilité, traitement des déchets / élimination et émissions carbone) peuvent être traduites en coûts économiques :

- les coûts d'élimination des déchets en fin de vie,
- et le coût équivalent aux émissions de gaz à effet de serre générés dans l'atmosphère lors du processus de fabrication, jusqu'à la mise sur le marché du produit.

3.5.6.1 Traitement des déchets en fin de vie et coûts associés

Il est possible de comparer les deux filières de traitement des déchets bois et PVC :

- **Pour les déchets PVC issus de la fabrication ou du traitement des menuiseries PVC en fin de vie**

La filière du PVC est particulièrement intéressante : un livre vert [CEE, 2000]¹⁰⁵ sur les problèmes environnementaux générés par la production, l'utilisation et la mise en décharge du PVC a été adopté par la Commission Européenne le 26 juillet 2000.

Le Livre Vert expose les conclusions de 5 études commandées entre 1998 et 2000 et présente des propositions de mesures pour répondre aux divers problèmes posés par le PVC.

Ce document donne également les principales conclusions sur cette filière :

- Déchets en augmentation :

En ce qui concerne les déchets de PVC, Il est prévu que les quantités de déchets de PVC doivent augmenter de plus de 80% sur les 20 prochaines années, de 4,1 à 7,2 millions de tonnes / an. Presque 90% de ces déchets sont des déchets post-consommation.

- Incinération :

L'incinération d'1 kg de PVC dans l'UE génère une moyenne de 0,8 à 1,4 kg de déchets dangereux (dans les incinérateurs avec procédé sec de traitement des fumées) et 0,4 à 0,9 kg de résidus dans les effluents liquides (dans les incinérateurs avec procédé humide de traitement des fumées).

Les déchets dangereux issus de l'incinération du PVC sont mieux à même de contaminer l'environnement, puisque le PVC augmente significativement la quantité de sels lixiviables dans ces déchets.

L'incinération du PVC génère des coûts additionnels de 20 à 335 € / tonne. Le PVC est responsable de 38 à 66 % du contenu en chlore des déchets solides municipaux. La formation de dioxines due au PVC n'a pas été étudiée.

Détourner le PVC de l'incinération conduit toujours à des améliorations environnementales. Néanmoins, l'incinération du PVC devrait augmenter au-delà d'un facteur cinq sur les 20 prochaines années dans un scénario « BAS » (business as usual), des actuels 0,5 millions de tonnes/an jusqu'à 2,6 - 2,9 millions de tonnes / an.

- Mise en décharge :

L'enfouissement du PVC conduit au relargage des plastifiants toxiques. Celui des stabilisants ne peut-être exclus. Ces relargages se produiront sur une très longue période plus longue que la protection garantie par la géomembrane de la décharge. Les déchets de PVC contribueront toujours plus à la formation de dioxines et de furanes dans les feux de décharge.

- Recyclage :

Il ressort que le recyclage ne permettra pas de contribuer significativement à la gestion des déchets de PVC dans les prochaines décennies, atteignant tout au plus 18% de l'ensemble des déchets en 2020.

Dans l'hypothèse où ce potentiel maximal de recyclage du PVC serait atteint, l'incinération du PVC augmenterait tout de même d'un facteur quatre jusqu'à atteindre 2.2-2.5 millions de tonnes en 2020.

Les taux de recyclage actuels sont en dessous de 3%. L'essentiel de ce recyclage (2%) est un recyclage « downcycling » - qui aboutit à des produits de valeur inférieure qui ne remplace pas le PVC vierge – et par conséquent, le bénéfice environnemental est nul. La plupart des déchets de PVC contiennent des additifs dangereux. Recycler ces déchets conduit ainsi à distribuer ces substances dangereuses dans de nouveaux produits.

On estime que le recyclage de haute qualité des déchets de PVC sans dissémination de plomb, de cadmium ou de PCB dans les recyclas pourrait atteindre un maximum de 5% en 2020. Le recyclage par voie chimique ne serait pas viable économiquement.

Le livret blanc montre ainsi les multiples problèmes environnementaux et/ou économiques que pose chaque option d'élimination des déchets de PVC : ni l'enfouissement, ni l'incinération ne sont des solutions durables et sûres et le recyclage ne peut, lui non plus, résoudre le problème.

Une des pistes les plus raisonnables consisterait à arrêter purement et simplement la production d'un tel matériau « coûteux » pour les hommes et l'environnement, notamment pour ses applications de courte durée comme les emballages. Les déchets existants devraient être séparés du flux général de déchets et stockés jusqu'à ce qu'une technologie de destruction environnementalement sûre soit inventée.

Les coûts devraient être pris en charge par le producteur.

Pour les menuiseries PVC, la FDES disponible sur la filière, proposée par le Syndicat National de l'Extrusion Plastique et l'Union Fenêtres Pvc composites, indique dans la partie « production de déchets » :

- la prise en compte des taux de collecte et de valorisation actuels de 15 % des fenêtres PVC en fin de vie,
 - la non prise en compte des potentialités futures (souhait de 80 % des fenêtres triées et recyclées d'ici à 30 ans, par l'organisme PVC recyclage SARL¹,
 - la supposition que la majorité des déchets de PVC, vitrage et acier issus de la fabrication ou de la fin de vie des fenêtres PVC sont non collectés et finissent en décharge,
- **Pour les déchets bois issus de la fabrication ou du traitement des menuiseries bois en fin de vie**

En ce qui concerne la filière des déchets bois, les bois de rebut correspondent à des produits en bois en fin de vie ou usagés. Ils se répartissent en plusieurs catégories : bois issus des chantiers de démolition, déchets bois industriels, meubles et objets divers, emballages (palettes, cagettes, caisses...).

Ces produits proviennent des industries (automobile, électroménager...), des centres de tri de DIB (déchets industriels banals) ou des déchetteries (particuliers...).

On distingue 2 types de bois de rebut :

- **les bois de rebut non souillés** qui peuvent être utilisés dans des chaufferies bois (palettes, cagettes, planches, bois de coffrage, caisses, cageots, ...),
- **et les bois de rebut souillés** ou les bois traités qui doivent être considérés comme des DIS et suivre les filières agréées de traitement (traverses de chemin de fer, panneaux de particules, bois agglomérés, poteaux EDF, ...).

Une fois triés, les objets en bois peuvent être soit réparés (meubles, palettes multirotations), puis réemployés, soit utilisés comme matières premières (usines de panneaux de particules) soit consommés comme combustibles bois dans des chaudières.

Seuls les bois non-souillés peuvent être utilisés comme combustible pour chaufferie bois.

Le processus nécessite un conditionnement spécifique pour fabriquer du combustible à partir de bois de rebut : pré-broyage grossier, broyage fin (les broyeurs sont à cisaille ou à

¹ PVC recyclage SARL, voir www.pvcrecyclage.fr/presentation.html

marteau), dé ferrailage, voire dé métallisation et criblage. Les broyats de rebut sont un produit sec mais relativement grossier utilisable comme combustible.

Contrairement aux idées reçues, la valorisation des déchets du bois a un coût, principalement dû à la préparation du déchet avant sa valorisation : broyage, tri, etc.

Le coût du conditionnement varie entre 15 et 45 € la tonne et le coût du transport varie entre 10 et 15 € la tonne. L'utilisation des bois de rebut peut se faire dans des grosses chaudières avec foyer à grilles, chaudières co-combustion avec foyer à lit fluidisé et les usines d'incinération.

Le recyclage du bois traité, notamment peint, est, au contraire, complexe.

La circulaire 95/08 du 5 janvier 1995, relative aux prescriptions applicables aux installations de combustion incinérant des déchets, restreint les déchets issus du broyage du bois peint. Ainsi, seuls les déchets de biomasse non souillés peuvent être utilisés comme déchets de combustion de substitution dans des installations telles que les chaufferies.

Cette circulaire exclut tout déchet imprégné ou revêtu d'une substance quelconque c'est-à-dire enduit, peint, imprimé, collé ou traité d'une quelconque manière.

Les déchets de bois collés et peints des menuiseries bois relèvent donc des installations d'incinération des déchets ménagers et assimilés. Le coût de traitement est alors plus élevé, de l'ordre de 80 € HT au minimum la tonne en Nord Pas de Calais par exemple [ADEME, 2003]¹⁰⁶.

Après tri sur chantier, les solutions suivantes seront envisageables pour le traitement du bois peint :

- incinération en installation classée,
- mise en décharge,
- récupération pour broyage et valorisation énergétique en chaufferie industrielle. Pour être en accord avec la législation, il faut alors procéder à un décapage. Une autre possibilité consiste à "diluer" les copeaux de bois traités dans un autre combustible considéré comme non souillé.

Il est alors nécessaire de connaître la composition chimique de la peinture mais aussi des émanations gazeuses lors de la combustion : ce travail peut être confié à un laboratoire.

- certaines astuces de chantier (réutilisation des portes comme tables,...) mais ne sont cependant pas généralisables.

Les études menées depuis dix ans par différents organismes tels que l'ADEME, CdF (Charbonnages de France), le CTBA ou le CSTB, estiment à 4 000 000 de tonnes les quantités de déchets de bois souillés rebutés en France chaque année, dont 1 500 000 Tonnes de déchets de bois d'emballage et 2 300 000 tonnes de déchets de bois de chantiers. Ces chiffres n'incluent pas les 2 000 000 tonnes de déchets annuels de panneaux de particules souillés par les colles.

La catégorie des bois de chantiers comporte pour les trois quarts des bois dits « souillés » par des traitements, des colles ou des peintures et de ce fait, selon la législation en vigueur, ceux ci sont impropres à la combustion en chaudières de « Bois-Energie » ou à la « cogénération ». Ne pouvant pas être mis en décharge non plus, l'incinération contrôlée est la seule solution possible.

Cependant, du fait de leur niveau de contamination, une partie de ces bois entre d'ores et déjà dans la catégorie des Déchets industriels dangereux. Dans ce cas, l'incinération dans des centres spécialisés est le seul moyen d'élimination réglementaire de ces déchets (coût minimum : 225 € la Tonne).

Les quantités actuellement répertoriées en France comme déchets de bois classés DID, sont de 400 000 Tonnes par an. La moitié de ces déchets de bois DID correspond aux institutionnels.

Ces quantités vont aller en augmentant au fur et à mesure de l'évolution des mentalités et de la mise en application de la réglementation.

L'évolution de ce marché dépend aussi de la mise en place d'un système de collecte.

En conclusion, pour les deux filières de traitement des déchets bois et pvc issus de la fabrication ou de la fin de vie des menuiseries, compte tenu de l'état de maturité des filières en France (tableau 45), on peut considérer que la majorité de ces déchets PVC ou bois est traité en centre de stockage ou décharge.

Les enjeux économiques associés à ces filières de traitement des déchets du bâtiment peuvent être évalués : le coût moyen d'élimination des déchets du bâtiment est évalué entre 0,5 et 7 % du montant des lots suivant leur nature.

Ces coûts dépendent bien sûr de plusieurs facteurs :

- de la main d'œuvre nécessaire pour effectuer le tri,
- des installations spécifiques de chantiers,
- de l'effet d'échelle lié directement à la quantité de déchets à éliminer,
- du montant de l'élimination des déchets proprement dite,
- et du transport des déchets en fonction de l'éloignement des centres d'élimination.

Généralement, le coût de traitement des déchets est réputé rémunéré dans le prix du marché, public ou privé. Il est souvent intégré dans le compte prorata.

Le coût* d'évacuation des déchets peut s'établir en fonction du tri opéré ou non par l'entrepreneur.

	Tri des déchets		Non tri des déchets
Déchets dangereux	Classe I 230 à 430 € HT la tonne	Et/ou centres de traitement préalable 230 à 1200 € HT la tonne	Centre de tri : 90 à 110 € HT la tonne
Déchets inertes	CET III 1 à 8 € HT la tonne		
Déchets industriels banaux (DIB)	Centres incinération 45 à 122 € HT la tonne	CET II 45 à 76 € HT la tonne	

Tableau 74 : Tableau comparatif des coûts de traitement des déchets de chantier, en fonction de l'implication « tri » de l'entrepreneur. Synthèse selon [FLORIO, 2003]¹⁰⁷.

*Prix hors tri et transport

L'essentiel dans l'histoire de l'évacuation de ces déchets, est que l'entrepreneur se fasse payer les coûts engagés pour l'élimination de ces déchets, Une solution peut être d'individualiser, à l'intérieur de chaque lot le coût de l'élimination des déchets.

Pour des ratios quantitatifs et économiques plus précis, un bilan réalisé par l'ADEME sur 24 opérations de travaux de logements neufs ayant pratiqué la gestion sélective des déchets a permis de mettre en évidence les ratios suivants :

Catégorie de tri	Production kg/m ² SHOB
INERTES	Logements : 13,50
MÉTAUX	Logements collectifs : 0,45 Logements individuels : pas ou peu de métaux
BOIS	Logements : 1,30
DIB en mélange	Logements : 5,70 Logements individuels : 7,70
PLÂTRE	Cloisons/doublage : 2,30
EMBALLAGES	Logements : 0,25

Figure 44 : Quantité de déchets produits par catégorie, en fonction du type de bâtiment et ramenée au m² de SHOB, [ADEME, 2006]

Le PVC est considéré comme un Déchet Industriel Banal, produit à hauteur de 7,70 kg / m² de SHOB en logement individuel ; le bois est produit, quant à lui, à hauteur de 1,30 kg/m² de SHOB.

Nous ne travaillons pas dans le cadre de notre comparaison de systèmes constructifs « menuiserie pvc » et « menuiserie bois », sur un ouvrage global type bâtiment, donc sur une surface hors œuvre nette de référence.

Nous proposons donc de prendre en base de calcul les ratios fournis par les FDES de la base de données de référence « INIES » :

- 2860 g de PVC générés pour toute la durée de vie d'une menuiserie type PVC, soit 2,860 kg
- 22400 g de biomasse générés pour toute la durée de vie d'une menuiserie type bois, soit 22,4 kg.

En s'intéressant exclusivement à la part des déchets générés en fin de vie des menuiseries, donc en fin de DVT, on obtient :

- 13,5 kg de déchets inertes (sur toute la DVT) et 7,98 kg de déchets non dangereux pour la menuiserie bois.
- 24,6 kg de déchets inertes (sur toute la DVT) pour la menuiserie PVC.

Considérons la situation la moins favorable, c'est-à-dire l'entrepreneur ne trie pas ses déchets sur le chantier de déconstruction, les déchets mélangés sont donc orientés vers un centre de tri et y sont traités pour un coût moyen de 90 à 100 € HT la tonne. Les coûts associés au traitement des déchets issus de ces deux menuiseries sont les suivants :

	Production de déchets sur la DVT, en fin de vie		Coûts de traitement des déchets non triés	Coût de traitement des déchets correspondant
	Déchets inertes	Déchets non dangereux		
Menuiserie bois	13,5 kg	7,98 kg	95 € HT la tonne	2,04 € HT
Menuiserie PVC	24,6 kg	NC	95 € HT la tonne	2,33 € HT

Tableau 75 : Tableau comparatif des coûts de traitement des déchets de menuiseries bois et PVC en fin de vie. [INIES, 2007].

Une menuiserie bois génère donc un coût de 2,04 € HT en fin de vie pour le traitement des déchets non triés, une menuiserie PVC génère quant à elle un coût de 2,33 € HT en fin de vie pour le traitement des déchets non triés. La différence est de 0,29 € HT, considérée comme négligeable.

A l'échelle d'un matériau ou petit système constructif type menuiserie extérieure, les coûts de traitement des déchets générés en fin de vie par le démantèlement ou la déconstruction, peuvent être considérés comme négligeables.

La pondération des critères techniques, économiques et financiers initiaux est réalisable par la prise en considération du critère « traitement des déchets en fin de vie / coûts associés » mais non significative et donc non impactante pour la différenciation des systèmes menuiseries extérieures seules.

3.5.6.2 Emissions de gaz à effet de serre et coûts associés

Parmi toutes les incitations, subventions, mesures pour inciter les consommateurs et les entreprises à des comportements plus vertueux en matière de protection de l'environnement, dans des domaines précis pris isolément, celles qui peuvent avoir un impact important sur l'environnement sont peu nombreuses.

En général, ce qui est économisé d'un côté est toujours transféré ailleurs.

Par exemple :

- La surface habitable par français est passée de 25 à 35 m² entre 1975 et 2000 et, en tenant compte de l'augmentation de la population pendant cet intervalle de temps, la surface totale de logements a presque doublé. De ce fait, malgré une consommation de chauffage au m² divisée par deux, la consommation globale d'énergie de chauffage en France n'a pas baissé : la meilleure isolation des logements n'a pas été affectée à une baisse de la consommation mais à une augmentation des surfaces chauffées.
- Il faut moins de kérosène qu'avant pour faire voler un avion de 300 places mais il en vole considérablement plus, car le prix du billet est devenu de plus en plus accessible.
- Les voitures sont assurément plus économes aujourd'hui qu'il y a 30 ans et le seront plus encore demain... mais le nombre de voiture sur la planète aura doublé ou triplé.
- Les réfrigérateurs d'aujourd'hui sont une merveille d'économie comparé aux monstrueuses machines polluantes qu'ils étaient dans les années 60 mais... le réfrigérateur de 150 litres a été troquée contre un autre de 350 litres, très économe, auquel on a adjoint un congélateur assurément économe (près de la moitié des ménages français en possèdent un, contre quasiment 0% en 1973), ainsi que de nombreux d'autres appareils très économes eux aussi.

Or le déterminant principal de la consommation globale d'énergie fossile n'est pas les performances des objets qui en consomment mais « *le prix de l'énergie fossile ramené au pouvoir d'achat* » [JANCOVICI, 2006]¹⁰⁸.

Ainsi, si nous « *voulons économiser volontairement l'énergie fossile, nous devons désirer une hausse de son prix en termes réels* » [JANCOVICI, 2006] et donc une taxation spécifique. Les progrès techniques pourraient être ainsi affectés à une baisse de la consommation globale d'énergie fossile.

Les défenseurs d'une taxation carbone sur les produits et les services en France sont Jean Marc JANCOVICI, Nicolas HULOT et Marcel ROBERT, qui insistent tous trois sur le fait que la taxe carbone poursuit deux objectifs de sauvegarde des hommes et de la planète :

- réduire les émissions de CO₂, gaz à effet de serre majoritaire, pour limiter les catastrophes promises par le réchauffement climatique.
- préparer en douceur la société à un épuisement progressif inéluctable, des ressources en énergies fossiles et, accessoirement, servir de tampon à l'augmentation sans doute brutale et aléatoire du prix de combustible comme l'essence dans un futur incertain mais probablement proche.

Le dioxyde de carbone est l'un des principaux gaz contribuant à renforcer l'effet de serre d'origine anthropique (55%) mais il n'est pas le seul : d'autres gaz jouent également un rôle important (méthane, oxyde nitreux...). Pour comparer le pouvoir de réchauffement global (base 1 de comparaison = CO₂) des gaz à effet de serre sur une même échelle, on traduit leur impact en « équivalent carbone ».

Les 6 gaz ou familles de gaz visées par le protocole de Kyoto sont les suivantes :

Gaz	Formule	PRG relatif / CO ₂ (à 100 ans)
Gaz carbonique	CO ₂	1
Méthane	CH ₄	25
Protoxyde d'azote	N ₂ O	298
Perfluorocarbures	C _n F _{2n+2}	7400 à 12200
Hydrofluorocarbures	C _n H _m F _p	120 à 14800
Hexafluorure de soufre	SF ₆	22800

Tableau 76 : Pouvoir de réchauffement global équivalent au CO₂ des 6 familles de gaz à effet de serre concernées par le protocole de Kyoto, [GIEC, 2007].

Ce tableau signifie que si on met 1 kg de méthane dans l'atmosphère aujourd'hui, on produira le même effet, sur le siècle, que si on émet 25 kg de gaz carbonique au même moment. On peut résumer en disant qu'un kg de méthane fait 25 fois l'effet de serre cumulé sur un siècle d'un kg de gaz carbonique ou encore que le méthane est un gaz 25 fois plus puissant que le gaz carbonique pour l'effet de serre.

Si on met par exemple 1 kg d'hexafluorure de soufre dans l'atmosphère, on "fait" 22.800 fois plus d'effet de serre cumulé sur un siècle que si on met un kg de gaz carbonique : pour l'effet de serre un kg de ce gaz "vaut" 22,8 tonnes de CO₂ c'est à dire plus que l'émission annuelle de 3 Français ! Nous n'en émettons heureusement que de toutes petites quantités pour le moment.

Le Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) est donc tout simplement l'équivalent CO₂ : il correspond au poids de CO₂ qui produira la même perturbation du système climatique que le poids du gaz considéré. Dans certaines circonstances, plutôt que de mesurer le poids de gaz carbonique, les physiciens - et souvent les ingénieurs - ont pris l'habitude d'utiliser l'équivalent carbone (eq C).

Plutôt que de comparer au poids de CO₂ émis, on compare alors au seul poids du carbone contenu dans le CO₂ émis.

Par définition [ADEME, 2003]¹⁰⁹, un kg de CO₂ vaut 0,2727 kg d'équivalent carbone, c'est à dire le poids du carbone seul dans le composé "gaz carbonique".

Pour les autres gaz, l'équivalent carbone vaut : équivalent carbone = PRG relatif x 0,2727.

Pour les principaux gaz à effet de serre, les équivalents carbone sont les suivants :

Gaz	Formule	équivalent carbone par kg émis
Gaz carbonique	CO ₂	0,273
Méthane	CH ₄	6,82
Protoxyde d'azote	N ₂ O	81,3
Perfluorocarbures	C _n F _{2n+2}	2.015 à 3.330
Hydrofluorocarbures	C _n H _m F _p	34 à 4.040
Hexafluorure de soufre	SF ₆	6.220

Tableau 77 : Equivalents carbone des principaux gaz à effet de serre retenus par le protocole de kyoto, [GIEC, 2007].

Par conséquent, une taxe carbone ne concernerait pas uniquement l'émission de dioxyde de carbone mais bien toutes les émissions de gaz à effet de serre, ramenées à l'équivalent Carbone (eq C), caractérisant les différentes étapes du cycle de vie d'un produit ou d'un service. La taxe carbone envisagée par ses défenseurs pour décourager l'émission de gaz à effet de serre utiliserait l'équivalent carbone pour fixer le niveau de la taxe selon les gaz.

Si la tonne équivalent carbone vaut 1.000 euros, alors l'émission d'une tonne de gaz carbonique sera taxée 273 euros, l'émission d'une tonne de méthane 6.820 euros, l'émission d'une tonne de protoxyde d'azote 81.300 euros, etc..

Cette taxe sur les émissions de carbone ou taxe carbone, également appelée *fiscalité carbone*, ou « *contribution climat-énergie* », ou encore « *prime d'assurance carbone* » par ses défenseurs est une proposition de taxe sur tous les combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel, etc...) avec un taux variable. Ce taux dépendrait principalement, voire exclusivement, du contenu en carbone du combustible considéré et donc notamment des émissions de dioxyde de carbone (CO₂). Cette taxe serait en augmentation douce et progressive d'année en année.

Cette mesure s'inspire des propositions faites dans les années 1920 par l'économiste libéral néoclassique Arthur Cecil Pigou [PIGOU, 1920]¹¹⁰ et peut donc être qualifiée de « taxe pigouvienne ».

La proposition a été reprise en France depuis quelques années et a envahi le débat politique par son inscription dans les cinq propositions du Pacte écologique de Nicolas Hulot [Comité de Veille Ecologique, 2006]¹¹¹.

Le gouvernement français, à travers le Grenelle de l'Environnement, a décrété la mise à l'étude de la taxe carbone ; cette taxe fait partie intégrante du Pacte écologique de Nicolas Hulot, que tous les organisations politiques importantes ont par ailleurs signé en 2007, pendant la campagne présidentielle. Récemment, lors d'une visite d'une usine de production de pompes à chaleur (CIAT) dans l'Ain, le président Français Nicolas SARKOZY a annoncé officiellement la mise en place dès 2010 d'une taxe carbone, compensée intégralement par des baisses d'impôts, et destinée à encourager les Français à consommer plus propre pour lutter contre le réchauffement climatique.

D'autres pays appliquent déjà des fiscalités s'inspirant d'une taxation carbone.

La synthèse de ces mesures peut être proposée :

Pays	dénomination	Type de mesure	Année de création	Taux et effet
Suède	Contribution tarifée	Contribution tarifée selon la quantité de combustibles non renouvelables consommée	1991	Baisse des autres taxes sur la consommation des combustibles non renouvelables (prix consommateur invariant), fortes exonération aux industries (25 à 50 % des taux)
Danemark	Taxe carbone	Taxation carbone à taux modulé selon le niveau d'émission des produits en CO2	NC	L'impôt s'applique à tous (administrations, entreprises, ménages) A et repose sur la quantité de combustibles et d'électricité consommée.
Allemagne	Taxes sur les combustibles et l'électricité	Taxes relevées (fausse taxation carbone), taux non modulé en fonction des émissions de GES, charbon non concerné.	1999	Combustibles et électricité, baisse intéressante de la consommation mais à attribuer également à la hausse du prix du baril et à la réévaluation du dollar (1999-2001).
Royaume Uni	Climate change levy	Dispositif mixte entre taxe carbone et taxe sur l'énergie. Production d'électricité nucléaire et hydraulique non exclue, énergies renouvelables et co-génération favorisées.	2001	Consommations des industries, des commerces et du secteur public, les particuliers ne sont pas concernés. (mais hausse des taxes sur les volumes d'hydrocarbures consommés de 5 à 6 % par an entre 1993 et 2000)

Tableau 78 : Proposition de synthèse des mesures des pays européens appliquant des fiscalités ressemblant de près ou de loin à la taxe carbone française.

En résumé, la **Taxe Carbone** présente ainsi le triple avantage de lutter contre les émissions de gaz à effet de serre, d'anticiper la fin des énergies fossiles et de remplir les caisses d'un état, à l'opposé de « *la mise en place de normes ou de subventions incitatives qui les vident. Bien qu'impopulaire, une taxe carbone correctement appliquée pourrait aider à réduire les émissions de gaz à effet de serre tout en contribuant au financement de notre système social, sans brider l'économie* » [HOURCADE, 2007]¹¹².

La vraie question derrière l'idée d'une taxation carbone sur les produits et services, est de savoir quel serait le montant et/ou la modulation à appliquer.

Il n'existe pas de réponse unique: un prix élevé aurait tendance à faire doubler ou d'avantage le prix instantané perçu par les consommateurs des biens et services. Un prix trop bas ne permettrait pas d'infléchir les comportements de manière compatible avec la diminution à atteindre. Un niveau de taxe élevé n'est pas insupportable si la société s'adapte en conséquence.

Une modélisation macro économique indique même que l'introduction d'une telle taxe est globalement neutre pour l'économie [Commissariat au Plan, 2002]¹¹³.

Quelques exemples destinés à fixer les idées peuvent être donnés : par corrélation avec le contenu carbone des biens et services¹, l'application d'une taxe carbone estimation haute de 1500 € la tonne de carbone impliquerait :

Domaines concernés	Surcoûts engendrés en €/an
Transport	
A pieds, vélo, RER, train électrique	0 €
Petite voiture ville (15000 km /an)	+ 1300 €
Grosse voiture ville (15 000 km /an)	+ 2500 €
Grosse voiture route (50 000 km /an)	+ 4400 €
Chauffage	
Fioul	+ 3600 €
Gaz	+ 2800 €
Electricité	
Centrales charbon	+ 10 500 €
Hydraulique	0 €
Bois	0 € ou quelques euros
Alimentation	
Bœuf et mouton	+ 12 € au kg chez le boucher
Poulet et porc	+ 1,5 € / kg
Farine	+ 0,30 € / kg
Oranges d'Espagne	+ 1 € / kg
Produits manufacturés ou services	
Ordinateur avec écran plat	+ 500 €
Voiture d'une tonne	+ 2200 €
Construction d'une maison de 100 m ²	+ 20 000 €

Tableau 79 : Simulation des augmentations de prix des biens et services liés à l'application en France d'une taxe carbone de 1500 € la tonne de carbone (400 € la tonne de CO₂).

Nous pouvons appliquer une taxation carbone aux systèmes constructifs étudiés i.e. une menuiserie bois et une menuiserie PVC en modulant selon le niveau de taxation retenu :

Le contenu carbone équivalent (kq eq C) des deux systèmes constructifs est le suivant :

- 63,6 kg eq C / m² pour une menuiserie PVC,
- et 23,5 kg eq C / m² pour une menuiserie bois.

A noter qu'une menuiserie bois, selon les données fournies par la FDES « menuiserie pin sylvestre » disponible sur INIES, n'est composée que de 50 % de bois en masse.

Le bilan carbone réalisé montre que la balance entre les prélèvements et les émissions de carbone liées à la matière « bois » est négative. Les prélèvements sont plus importants que les émissions. Le bois utilisé pour la menuiserie peut donc être considéré comme un « puits de carbone » quand il est issu de forêts gérées durablement et replantées après exploitation.

Une des conditions données par la méthode bilan carbone de l'ADEME pour considérer le bois d'œuvre comme un puits de carbone est que la durabilité de l'objet contenant le bois soit supérieure au siècle ; s'il s'agit d'un objet ayant une durée de vie limitée (menuiserie par exemple) à 20 ou 30 ans, le carbone stocké dans le bois ne séjournera que brièvement dans l'objet et sera relâché dans l'atmosphère (incinération en fin de vie).

¹ Données issues de la méthode BILAN CARBONE de l'ADEME.

Le bilan carbone de la menuiserie « bois » est pour toutes ces raisons tout de même positif mais bien inférieur (23,5 kg eq C contre 63,6) à celui d'une menuiserie PVC.

L'application d'une taxe carbone basse, moyenne et haute donne les surcoûts d'investissement suivants :

Taxe carbone	Contenu carbone eq (sur toute la DVT), sources : FDES base INIES	150 € la tonne d'eq C	400 € la tonne d'eq C	1500 € la tonne d'eq C
Menuiserie bois	23,5 kg	+ 3,52 €	+ 9,4 €	+ 35,25 €
% par rapport au prix de vente instantané	Rappel : prix de vente fourniture et main d'œuvre « investissement initial » : 821,13 €	0,4 %	1,14 %	4,2 %
Menuiserie PVC	63,6 kg	+ 9,54 €	+ 25,44 €	+ 95,4 €
% par rapport au prix de vente instantané	Rappel : prix de vente fourniture et main d'œuvre : « investissement initial » : 493,66 €	1,9 %	5,1%	19,3 %

Tableau 80 : Simulation des augmentations de prix de deux systèmes constructifs étudiés : une menuiserie bois PEFC et une menuiserie PVC, avec l'application en France d'une taxe carbone de différents niveaux

Pour une valeur moyenne de taxe carbone fixée à 400 € la tonne d'équivalent carbone, on obtient un surcoût de 9,4 € pour une menuiserie bois PEFC (1,14 % du prix de vente initial matériel + main d'œuvre) et un surcoût de 25,44 € (5,1 %) pour une menuiserie PVC.

La pondération par le critère environnemental « émissions de gaz à effet de serre / pouvoir de réchauffement climatique équivalent et contenu carbone équivalent » est donc significative et peut être prise en compte dans un calcul en coût global comparatif entre deux systèmes constructifs simples étudiés, sur l'ensemble de la DVT.

3.5.7 Indicateur sociétal : les heures de travail générées par la mise sur le marché des systèmes constructifs, converties en nombre d'emplois équivalent (pondération 7).

L'approche de qualification de systèmes constructifs selon des indicateurs « environnement et santé » présentée au paragraphe 2.2.4.2 du chapitre 1 « les typologies d'indicateurs » a été complétée par un volet sociétal qui a introduit le critère sociétal concernant l'impact sur l'économie (locale ou non) de la mise sur le marché d'un matériau ou composant de construction.

Ce critère traduit en nombre d'heures de travail équivalent (eq H) l'ensemble du cycle de vie du produit nécessaire à sa mise sur le marché :

- extraction des matières premières,
- transport primaire jusqu'au site de production,
- process / fabrication,
- mise sur le marché (transport négociant ou direct chantier).

Il s'agit bien du nombre d'heures nécessaires à la fabrication et la mise sur le marché du produit de construction étudié et non pas du nombre d'heures nécessaires à la mise en œuvre en phase chantier. Un produit de construction peut être fabriqué avec peu d'heures de main d'œuvre et donc peu de salariés et nécessiter beaucoup d'heures de main d'œuvre pour être mis en œuvre en phase chantier.

Les données disponibles relatives aux heures de main d'œuvre nécessaires à la fabrication / mise sur le marché de produits de construction sont très peu nombreuses tandis que celles disponibles pour la formulation de devis par les professionnels de la construction sont relativement nombreuses.

Les estimations d'heures de main d'œuvre nécessaires par unité de référence (en général le m²) peuvent être trouvées sur les guides et base de données de prix de la construction réactualisés tous les ans (ex Batiprix, annuel des prix, Batitel, prix maison ...).

Une première étude du contexte socio-économique de la filière bois en Suisse, déjà citée précédemment [**LIGNUM, 2004**], a permis de comparer une menuiserie bois à une menuiserie PVC.

Le ratio est de 1 à 10 : 20 heures de travail générées par la production et la mise sur le marché d'une menuiserie « PVC », 200 heures de travail générées par la mise sur le marché d'une fenêtre bois PEFC.

D'autres données sous formes directes ou de ratios sont très difficilement disponibles. L'enquête réalisée sur la filière bois en Suisse avec cas d'application aux menuiseries extérieures a nécessité près de 6 mois d'investigations pour une filière de produits.

Le critère « heures de main d'œuvre » n'est ensuite pas exploitable directement en terme de pondération du raisonnement en coût global.

Les heures de main d'œuvre induisent d'autres interrogations telles que :

- le travail en résultant est-il décent ou non ?,
- comment traduire ces heures en gains ou bénéfices ?,
- quel coût de revient applique t-on, notamment pour travailler sur un coût complet précis ?,
- est-il pertinent de rapporter ces coûts de main d'œuvre au coût de revient global du produit et/ou au prix de vente public ou professionnel ?,
- quel est l'impact en terme de communication socio-environnementale vis-à-vis des consommateurs ?,
- et enfin faut-il coupler les indicateurs « heures de main d'œuvre » et « sourcing local » pour favoriser les circuits courts, les économies d'énergie et les emplois régionaux ou locaux ?.

L'Institut Européen d'Animation Socio-économique (IEAS) soutient un programme de promotion de l'habitat social dans l'est du Cameroun en privilégiant « La réduction des quantités des matériaux conventionnels ou importés au profit de ceux prélevés et transformés localement qui sont socialement et culturellement acceptées » mais également « l'utilisation d'une main d'œuvre locale spécialisée formée qui réduit également le coût de la construction ».

Se pose donc la question de savoir comment valoriser un indicateur simple mais en fait élaboré et difficile à interpréter de manière vulgarisée à savoir « l'heure de main d'œuvre » nécessaire à la fabrication / mise sur le marché d'un produit de construction.

Une méthodologie intéressante a été développée en 2002 dans le cadre d'un mémoire de DPEA (Diplôme Propre aux Ecoles d'Architecture) soutenu auprès de l'école d'architecture de Grenoble [MARCOM, 2002]¹¹⁴. Il s'agit de la proposition d'un indicateur d'Intensité Sociale (IS).

Partant du constat qu'il peut être intéressant de « savoir quels matériaux et techniques utilisées dans le secteur de la construction préservent le plus les emplois humains », un indicateur doit permettre de représenter quelles techniques, à ressources énergétiques égales, laissent la plus grande part au travail humain, l'intensité sociale.

L'unité de l'indicateur d'intensité sociale est le nombre d'heures de travail humain nécessaire à la fabrication, au transport, à la mise en œuvre du produit de construction, rapporté à une unité de puissance de ressource énergétique consommée (énergie grise ou contenu énergétique caché des produits et matériaux de construction). Deux autres indicateurs sont utilisés : l'énergie incorporée ou énergie grise et les émissions de gaz à effet de serre (contenu carbone équivalent).

On peut reprendre les données disponibles pour les systèmes constructifs étudiés : une menuiserie bois PEFC et une menuiserie PVC.

	Energie incorporée (énergie grise) sur DVT, en kwh / m ² UF	Emissions de GES (contenu carbone équivalent)	Heures de travail pour la production / mise sur le marché	Heures de travail pour la mise en oeuvre	Intensité sociale en heures de travail (production et mise en oeuvre) / kwh d'énergie incorporée	Traduction de l'indicateur IS en jours travaillés générés
Menuiserie bois In PEFC	331,376 kwh/m ²	63,6 kg eq C	200	1,65	0,608	5 semaines ou 1 mois
Menuiserie PVC	401,154 kwh/m ²	23,5 kg eq C	20	1,65	0,0539	2,7 jours

Tableau 81 : Calcul de l'indicateur d'intensité sociale (IS) à partir d'indicateurs sociaux et environnementaux sélectionnés pour deux systèmes constructifs étudiés (menuiserie bois et menuiserie PVC).

L'indicateur d'Intensité sociale donne donc :

- 0,608 heures de travail ou heures d'emplois humains générées pour 1 kwh d'énergie incorporée pour les menuiseries bois.
- 0,0539 heures de travail générées pour 1 kwh d'énergie incorporée pour les menuiseries PVC.

Dix fois plus d'heures d'emplois humains sont générées pour 1 kwh d'énergie incorporée pour une menuiserie bois que pour une menuiserie PVC.

Une autre comparaison simple peut être effectuée : un litre de gasoil ou d'essence contient environ 10 kwh d'énergie (puissance électrique d'un chauffage de 1000 w qui fonctionne pendant 10 heures). 1 kwh est donc la quantité d'énergie contenue dans 0,1 litre de gasoil ou 1

décilitre de gasoil. Pour 1 décilitre de gasoil consommé (atteinte à l'environnement égale en termes de prélèvement de ressources et de nuisances occasionnées à l'environnement), une menuiserie bois PEFC laisse 0,608 heures de travail à l'ouvrier alors qu'une menuiserie PVC laisse 0,0539 heures de travail.

On peut terminer le raisonnement de l'intensité sociale en comparant le coût du travail procuré par différentes énergies disponibles en France au premier semestre 2008.

En 2008, en France, un ouvrier du bâtiment coûte 33 euros de l'heure, charges sociales et frais généraux de l'entreprise compris hors TVA.

Si l'entreprise choisit d'utiliser les services d'un moteur, quel est le ratio entre d'une part la productivité du travail de l'ouvrier et d'autre part la productivité du travail produit par la machine ?

Pour 30 euros hors TVA (arrondis), une entreprise peut acheter :

- une heure d'ouvrier,
- 30 litres de gazole blanc,
- 42 litres de mazout rouge,
- 166 kwh d'EDF.

Le « blanc » est utilisé dans les transports alors que le « rouge » est utilisé par les machines de chantier et l'électricité par les machines d'usines et les petits outils de chantier.

Tous ces prix comportent des variables locales qui peuvent faire varier sensiblement les résultats mathématiques mais ne changent pas vraiment l'ordre de grandeur des ratios.

Dans le tableau présenté ci-dessous, la puissance mécanique de l'humain est estimée à la moitié du « cheval-vapeur » soit trois cent soixante huit watts. 1 humain = 368 watts, ou 0,368 kwatts.

Pour 30 euros, en France en 2008, il est possible d'avoir :	166 kWh EDF	42 l de mazout	30 l de gazole	1 heure d'ouvrier
Contenu équivalent en kwh	166	420 kwh	300 kwh	0,368 kwh
Kilojoules « disponibles » ¹	597 600	1 512 000	1 080 000	1324,8
Rendement approximatif	80%	20%	20%	100%
Kilojoules « efficaces »	478 080	301 400	216 000	1324,8
Rentabilité financière kj chimique / kj humain	360	227	163	1
Rentabilité monétaire y compris amortissement entre Kj chimique et kj humain	180,4	113,75	81,5	1

Tableau 82 : Rentabilité monétaire comparée de l'humain et de la machine

Enfin, il est possible de comparer le coût du travail de différentes énergies en France, rendement et amortissement prix en compte :

¹ Conversion Kwh / kJ : 1 kwh = 3600 kJ

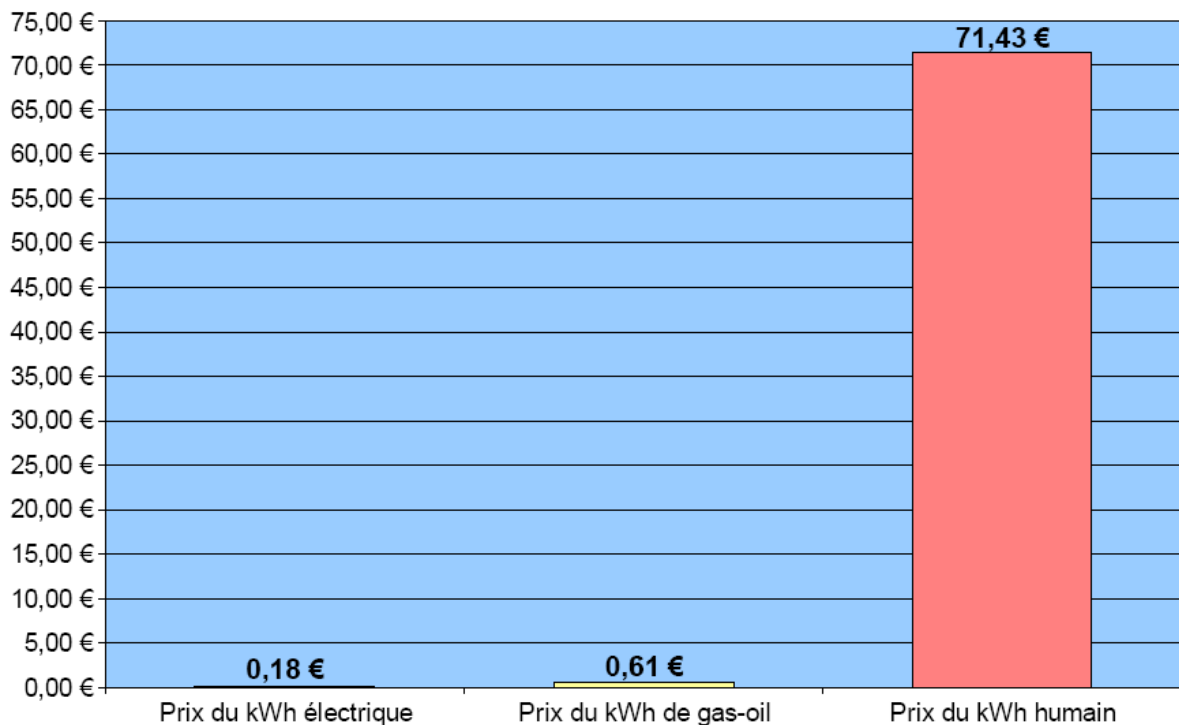


Figure 45 : Coût comparé du travail de différentes énergies en France (comprenant rendement et amortissement), en 2008.

Si l'énergie incorporée dans une menuiserie bois est 1 kwh d'énergie humaine, elle génère 0,608 heures de travail et coûte 71,43 €. 1 heure de travail humaine destinée à la fabrication d'une menuiserie bois coûte donc **117,48 €** ($71,43 \text{ €} / 0,608 \text{ h}$).

Si l'énergie incorporée dans une menuiserie PVC est 1 kwh d'énergie humaine, elle génère 0,0539 heures de travail et coûte 71,43 €. 1 heure de travail humaine destinée à la fabrication d'une menuiserie PVC coûte donc **1325 €** ($71,43 \text{ €} / 0,0539 \text{ heures}$).
Le même raisonnement peut être appliqué avec l'énergie gasoil et l'énergie électrique.

Le ratio coût d'une heure de travail humaine entre une menuiserie bois et PVC est de 11,30.

Pour l'énergie « gasoil » :11,31

⇒ 1 heure de travail générée par du gasoil destinée à la fabrication d'une menuiserie bois coûte **1 €** ($0,61 \text{ €} / 0,608 \text{ h}$).

⇒ 1 heure de travail générée par du gasoil destinée à la fabrication d'une menuiserie PVC coûte **11,31 €**.

Le ratio coût d'une heure de travail gasoil entre une menuiserie bois et PVC est de 11,31.

Pour l'énergie électrique : 11,45

⇒ 1 heure de « travail » générée par de l'électricité en France (80 % nucléaire, 15 % hydroélectricité) destinée à la fabrication d'une menuiserie bois « coûte » **0,296 €** ($0,18 \text{ €} / 0,608 \text{ h}$).

⇒ 1 heure de « travail » générée par de l'électricité en France (80 % nucléaire, 15 % hydroélectricité) destinée à la fabrication d'une menuiserie PVC « coûte » **3,339 €** ($0,18 \text{ €} / 0,0539$).

Le ratio coût d'une heure de travail gasoil entre une menuiserie bois et PVC est de 11,45.

En conclusion, quel que soit le type d'énergie utilisée pour fabriquer les menuiseries bois et PVC, l'heure de travail nécessaire à la fabrication d'une menuiserie PVC coûte environ 11 fois plus cher que l'heure de travail nécessaire à la fabrication d'une menuiserie bois.

3.5.8 Synthèse et conclusion

Nous avons donc présenté 7 possibilités de pondération qui permettent de caractériser plus finement que par les « simples » « critères techniques, économiques et financiers décrits au paragraphe 2.2.3, les systèmes constructifs étudiés :

- une menuiserie PVC représentant un système constructif conventionnel le plus fabriqué, vendu et utilisé en France actuellement (80 % des parts de marché) pour remplir la fonction de menuiserie extérieure,
- une menuiserie bois, en pin français certifié PEFC, identifiée, après analyse des critères environnementaux et santé, comme éco-matériau ou éco-système de référence pour remplir la fonction de menuiserie extérieure.

Parmi ces 7 pondérations, certaines sont applicables car significatives quant à leur impact économique en terme de différenciation entre la menuiserie PVC et la menuiserie bois PEFC. D'autres sont écartées car non significatives ou trop imprécises quant aux conclusions qui peuvent en être tirées.

La synthèse des 7 pondérations et des décisions liées applicables ou écartées peut être réalisée ainsi :

	Dénomination	Indicateur principal	Indicateurs secondaires	Conclusion pour différencier PVC / Bois
Pondération 1	Technique	Performance thermique U_w	Temps de retour simple et élaboré	Non significatif
Pondération 2	Réglementaire	Points de solution technique correspondant à la RT en vigueur	Facteur solaire en %	Non significatif
Pondération 3	Systèmes de management de la QEB / Certification basse énergie	Recours obligatoire aux éco-matériaux	Performances techniques différenciantes des éco-matériaux par rapport aux solutions conventionnelles (inertie, hygroscopicité, non dégradation des performances essentielles, propriétés acoustiques)	Non significatif pour les systèmes constructifs étudiés
Pondération 4	Utilisateurs finaux	Aptitudes techniques	Composants éco-déterminants	Non significatif
Pondération 5	Traitement des déchets	Quantité de déchets en fin de vie à traiter	Coûts de traitement des déchets	Non significatif
Pondération 6	Emissions de gaz à effet de serre	Contenu carbone équivalent	Contribution climat énergie en cas de création d'une taxe carbone	Significatif
Pondération 7	Heures de travail générées	Intensité sociale	Coût d'une heure de travail générée par l'utilisation d'une énergie (mécanique ou humaine) en France	Significatif

Tableau 83 : Synthèse des pondérations étudiées et choix d'utilisation pour la comparaison des systèmes constructifs étudiés

Au final, seules 2 pondérations parmi les 7 proposées sont significatives car elles permettent de compléter efficacement la différenciation technique, économique, financière mais aussi environnementale et santé proposée aux paragraphes précédents :

- les émissions de gaz à effet de serre « taxées » par une contribution climat (qui n'existe pas aujourd'hui en France).
- l'intensité sociale générée par le choix de tel ou tel système constructif.

Il est important de remarquer que les autres pondérations proposées, non significatives pour différencier les systèmes constructifs étudiés, peuvent l'être, pour d'autres systèmes constructifs, significatifs. Le raisonnement est à reprendre pour chaque catégorie de système constructif étudiée.

3.6 Agrégation des résultats

Nous pouvons désormais proposer une agrégation des résultats liée à la comparaison des systèmes constructifs étudiés, une menuiserie PVC et une menuiserie bois PEFC, selon la méthodologie développée précédemment.

3.6.1 Hypothèses préliminaires

La base de notre raisonnement est de reprendre la classification proposée :

⇒ **classification des systèmes constructifs étudiés :**

	Fenêtre PVC	Fenêtre bois certifiée FSC
Type de matière première	Primaire	Primaire
matières	Synthétiques	Naturelles
Science des matériaux	Composites	Organiques
Application et usages	Application moderne	Application moderne et traditionnelle
Matériaux de terrain	Matériau de protection	Matériau de protection
Classement général	Matériau du second oeuvre	Matériau du second oeuvre
Uniclass		
G	G 26 Frame/isolated structural members	G26 Frame/isolated structural members
J	JL - Windows/Doors/Stairs	JL - Windows/Doors/Stairs
N	N3 - Performance	N3 - Performance

On ajoute une aptitude à remplir une fonction c'est-à-dire un usage donné ou une « unité fonctionnelle », avec une description précise des composants :

⇒ **Unité fonctionnelle associée et composants :**

Unité fonctionnelle	Système constructif type	Fonction	Classification Uniclass	Corps d'état	DTU	Descriptif et Composants¹
« Ouverture de bâtiment » C1-1 & C1-4 <i>Assurer la fonction d'un m² de surface d'ouverture</i>	Fenêtre PVC ou Fenêtre bois certifié PEFC	- Thermique de l'enveloppe - Infiltrations	G 26	Menuiseries extérieures	36 et 37	Descriptif fenêtre PVC : Croisée standard ouvrante à la française 1 vantail ht 115 x 80 cm, en PVC blanc ép. 60 mm, vitrage isolant 4-16-4 faible émissivité. Ferrage paumelles, crémone à galets 3 points,

¹ Selon Batiprix – Le Moniteur, 2008 www.batiprix.com

<p><i>d'un bâtiment, par une fenêtre type ou porte fenêtre type, sur une durée de vie typique de 30 ans, avec les performances thermiques minimales $U_w < 2,6 \text{ w/m}^2.k$ et acoustiques $R_{tr} < 30 \text{ db}$ (conformité NRA)</i></p>					<p>poignée époxy. Fixations et pose sur fond de joint et joint d'étanchéité.</p> <p>Descriptif fenêtre bois : fenêtre croisée standart ouvrant à la française, 1 vantail, oscillot battant, de ht 145 x 90 cm en chêne massif français, ep 56 mm (ouvrant), double vitrage 4-46-4 faible émissivité argon, poignée non comprise</p> <p>Composants fenêtre PVC : PVC (Sable, calcaire, sel -chlore), verre, acier</p> <p>Composants fenêtre bois : Bois éco-certifié (pin sylvestre) origine France (22 % de la réserve de résineux français), ressource renouvelable (prélèvements < renouvellement annuel)</p>
--	--	--	--	--	---

On précise des critères techniques complémentaires liés à la mise en œuvre : les heures de main d'œuvre associées à la mise en œuvre par une entreprise du bâtiment de l'unité fonctionnelle et un nombre théorique de remplacements de tout ou partie du système constructif étudié pour qu'il maintienne ses performances sur la durée de vie typique étudiée.

⇒ **Critères techniques complémentaires** : heures de main d'œuvre et nombre de remplacements :

Systèmes constructifs		C1-1 Menuiserie Bois PEFC	C1-4 Menuiserie PVC
1.2	Heure de main d'œuvre		
	Mise en œuvre du système constructif	1,65 heure	1,65
	Maintenance	0	0,5
	fonctionnement	1	0
1.3	DVT (sources : fabricants)	30 ans	30 ans
1.4	Remplacements / Maintenance	0 sur DVT	1 sur DVT

On complète les critères techniques par des critères économiques liés aux coûts des systèmes étudiés :

⇒ **Critères de coûts** : Coûts « matériel », coûts ou prix de vente par l'entreprise (matériel + main d'œuvre), coûts de maintenance, coûts de fonctionnement et coûts totaux : synthèse du tableau 54.

Systèmes constructifs		C1-1	C1-4
2.1	Coût « matériaux » d'une unité fonctionnelle	514,42 €	294,26 €
2.5	Coût de vente ou « prix de vente » ou coût d'investissement initial (11%)	821,13 €	493,66 €
2.6	Coût de maintenance	0 €	510,19 €
2.7	Coûts de fonctionnement	61,74 €	0 €
2.8	Coût global ou total (2.5 + 2.6 + 2.7)	882,87 €	1003,85 €
	<i>Surcoût initial (différence des coûts de vente)</i>	<i>327,47 €</i>	<i>RAS</i>
2.9	<i>Coût évité brut (Coût total C1-4 – C1-1)</i>	<i>120,98 €</i>	

On complète enfin le raisonnement par les pondérations applicables mises en évidence aux paragraphes 3.5.6 et 3.5.7. Deux pondérations parmi les 7 développées sont applicables pour caractériser les systèmes constructifs étudiés (applicables au sens pertinentes) : une pondération relève de critères environnementaux, les émissions de gaz à effet de serre ; une autre pondération relève de critères sociétaux, les heures de travail générées.

	Dénomination	Indicateur principal	Indicateurs secondaires	Conclusion pour différencier PVC / Bois
Pondération 6	Emissions de gaz à effet de serre	Contenu carbone équivalent	Contribution climat énergie en cas de création d'une taxe carbone	Significatif
Pondération 7	Heures de travail générées	Intensité sociale	Coût d'une heure de travail générée par l'utilisation d'une énergie (mécanique ou humaine) en France	Significatif

⇒ **Critère « environnemental »** : émission de CO₂ liées et équivalent € avec simulation d'une taxe carbone à 400 € la tonne de CO₂. Tableau 74 :

Taxe carbone	Contenu carbone eq (sur toute la DVT), sources : FDES base INIES	Taxe carbone équivalente : pour 400 € la tonne d'eq C
Menuiserie bois	23,5 kg	+ 9,4 €
Menuiserie PVC	63,6 kg	+ 25,44 €

⇒ **Critère sociétal** : heures de travail générées et indicateur d'intensité sociale (IS).

Tableau 75 :

	Energie incorporée (énergie grise) sur DVT, en kwh / m² UF	Intensité sociale en heures de travail (production et mise en œuvre) / kwh d'énergie incorporée	Traduction de l'indicateur IS en jours travaillés générés
Menuiserie bois In PEFC	331,376 kwh/m ²	0,608	5 semaines ou 1 mois
Menuiserie PVC	401,154 kwh/m ²	0,0539	2,7 jours

3.6.2 Proposition d'une méthode d'agrégation : le langage commun « € »

Comme précisé à de nombreuses reprises, l'objectif de notre raisonnement est de proposer une agrégation simplifiée de l'analyse technique, économique et financière d'éco-matériaux par rapport à des solutions conventionnelles, en agglomérant au final les indicateurs en ratio simplifié « coûts / bénéfices ».

Nous reprenons donc l'ensemble des coûts des deux solutions sur leur durée de vie typique ainsi que l'ensemble des bénéfices identifiés.

Pour les coûts, nous avons donc :

	Menuiserie Bois PEFC	Menuiserie PVC
Coût total sur DVT (€ HT)	882,87 €	1003,85 €
Taxe carbone liée au contenu Eq C	9,4 €	25,44 €
Coût d'une heure de travail (énergie humaine) destinée à la fabrication du système constructif	117,48 €	1325 €
Total coûts	1009,75 €	2354,29 €
Rappel : surcoût initial	327,47 €	

Tableau 84 : Synthèse des coûts pour les deux systèmes constructifs étudiés

Pour les bénéfices :

	Menuiserie Bois PEFC	Menuiserie PVC
Crédit d'impôt « matériel » (base 2008, 40 % coût du matériel HT), année N+1	306 €	175 €
Economie de taxe carbone	16,04 €	0 €
Economie de coûts sur DVT	120,98 €	0 €
Total bénéfices sur DVT	443 €	175 €
Bénéfices théoriques par an (pour 30 ans de DVT)	14,76 €	5,83 €

Tableau 85 : Synthèse des bénéfices pour les deux systèmes constructifs étudiés

Le surcoût initial de 327,47 € est, en analyse simple, lissé en $327,47 / 14,76 = 22$ années, compte tenu des bénéfices dégagés par année pour l'ensemble de la DVT.

En réalité, le crédit d'impôt octroyé en année N+1 pour la menuiserie bois PEFC vient lisser au bout de deux ans le surcoût initial.

La quatrième année, le restant de surcoût est lissé : $327,47 - 306 = 21,47 \text{ €}$ et $14,76 \times 2 = 29,52 \text{ €}$.

Le ratio coûts / bénéfices pour une menuiserie bois PEFC est de $1009,75 / 443$ soit 2,279. Le ratio coûts / bénéfices pour une menuiserie PVC est de $2354,29 / 175$ soit 13,45.

	Menuiserie Bois PEFC	Menuiserie PVC
Ratio coûts / bénéfices	2,279	13,45
Interprétation	> 1	> 1

Tableau 86 : Ratios coûts / bénéfices pour les deux systèmes constructifs étudiés

En analyse financière simple, le ratio coûts / bénéfices du projet d'investissement « menuiserie bois » ou « menuiserie PVC », qui exprime un retour sur investissement, n'est pas considéré comme rentable puisqu'il est supérieur à 1.

Nous avons pourtant vu précédemment que le temps de retour simple n'était pas celui qu'il fallait considérer pour évaluer précisément la rentabilité d'un investissement, compte tenu de paramètres externes (taux d'actualisation des valeurs monétaires, évolution du prix de l'énergie...).

Le temps de retour élaboré devrait ainsi être privilégié.

Pour autant, le ratio coûts / bénéfices de la menuiserie bois PEFC est 7 fois moins élevé que celui de la menuiserie PVC.

3.6.3 Résultats de l'agrégation financière

Le ratio coûts / bénéfices d'une menuiserie bois PEFC, considérée comme un système constructif relevant de l'éco-construction, est 6 fois moins élevé que celui d'une menuiserie PVC considérée comme un système constructif conventionnel.

3.7 Conclusions

Compte tenu des indicateurs renseignés et des pondérations effectuées, l'investissement dans une menuiserie bois PEFC considérée comme « éco-matériau » est donc 6 fois plus rentable que l'investissement dans une menuiserie PVC.

Le raisonnement suivi pour comparer les deux systèmes constructifs « menuiseries extérieures » étudiés doit être appliqué avec des spécificités pour chaque catégorie, les pondérations pouvant être différentes et donc significatives ou non.

Il est important de noter le poids prépondérant de l'indicateur « nombre de remplacements sur DVT », impactant directement le coût de maintenance du système constructif « menuiserie PVC » étudié. Il est admis qu'une menuiserie PVC doit être changée (tout ou partie) 1 fois sur une durée de vie typique de 30 ans et que sa durée de vie réelle est donc de 15 ans.

CHAPITRE 4

Choix d'éco-matériaux régionaux et application aux solutions constructives identifiées

Chapitre 4 : Choix d'éco-matériaux régionaux et application aux solutions constructives identifiées

4.1 Introduction

Terreau fertile de naissance et d'expérimentation des démarches françaises de développement durable, le Nord Pas De Calais, première région française ayant initié les démarches territoriales d'Agendas 21 et premier niveau d'investissement dans le secteur de l'environnement dans l'hexagone, expérimente les démarches de qualité environnementale dans la construction depuis le début des années 1990 et concentre de manière croissante dans ce secteur des acteurs mobilisés par la production, la diffusion et l'utilisation d'éco-matériaux.

La demande en éco-matériaux, remarquable en valeur absolue par rapport à celle d'autres régions françaises, bénéficie d'une croissance régulière et soutenue depuis le début des années 2000, comme en atteste le nombre de mises en chantier de bâtiments à maîtrise d'ouvrage publique conformes au référentiel « HQE® », et dans une moindre mesure, les appels d'offres ou mises en chantier de bâtiments « HQE® » par la maîtrise d'ouvrage privée ainsi que le développement d'auto-constructions alternatives.

Ce dynamisme relatif de la demande régionale ne rencontrait cependant pas jusqu'en 2005 d'offre adaptée, l'état des lieux initial ayant même conduit à établir une « cartographie » restreinte de l'offre régionale d'éco-matériaux, notamment pour les éco-matériaux élaborés et fabriqués au niveau local et/ou à partir de ressources locales - matières primaires ou secondaires-.

Les principaux facteurs limitant l'utilisation d'éco-matériaux sont tout d'abord l'impossibilité de traiter avec des fournisseurs habituels, toute complexité supplémentaire dans les procédures normales d'approvisionnement étant vécue comme susceptible de provoquer des défaillances en cascade.

Vient ensuite le manque de visibilité en matière de réapprovisionnement, service après vente et surtout d'assurance produit, conditionnée par l'obtention de normes et agréments techniques.

Concernant l'approche économique, l'existence de prix souvent plus élevés que des matériaux classiques, du simple fait de volumes restreints, de la méfiance des consommateurs et de l'éloignement des filières d'approvisionnement (le coût transport est difficilement négociable), impacte fortement le coût global.

Les critères de sélection des projets sont aussi trop souvent basés sur l'économique (haut et bas de bilan) et intégrant peu les impacts environnementaux des projets étudiés, les raisonnements en coûts complets incluant les coûts évités et donc au final les matériaux utilisés.

Les informations environnementales et sanitaires des produits sont peu lisibles pour les consommateurs finaux, professionnels ou particuliers et les impacts environnementaux sont difficiles à caractériser et évaluer.

Enfin, les informations permettant de bâtir et d'utiliser des argumentaires techniques, économiques et financiers simples pour vendre le concept aux clients intermédiaires (artisans du BTP par exemple) ou finaux (particuliers, maîtrise d'ouvrage publique ou privée) manquent indéniablement.

Ces facteurs limitant l'utilisation d'éco-matériaux ont contribué par simple effet de chaîne à une moindre utilisation en volume de ces matériaux et à une moindre importation ou production d'éco-matériaux, ce qui limitait l'activité économique liée sur le territoire du Nord Pas-de-Calais, la création ou le développement d'activités nouvelles et donc la création d'emplois induite sur toute la filière.

Au-delà du débat sur la définition et la reconnaissance ou non de l'existence d'éco-préférences « matériaux » (une entreprise engagée dans une démarche de certification environnementale du type ISO 14000 peut-elle être soupçonnée de fabriquer et mettre sur le marché des « éco-produits » ?), les fabricants de matériaux, semi-produits et produits de construction pouvant manifestement contribuer à la qualité environnementale étaient très minoritaires au regard des sociétés de service et des établissements institutionnels censés favoriser ou faciliter leur utilisation.

Cette pyramide inversée peut être partiellement analysée comme le reflet de l'évolution de notre société vers une société d'activités tertiaires substituant progressivement les services aux activités de production.

Enfin, le décollage économique de ces éco-matériaux, annoncé en France au début des années 1980 et faisant suite aux chocs pétroliers successifs, à l'augmentation soudaine du cours des énergies fossiles et à l'émergence des premières démarches de constructions bioclimatiques conduites sous l'impulsion de quelques architectes précurseurs, ne s'est pas produit avant les années 2000. Dans le même temps, il s'opérait dans des pays plus nordiques tels l'Allemagne, les Pays-Bas et le Danemark.

Les éco-matériaux y représentent d'ailleurs actuellement des parts de marché plus que significatives, supérieures à 10 % du marché global des matériaux de construction alors qu'en France on éprouve des difficultés à les quantifier en pour cent.

Au delà des facteurs économiques, industriels et/ou de recherche et développement, ce sont également les conditions socioculturelles qui ont conditionné et favorisé cette émergence, les populations des pays nordiques étant beaucoup plus « éco-sensibilisées » que les traditionnels latins.

En dépit de ces freins, la région Nord Pas De Calais s'inscrit depuis 2005 comme territoire test au niveau national, de la production – distribution d'éco-matériaux de masse pour le marché français. Un certain nombre de facteurs ont favorisé cette conversion :

Au niveau national :

- L'émergence de la thématique des matériaux bio-sourcés à moindre impact unitaire environnemental, dans le contexte global des économies d'énergie massives préconisées par le Grenelle de l'Environnement.
- La création en 2008 par le CSTB d'un « pass innovation » pour caractériser rapidement et à moindre coût les performances de matériaux et produits dits « alternatifs », plutôt bio-sourcés, avec la création d'un groupe de travail spécifique aux matériaux bio-sourcés au CSTB en février 2008.
- L'arrivée du label de performance énergétique « basse consommation d'énergie » (BBC 2005) couplé à l'utilisation de matériaux et techniques moins « impactants ». Le label « bâtiment à énergie positive », annoncé pour s'appliquer à tous les bâtiments

neufs dès 2012, devrait valoriser les matériaux et produits à faible contenu énergétique et carbone.

- La réflexion en cours pour la création d'un label « matériaux bio-sourcés » porté par la Direction Générale de l'Urbanisme et de l'Environnement au Ministère du Logement, sensé favoriser l'octroi de crédits et subventions futurs dédiés à l'usage et à la prescription de matériaux bio-sourcés.

Au niveau régional :

- L'existence d'une aide émanant du Conseil Régional et de la Direction Régionale de l'Industrie, sous forme d'action collective permettant l'obtention d'avis techniques CSTB pour des éco-matériaux / éco-techniques développés en Nord Pas De Calais. Cette procédure permet de financer 80 % du montant de procédures de certification par des fonds publics, sous forme de subventions.
- La proximité de marchés émergents et matures autour des thématiques de l'éco-construction. L'étude commandée par le CD2E en 2004-2005 concernant la caractérisation de filières nord européennes de production – distribution d'éco-matériaux, a contribué à améliorer la connaissance des marchés de proximité (Belgique, Pays Bas, Allemagne) et à favoriser les connexions avec les acteurs de ces marchés.
- La naissance de concepts innovants de distribution d'éco-matériaux et éco-techniques (énergies renouvelables) à destination du marché de la réhabilitation thermique et environnementale de l'habitat existant :
 - o **Kbane** « la maison durable »¹, concept porté par ADEO, la maison mère d'AUCHAN. Le premier magasin « test » a ouvert ses portes début 2009 à Villeneuve d'Ascq en métropole Lilloise. Le concept est entièrement dédié aux alternatives « vertes » dans le secteur de l'habitat. Ainsi, pour le choix « matériaux d'isolation thermique », ne seront disponibles que les fibres de bois, ouates de cellulose ou autres matériaux bio-sourcés. En sont naturellement exclus, les matériaux conventionnels notamment laines minérales.
 - o **Maison-plus-écologique.com**², concept identique à celui de KBANE hormis l'absence d'enseigne magasin physique dédiée, porté par le réseau CAMIF habitat. Le marché visé par le réseau CAMIF Habitat est celui de la performance thermique en rénovation avec utilisation de matériaux et techniques plus respectueux.
 - o **SALOLA** environnement, concept de distribution d'éco-matériaux sur la typologie d'une plate forme dédiée à la vente de solutions sélectionnées pour des professionnels de la construction : produits d'étanchéité à l'air, fibres de bois isolantes, toitures végétalisées. Le même concept a été développé en région Alsace par un spécialiste des produits bois « **AGEKA** », via l'enseigne **BATIMIEUX**³.

¹ KBANE, la maison durable, voir www.kbane.com

² Maison plus écologique : www.maison-plus-ecologique.com

³ BATIMIEUX : www.batimieux.com

- Le verdissement des grandes surfaces de bricolage (GSB) et développement de stratégies de référencement de produits et solutions vertes chez les deux leaders du marché du bricolage en France, Castorama et Leroy Merlin, dont les sièges sociaux sont tous deux implantés en région Nord Pas De Calais.
- La progression très importante en volume du marché des blocs monomurs à isolation répartie (5000 tonnes vendues en 2001, 55 000 en 2005), blocs considérés comme relevant de l'éco-construction par comparaison au système constructif conventionnel blocs parpaings / isolant laine de verre.

La région Nord Pas-de-Calais présente même la particularité depuis 2007 de regrouper trois fabricants de blocs monomurs différents : le monomur pierre ponce à Dunkerque, le monomur terre cuite à Hulluch à proximité de Lens et le plus gros four à autoclave pour béton cellulaire d'Europe à Valenciennes.

Enfin, la région Nord Pas De Calais profite de son emplacement géographique au cœur de l'Europe du Nord Ouest et bénéficie des flux de matériaux et produits de construction en provenance des « pays producteurs » (France, Allemagne, Suisse, Autriche, Europe de l'Est) et à destination des marchés émergents, notamment pour le développement d'éco-produits : France, Grande Bretagne, Wallonie.

Poussée par les organismes de promotion de la filière éco-matériaux, l'innovation d'éco-différenciation émane également des PME-PMI du Nord Pas de Calais pour le secteur des produits et matériaux de construction. Un recensement sélectif mené par le CD2E entre 2005 et 2008 a permis d'identifier seize de ces produits (tableau 29 chapitre 1, paragraphe 5-4), repris ci- après :

N°	Corps d'état	Nom	Type
1	GO	Cellumat	Bloc béton cellulaire
2	GO	Porotherm	Bloc monomur terre cuite
3	GO	Cogetherm	Bloc monomur de pierre ponce
4	SO	Cogebloc	Enduit pierre ponce et chaux hydraulique
5	GO	Brique de terre crue	Brique de terre crue compressée non cuite (vente avant cuisson)
6	GO	Novaplaque	Plaque de pvc micronisé, recyclé et mélangé avec une charge de bois
7	GO	Terca	Briques de terre cuite avec déchets de terrils incorporés
8	GO	Chaux	Chaux NHL
9	GO	BTC	Brique de terre crue stabilisée à la chaux hydraulique
10	SO	Métisse	Isolant à base de textile recyclé
11	SO	Abrilaine / Panolaine	Isolant à base de laine de mouton origine française
12	GO	Plancher cloué	Plancher cloué en bois non traité, issu des forêts de la côte d'opale
11	SO	Portes bois massif	Portes en bois massif non traité, certifié PEFC, utilisation de colles faiblement émissives
12	GO	Bardage Aulne	Bardage en aulne du nord pas de calais, non traité, scié et raboté traditionnel
13	SO	Menuiseries	Menuiseries extérieures / intérieures, démarche Menuiseries 21, bois certifié PEFC non traité, colles faiblement émissives.
14	GO & SO	Anas de lin	Coproduits du lin (paillettes courtes), matière fibreuse végétale, parfois appelé « petit bois »
15	SO	Laine de lin	Fibre de lin pour l'isolation
16	GO	Botte de paille	Bottes de pailles de céréales comprimées spécifiquement pour la construction

Tableau 87 : Présentation synthétique des éco-matériaux présumés fabriqués en région Nord Pas de Calais.

4.2 Hypothèses de choix d'éco-matériaux régionaux et application de la méthodologie à des systèmes constructifs

4.2.1 Identification et choix d'éco-matériaux régionaux et de systèmes constructifs traditionnels / éco-construits

Sur la base de la définition consensuelle des éco-matériaux et à partir de la liste des systèmes constructifs majeurs correspondant aux unités fonctionnelles principales associées aux déperditions thermiques majeures, nous pouvons répartir les éco-matériaux du tableau précédent qui correspondent aux unités fonctionnelles majeures et systèmes constructifs suivants :

Unité fonctionnelle	Système constructif 1	Système constructif 2	Système constructif 3	Système constructif 4	Système constructif 5
A0 Mur porteur sans isolation rapportée				Mur - Plancher bois massif cloué BMC	BTC terre crue chaux / BTC terre crue compressée
A1 Mur porteur à isolation répartie	Mur monomur pierre ponce	Mur monomur terre cuite	Mur monomur béton cellulaire Mur mono-mur terre cuite		
A2 Isolation thermique rapportée sur mur	Isolant métisse textile recyclé	Isolant laine de mouton	Isolant laine de lin	Isolant botte de paille de céréales	
A3 Bardage et vêtue	Bardage bois aulne régional	Bardage plaque PVC micronisé recyclé			
B1 Isolation thermique de toiture	Isolant métisse textile recyclé	Isolant laine de mouton	Isolant laine de lin	Isolant botte de paille de céréales	Anas de lin en vrac
B2 Couverture de toiture	Plaques PVC micronisé recyclé				
B3 Structure de toiture					Rampant bois massif cloué (idem A0-4 mais section plus importante) BMC
C1 Ouverture de bâtiment	Fenêtre bois PEFC menuiseries 21				Porte en bois massif régional PEFC sans colles
D1 : Rupteur de pont thermique	Planelle isolante pierre ponce				
E0 : Dalle porteuse		Dalle porteuse constituée de plancher bois massif cloué de 120 à 170 mm ep, en bois local cloué BMC, portée 6 à 7 m			

Tableau 88 : Croisement des systèmes constructifs majeurs reliés aux unités fonctionnelles des principales déperditions thermiques identifiées dans un bâtiment, avec les éco-matériaux régionaux fabriqués en région Nord Pas De Calais.

Après l'essai de notre méthodologie d'analyse sur un système constructif simple et ne résultant pas, pour remplir une fonction, de l'assemblage de différents matériaux ou produits de construction, à savoir une menuiserie bois PEFC comparée à une menuiserie PVC, nous proposons d'appliquer notre raisonnement à un système constructif élaboré à partir:

- de matériaux conventionnels disponibles couramment sur le marché de la construction / distribution en Nord Pas De Calais, et depuis longtemps utilisés pour leur caractère de « traditionnalité » et leur coût considéré comme faible.
- d'éco-matériaux présumés identifiés au préalable par le CD2E sur la base de critères environnementaux et sanitaires simplifiés (tableau 81), fabriqués en région Nord Pas De Calais et de plus en plus utilisés et prescrits dans le cadre de systèmes alternatifs aux modes constructifs traditionnels français, notamment en raison des performances présentées en matière de contribution à la performance hygrothermique des ouvrages.

Le système constructif retenu assure plusieurs fonctions essentielles en terme de durabilité et de pérennité de l'ouvrage ainsi qu'en terme de performances hygrothermique et environnementale.

Un m2 de rampant de toiture se décompose comme suit :

1-Un parement intérieur, avec ses éléments associés, assurant une fonction esthétique, de complément d'isolation thermique et parfois d'étanchéité à l'air et à la migration de vapeur d'eau.

2-Une étanchéité à l'air et une résistance à la diffusion de vapeur d'eau contenu dans l'air intérieur chauffé.

3-Des éléments porteurs structurels, de reprise d'efforts dûs au vent et de stabilité dimensionnelle de l'ouvrage.

4-Une isolation thermique adaptée pour le confort d'hiver et d'été, et donc la réduction des déperditions thermiques et des consommations énergétiques pour une température de confort donnée à 19°C.

5_Un écran ou panneau d'étanchéité ponctuelle à l'eau, d'étanchéité permanente au vent extérieur (film ou panneau pare pluie) et d'ouverture à la diffusion de vapeur.

6-Un espace technique porteur d'éléments de couverture et assurant une réservation pour la ventilation sous face des éléments de couverture.

7-Des éléments de couverture assurant la fonction d'étanchéité permanente à l'eau, la protection et la pérennité de l'ouvrage.

Le système rampant de toiture considéré comme conventionnel est celui présenté dans les documentations techniques de référence des solutions bois du Centre Technique pour le Bois et l'Aménagement CTBA, n° 302.01 dénommé « Toitures inclinées » - caractéristiques.

Une coupe verticale du système constructif est présentée ci-après :

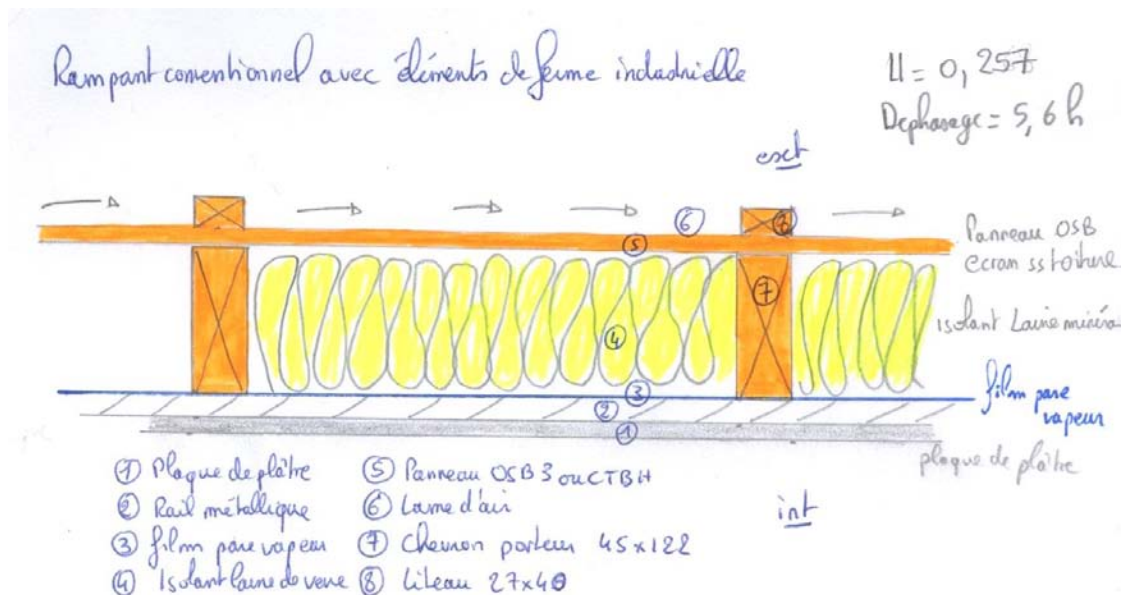


Figure 46 : Proposition de coupe verticale du système constructif « rampant de toiture conventionnel type ferme industrielle ».

Le système rampant de toiture considéré comme éco-construit est celui conçu par l'entreprise Scierie Palettes du Littoral (SPL) à Audruicq (62), SCOP d'insertion spécialisée dans la production de palettes de bois hors standard et constructeur de maisons écologiques en logement social.

Le système constructif SPL – Chênelet repose sur l'association de planches de bois de faibles sections constituant, une fois clouées entre elles, des murs, planchers et rampants porteurs isolés par l'extérieur en ouate de cellulose insufflée, éco-matériaux le plus proche en terme d'accessibilité prix, des isolants minéraux premier prix.

Une coupe verticale du système rampant bois massif cloué est présentée ci-après :

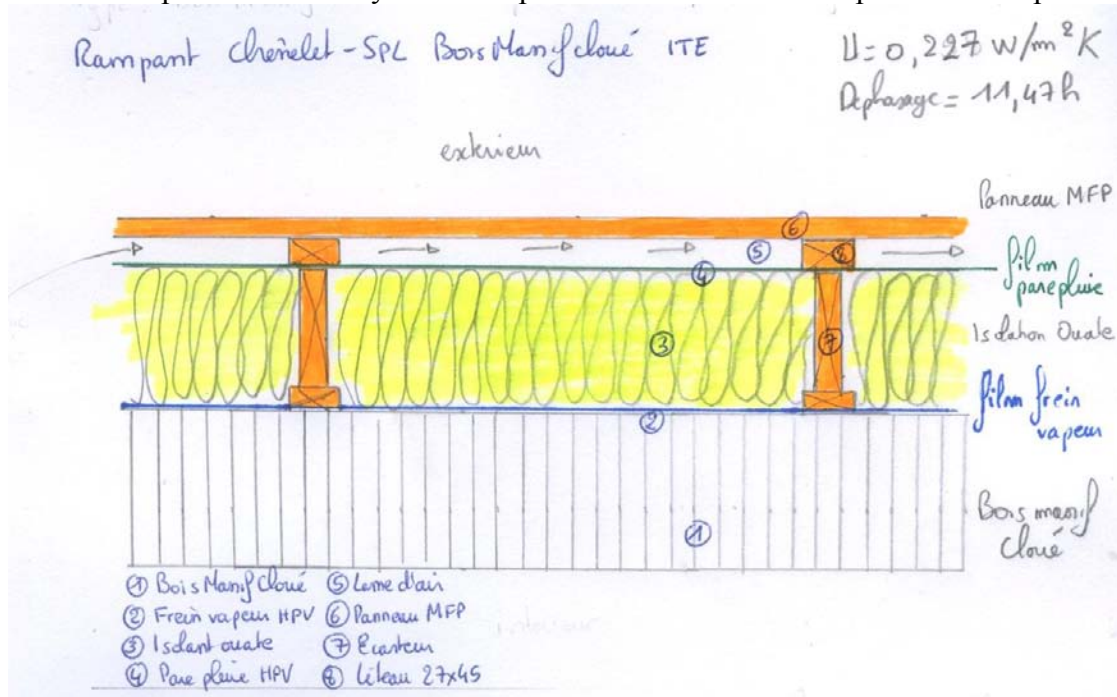


Figure 47 : Proposition de coupe verticale du système constructif « rampant de toiture bois massif cloué », type SPL Chênelet.

En terme de performance thermique, ces deux systèmes constructifs sont proches des valeurs réglementaires seuil de la RT 2005 ; l'épaisseur d'isolation considérée est volontairement identique (120 mm d'isolant épais) pour simplifier la comparaison. Pour satisfaire les exigences de démarches et labels plus performants (bâtiment basse consommation, Minergie, Maison passive), 80 à 100 mm d'isolation, souvent en couche croisée, est nécessaire, soit un U global paroi d'au maximum 0,20 W/m²K.

4.2.2 Application de la méthodologie et de l'outil d'aide à la décision au système constructif élaboré à partir d'éco-matériaux régionaux.

Nous pouvons appliquer le raisonnement de classification qui permet de comparer les systèmes constructifs entre eux, selon un classement scientifique et opérationnel de leurs composants.

	Rampant fermettes industrielles	Rampant bois massif
Type de matière première	Primaire	Primaire et secondaire
Matières	Naturelles, artificielles et Synthétiques	Naturelles, artificielles et synthétiques
Science des matériaux	Minéraux, organiques et Composites	Organiques et composites
Application et usages	Application moderne	Application moderne et traditionnelle
Matériaux de terrain	Matériau de construction et de protection	Matériau de construction et de protection
Classement général	Matériau du gros œuvre et second oeuvre	Matériau du gros œuvre et second oeuvre
Uniclass G	G 24-G312 Roofs / Roofs coverings	G24-G312 Roofs / Roofs coverings
J	JJ-waterproofing	JB – 11 Prefabricated building units JH-21 Timber weatherboarding JJ waterproofing
N	N311 overall strength stability N3114 - Thermal loading	N311 overall strength stability N3114 - Thermal loading

Tableau 89 : Comparaison des systèmes constructifs selon le système de classification retenu.

Les systèmes constructifs identifiés peuvent être mis en évidence par :

- une solution constructive majeure : une fonction et une classification,
- une appartenance à un corps d'état,
- une définition d'une unité fonctionnelle.

Les unités fonctionnelles correspondant au système constructif « rampant de toiture » sont les suivantes (tableau 33 paragraphe 2-1) :

B1 « Assurer une fonction d'isolation thermique sur 1 m² de toiture sous forme de panneau semi rigide ou rouleau, ignifugé, d'épaisseur 100 mm, mis en œuvre sous un revêtement d'étanchéité (pare pluie) pendant une annuité et sur une durée de vie typique de 50 ans ».

B2 « Assurer la fonction de couverture de 1 m² de toiture pendant une annuité ».

B3 « Assurer la fonction de supporter des éléments de plancher ou toiture pendant une annuité représentant un volume de bois lamellé collé de 0,28 m³ ».

F1 « Assurer la fonction de frein vapeur sur 1 m² en assurant une étanchéité à diffusion de vapeur d'eau variable (0,3 à 20 m) sur toiture chevrons classique pendant une annuité ».

Les différents matériaux constituant ces unités fonctionnelles sont nombreux, les systèmes constructifs sont connus et font référence à une documentation technique unifiée (DTU) :

- Charpentes en bois assemblées par connecteur métallique ou gousset (DTU 31.3).
- Couvertures (DTU 40).
- Règles de calcul et de conception des charpentes bois (CB 71).
- Calcul des structures bois Eurocode 5 (EC 5).
- Réglementation thermique (RT 2005).
- Nouvelle réglementation acoustique (NRA).
- Méthode de justification par le calcul de la résistance au feu des structures bois (BF 88).

Les rampants de toiture isolés et étanches à l'air et à l'eau sont alors décomposés comme suit :

Unités fonctionnelles	Système constructif type	Fonction	Classification Uniclass	Corps d'état	DTU	Descriptif et Composants ¹
<p>B1 « assurer une fonction d'isolation thermique sur 1 m² de toiture sous forme de panneau semi rigide ou rouleau, ignifugé, d'épaisseur 100mm, mis en œuvre sous un revêtement d'étanchéité (pare pluie) pendant une annuité et sur une durée de vie typique de 50 ans »,</p> <p>B3 « assurer la fonction de supporter des éléments de plancher ou de toiture pendant une annuité représentant un volume de bois lamellé collé de 0,28 m³ »,</p> <p>B2 « assurer la fonction de couverture de toiture pendant une annuité »</p> <p>F1 « assurer la fonction de frein vapeur sur 1 m² en assurant une étanchéité à la diffusion de vapeur d'eau variable (0,3 à 20 m) sur toiture chevrons classique, pendant une annuité ».</p>	Rampant de toiture	<p>- effet structurel</p> <p>- thermique de l'enveloppe</p> <p>- contreventement</p> <p>- infiltrations</p>	G 24 & G2	<p>-Couverture / toiture terrasse /étanchéité</p> <p>-Isolation, cloison, plafonds</p>	31.3 & 40	<p>Descriptif rampant industriel: fourniture et mise en œuvre d'éléments de ferme industrielle en bois massif, assemblés par connecteurs métalliques, épaisseur 45x122 entraxe de 600, classe 2, avec isolant 120 mm laine de verre, pare vapeur sans scotch, parement plâtre sur rail métallique et panneau pare pluie type OSB 3 12 mm, lattage 27x40 mm bois massif classe 2. Up = 0,257 W/m²K.</p> <p>Composants rampant industriel : 2 éléments de ferme, 5 ml liteaux au m², 1 m² de plaque de plâtre avec accessoires 2 rails métalliques, 1 m² d'isolant thermique ep 120 mm, 1 m² de panneau OSB 3.</p> <p>Descriptif rampant massif : Fourniture et mise en œuvre d'un plancher cloué de 130 mm ep, classe 2, avec isolant ouate de cellulose insufflée à 40 kg/m³, frein vapeur scotché, écarteurs bois massif, film pare pluie HPV, lattage 27x40 mm bois massif classe 2, panneau support de couverture végétalisée MDF 18 mm. Up = 0,227 W/m²K.</p> <p>Composants rampant</p>

¹ Selon Batiprix – Le Moniteur, 2008 www.batiprix.com

						massif : 1 m ² plancher massif 130 mm ep 400 kg/m ³ , 4,8kg ouate de cellulose pour 1 m ² ep 120 mm à 40 kg/m ³ , 1 m ² film frein vapeur avec accessoires, 2 écarteurs 25x100 mm avec membrures, 1 m ² pare pluie HPV, 5 liteaux 27x40, 1 m ² panneau MDF 18 mm ep.
--	--	--	--	--	--	--

Tableau 90 : Proposition de décomposition du système constructif « rampant de toiture ».

Le système constructif « rampant de toiture » est caractérisé, pour chaque unité fonctionnelle décrite, par les critères techniques communs suivants :

Unité Fonctionnelle commune : B3, B3-3 et B3-5 « éléments porteurs »

Système constructif		B3-3 / B3-5
1.0	Unité de référence	1 m ² de rampant porteur
1.1	Quantité / UF	Bois massif : 20 montants 130x50 mm épicéa massif 400 kg/m ³ sec classe 2, 2 écarteurs 25x100 avec membrures, épicéa massif classe 2, 5 liteaux de 27 x 40 épicéa massif classe 2 Rampant industriel : 2 chevrons 45x122 mm éléments de ferme industrielle, entraxe 600 mm épicéa massif 400 kg/m ³ sec classe 2, 5 liteaux de 27x40 épicéa massif classe 2
1.2	Heure de main d'œuvre (préfa et pose)	Bois massif : 4,29 heures / m ² Rampant industriel : 1,2 heures / m ²
1.3	DVT	100 ans
1.4	Remplacements / Maintenance	0 sur DVT

Tableau 91 : Critères techniques des matériaux massifs des systèmes constructifs « rampant bois massif » et « rampant industriel »

Unité fonctionnelle commune : B2 « écran pare pluie »

Système constructif		B2-5 et B2-6
1.0	Unité de référence	1 m ² d'écran pare pluie souple ou rigide
1.1	Quantité / UF	Bois massif : 1,02 m ² d'écran souple en polyéthylène recyclé hautement perméable à la vapeur d'eau HPV, avec accessoires Rampant industriel : 1,05 m ² de panneau OSB 3 ou CTBH, avec accessoires
1.2	Heure de main d'œuvre (préfa et pose)	Bois massif : 0,33 heures / m ² Rampant industriel : 0,1 heure / m ²
1.3	DVT	50 ans
1.4	Remplacements / Maintenance	0 sur DVT

Tableau 92 : Critères techniques des matériaux d'étanchéité des systèmes constructifs « rampant bois massif » et « rampant industriel »

Unité fonctionnelle commune : B1-1 et B1-5 « isolation thermique »

Système constructif		B1-1 et B1-5
1.0	Unité de référence	1 m ² d'isolant thermique ep 120 mm, en rouleau, panneau ou vrac, densité 40 kg/m ³
1.1	Quantité / UF	Bois massif : 4,8 kg de ouate de cellulose insufflée 120 mm ep Rampant industriel : 4,8 kg de laine de verre déroulée 120 mm ep
1.2	Heure de main d'œuvre (préfa et pose)	Bois massif : 0,25 heures / m ² Rampant industriel : 0,12 heures / m ²
1.3	DVT	50 ans
1.4	Remplacements / Maintenance	Bois massif : 0 sur DVT / Rampant industriel : 3 sur DVT

Tableau 93 : Critères techniques des matériaux d'isolation thermique des systèmes constructifs « rampant bois massif » et « rampant industriel »

Unité fonctionnelle commune : F1-1 et F1-2 « étanchéité à l'air » : frein vapeur / pare vapeur et parement intérieur gypse

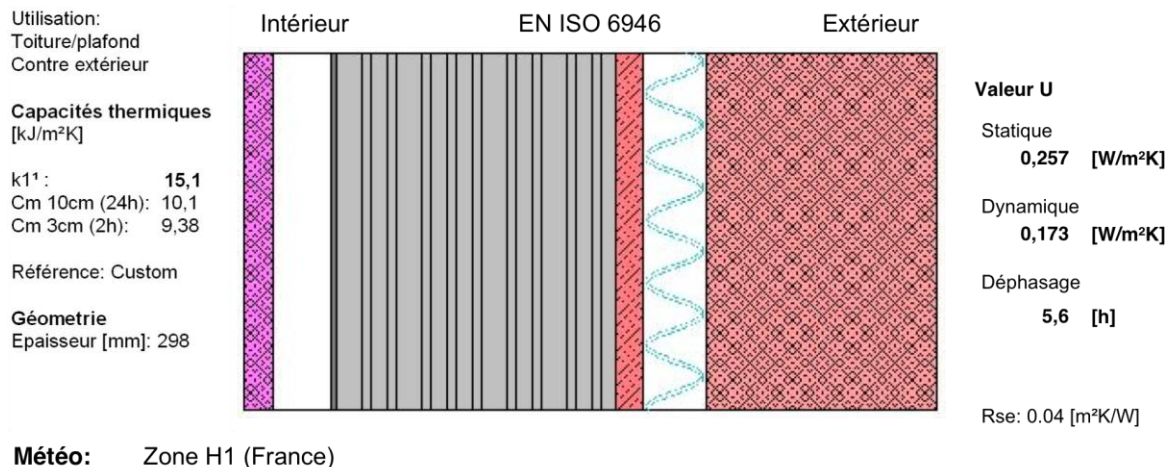
Système constructif		F1-1 et F1-2
1.0	Unité de référence	1 m ² de film d'étanchéité à l'air, pose en indépendance avec lés de recouvrement jointoyés par bande adhésive (F1-1 uniquement) 1 m ² de parement plaque de gypse (plaque de plâtre)
1.1	Quantité / UF	Bois massif : 1,02 m ² de frein vapeur polyéthylène (PE) régulateur de vapeur souple avec accessoires de pose Rampant industriel : 1,02 m ² de pare vapeur polyoléfine (FPO) ep 0,25 mm avec accessoires de pose, + 1 m ² de parement gypse plaque 13 mm avec 2 rails métalliques et accessoires
1.2	Heure de main d'œuvre (préfa et pose)	Bois massif : 0,33 heures / m ² Rampant industriel : 0,7 heures / m ²
1.3	DVT	50 ans
1.4	Remplacements / Maintenance	Bois massif : 0 sur DVT pour le frein vapeur / Rampant industriel : 3 sur DVT pour le pare vapeur, 3 sur DVT pour la plaque de plâtre

Tableau 94 : Critères techniques des matériaux d'étanchéité à l'air isolation thermique des systèmes constructifs « rampant bois massif » et « rampant industriel »

Une représentation donnant les valeurs thermiques de référence et le profil de condensation de vapeur dans un rampant de toiture bois massif et fermettes industrielles, est réalisée à l'aide du logiciel LESOSAI de simulation thermique d'une construction.

Pour le rampant de toiture fermettes industrielles :

rampant conventionnel avec ferme industrielle 2



Météo: Zone H1 (France)

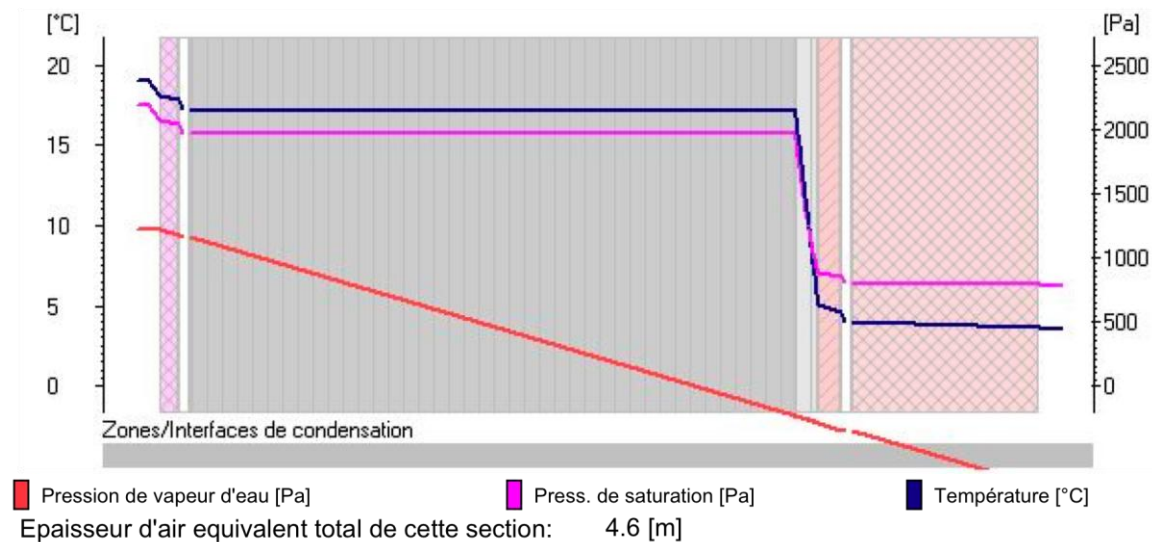
Section 1

RT: 3.89 [m²K/W]

Nom matériel	Epaisseur [cm]	L	H	[W/mK]	[-]	[kg/m³]	c [wh/kgK]	R [m²K/W]
Rsi								0,1
1 SIA 381/1 : Plâtre cartonné	1,3			0.210	5	900	0.222	0.062
2 CEN : Lame d'air	2,5			0.158	1	1,23	0.278	0.158
3 SIA 381/1 : Papier kraft + couche de PE	0,05			0.200	5000	1000	0.389	0.003
4 Isover : ISOCOMBLE	12			0.037	1	50	0.286	3.240
5 CEN : Panneau de copeaux de bois, léger	1,2			0.100	10	400	0.472	0.120
6 CEN : Lame d'air	2,7			0.168	1	1,23	0.278	0.081
7 CEN : Tuiles de terre cuite	10			1.000	10	2000	0.222	0.050
Rse								0,07

Figure 48 : Représentation d'un rampant fermettes industrielles, bibliothèque des systèmes constructifs, sous LESOSAI 6.0.

Graphique en épaisseur d'air équivalente pour: Janvier



La section est exempte de condensation

Figure 49 : Profil de condensation du rampant de toiture fermettes industrielles, sous LESOSAI 6.0.

Pour le rampant de toiture bois massif cloué :

rampant toiture BMC st denis3

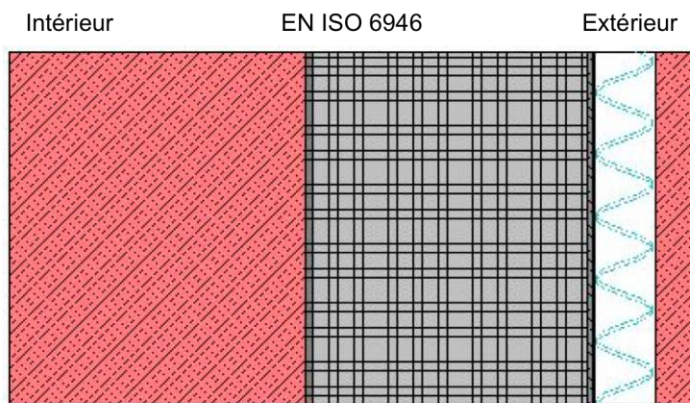
Utilisation:
Toiture/plafond
Contre extérieur

Capacités thermiques
[kJ/m²K]

k1' : 67,2
Cm 10cm (24h): 106
Cm 3cm (2h): 31,7

Référence: Custom

Géométrie
Epaisseur [mm]: 296



Valeur U
Statique 0,227 [W/m²K]
Dynamique 0,042 [W/m²K]
Déphasage 11,47 [h]
Rse: 0.04 [m²K/W]

Météo: Zone H1 (France)

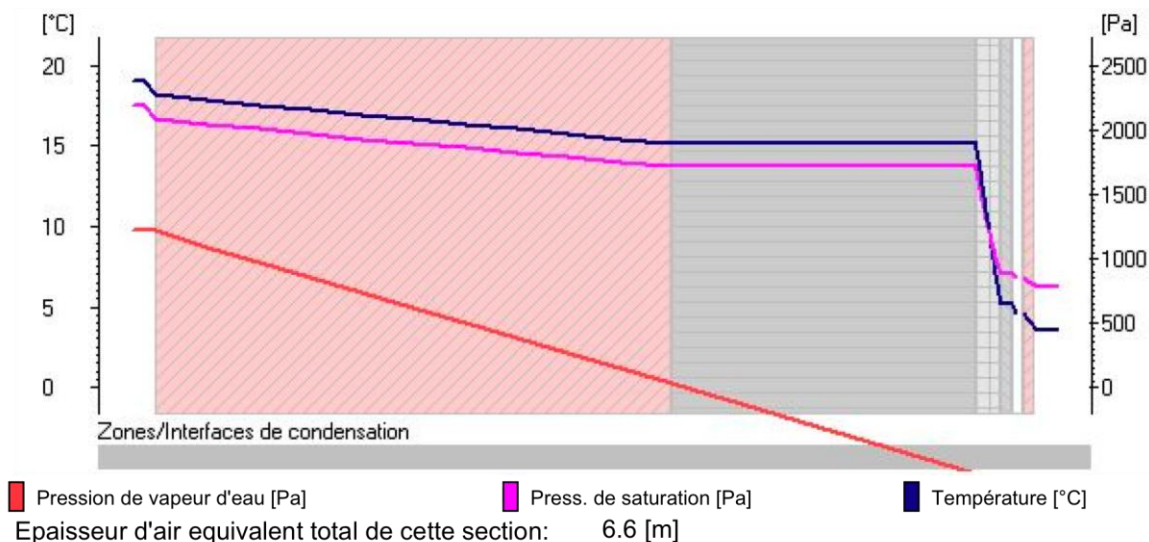
Section 1

RT: 4.41 [m²K/W]

Nom matériel	Epaisseur [cm]	L	H	[W/mK]	[-]	[kg/m³]	c [wh/kgK]	R [m²K/W]
Rsi								0,1
1 SIA 381/1 : Épicéa (15% d'humidité)	13			0.140	20	480	0.611	0.929
2 Custom : proclima DB+	0,023			2.300	10000	804	0.630	0.000
3 Custom : fine floc homotherm	12			0.039	1	40	0.597	3.080
4 Custom : Proclima Solitex UD	0,05			2.300	160	280	0.630	0.000
5 CEN : Lame d'air	2,7			0.166	1	1,23	0.278	0.081
6 SIA 381/1 : Panneau de fibres de bois, poreux	1,8			0.060	3	300	0.694	0.150
Rse								0,07

Figure 50 : Représentation d'un rampant bois massif type SPL, bibliothèque des systèmes constructifs, sous LESOSAI 6.0.

Graphique en épaisseur d'air équivalente pour: Janvier



La section est exempte de condensation

Figure 51 : Profil de condensation du rampant de toiture bois massif type SPL, sous LESOSAI 6.0.

Pour les deux systèmes constructifs étudiés, toiture à fermettes industrielles et rampant bois massif, les courbes « pression de vapeur d'eau réelle » et « pression de saturation » ne se croisent pas ; les constructions restent exemptes de condensation en conditions normales de température et de pression -moyennes annuelles de la zone H1 correspondant au Nord Est de la France et sans températures extérieures négativement excessives au cours d'un hiver normal.

4.2.3 Critères d'éco-différenciation permettant de distinguer les systèmes éco-construits des systèmes traditionnels

Pour légitimer le caractère environnemental des systèmes constructifs étudiés par rapport aux principes de l'éco-construction, nous reprenons la simplification proposée.

La construction de bâtiments à qualité environnementale résulte :

- De la prise en compte de la conception bioclimatique.
- Du choix de matériaux et produits éco-conçus appropriés.
- Du choix de systèmes de production d'énergie renouvelable pour couvrir les besoins restants.

Chaque système constructif (rampant conventionnel et rampant bois massif) est détaillé sous l'angle des critères simplifiés environnementaux, de santé et développement soutenable retenus, i.e. :

- Durée de vie typique,
- Renouvellements sur DVT,
- Type de matière première,
- Energie grise,
- Contenu carbone équivalent,
- Recyclabilité, toxicité,
- Ressource locale,
- Impact sociétal (heures de main d'œuvre).

Pour certaines données environnementales, nous faisons le choix de privilégier une source de données plutôt que plusieurs, certaines valeurs étant, pour le même matériau, radicalement différentes : les éco-devis du KBOB en Suisse sont toujours, à l'heure actuelle (juin 2009), les valeurs de référence en Europe pour les indicateurs énergie grise et carbone équivalent des matériaux et produits de construction.

Les éco-matériaux y sont largement référencés. A contrario, la base de données INIES recensant les fiches de déclaration environnementales et sanitaires (FDES) ne comporte pas d'éco-matériaux.

Un exemple d'écart entre données françaises et données suisses sur un même matériau de construction : un isolant laine de verre.

donnée Laine de verre Isover FR	Kg/m2	ep	kg/m3	énergie primaire en MJ /kg	Energie primaire totale en MJ/UF	kg Eq C / kg	énergie totale en kwh / UF	eq C / UF
données FDES Inies	2,85	0,12	28,50	82,60	235,41	2,74	0,76	7,81
données Ecodevis suisses KBOB	2,85	0,12	28,50	45,20	128,82	1,47	0,41	4,19
variation					106,59			3,62

Tableau 95 : Comparaison des données environnementales pour un isolant laine de verre ep 100 mm, densité 28,5 kg/m3, entre Eco devis du KBOB en Suisse et la FDES de la base de données INIES française.

Pour la même quantité de matière, soit 2,85 kg/ m2, ou UF de 100 mm d'épaisseur pour une densité de 28,5 kg/m3, l'écart est du simple au double (0,76 kWh pour les données françaises, 0,41 pour les données suisses, 4,19 eq. C pour les données suisses et 7,81 pour les données françaises).

Même si les vecteurs énergétiques suisses et français sont différents (électricité principalement d'origine nucléaire en France, électricité suisse majoritairement d'origine hydroélectrique) et peuvent donc expliquer les différences sur le poste « équivalent carbone », l'écart entre données d'énergie grise est très important, les procédés liés à la fabrication de la laine de verre étant identiques.

Compte tenu du fait que les données françaises sur les éco-matériaux sont quasi-inexistantes, nous privilégierons les données suisses issues du KBOB¹.

Nous pouvons donc proposer la décomposition des deux systèmes constructifs étudiés, rampant bois massif présumé relevant de la filière « éco-construction » et rampant à fermettes industrielles présumé relevant de la filière conventionnelle.

¹ KBOB, recommandations de l'office fédéral suisse de la construction et de la logistique (OFCL-KBOB), données 2009 des éco-bilans pour les produits et matériaux de construction. Disponibles sur www.eco-bau.ch

	nom	DVT	Rpts sur DVT	ressource renouvelable	énergie grise kwh/m ²	énergie grise kwh/m ² sur DVT	énergie grise totale sur DVT	contenu carbone équivalent kg eq C/m ²	contenu carbone équivalent kg eq C/m ² sur DVT	contenu carbone équivalent total sur DVT	recyclabilité en fin de vie	toxicité : 0 absence - 1 faible - 2 moyenne - 3 forte	ressource locale (nord pas de calais) 0 - non, 1- Oui	impact sociétal (heures de main d'œuvre par unité, préfabrication et pose), en heures de MO par unité fonctionnelle UF
comparaison de systèmes constructifs / unités fonctionnelles														
B3-3 B2-5 B1-1 F1-2	plaque de plâtre ep 13 mm	50	3	non en France (80 % gypse naturel)	20,24	60,72	80,96	4,29	12,88	17,17	oui, recyclage ou CET classe II	0	0 CORAMINE SAS (SAINT GOBAIN), Senlis, Oise	0,66
	pare vapeur	50	3	non, pétrole et matières plastiques liées	2,55	7,65	10,20	0,55	1,66	2,21	non (taux recyclage effectif < 10 %)	1	0, Saint Gobain Ecophon, Rantigny, Oise	0,04
	chevrons porteurs 45x122 entraxe 600	100	0	oui, bois de construction 100 % renouvelable en France	26,97	0,00	26,97	0,54	0,00	0,54	oui, sauf si bois traité avec produits de préservation, autrement incinération en CVE	1	0, bois résineux épicéa fourni par plates formes des Vosges ou de l'étranger (Allemagne, Russie..)	1
	isolant laine de verre ep 120 mm 40 kg / m3	50	3	non, silice extrudée (sable) mais possibilité d'utilisation de verre recyclé et de sable	60,31	180,94	241,26	7,06	21,17	28,22	non, CET classe II en l'absence de filières de recyclage en France	2	0	0,12
	panneau OSB 3 pare pluie ep 12 mm	50	0	oui à plus de 88 % (résidus de bois)	60,38	0,00	60,38	3,83	0,00	3,83	oui, valorisation possible spécifiquement en tant que matière première secondaire, plus généralement comme combustible	1	0, usine la plus proche Conti Sterling Belgique	0,1
	tasseau 27x40 épicéa massif classe 2	50	0	oui, bois de construction 100 % renouvelable dans le contexte de la forêt française	13,38	0,00	13,38	0,27	0,00	0,27	oui, sauf si bois traité avec produits de préservation, autrement incinération en CVE	1	0 bois résineux fourni par plates formes des Vosges ou de l'étranger	0,2
TOTAL					183,83	249,31	433,15	16,55	35,70	52,25				2,12

Tableau 96 : Synthèse de l'analyse environnement, santé et management durable du système constructif « rampant de toiture fermettes industrielles »

	nom	DVT	Rpts sur DVT	ressource renouvelable	énergie grise kwh/m ²	énergie grise kwh/m ² sur DVT	énergie grise totale sur DVT	contenu carbone équivalent kg eq C/m ²	contenu carbone équivalent kg eq C/m ² sur DVT	contenu carbone équivalent total sur DVT	recyclabilité en fin de vie	toxicité : 0 absence - 1 faible - 2 moyenne - 3 forte	ressource locale (nord pas de calais) 0 - non, 1- Oui	impact sociétal (heures de main d'œuvre par unité, préfabrication et pose), en heures de MO par unité fonctionnelle UF
B3-5 B2-6 B1-5 F1-1	rampant bois massif cloué ep 130 mm 400 kg/m ³	100	0	oui bois de construction 100 % renouvelable en France	318,75	0,00	318,75	6,38	0,00	6,38	oui, recyclage intégral possible puisque bois non traité	0	1, SPL à Audruicq, France	3,6
	frein vapeur hydrovariable DB+	50	0	oui partiellement (50 %) papier recyclé et polyéthylène (pétrochimie)	4,05	0,00	4,05	0,32	0,00	0,32	oui, recyclage intégral puisque déjà constitué de matière recyclée (polyéthylène)	1	0, usine en Allemagne, ou en Suisse	0,33
	ouate de cellulose vrac ep 120 mm 40 kg/m ³	50	0	oui, papier journal recyclé provenant de résidus de bois	13,34	0,00	13,34	1,89	0,00	1,89	oui, recyclage intégral possible puisque déjà constitué de matière première secondaire recyclée	1	0, pas d'usine proche, Allemagne pour Isofloc ou Angleterre pour Excell	0,25
	écarteurs bois massif 25 x100 avec membrures	100	0	oui, bois de construction 100 % renouvelable en France	24,77	0,00	24,77	0,50	0,00	0,50	Oui, recyclage intégral possible puisque bois non traité	1	1, SPL à Audruicq, France	0,6
	pare pluie souple en polyéthylène recyclé HPV solitex +	50	0	non, pétrochimie (polyéthylène même si recyclé)	4,33	0,00	4,33	1,00	0,00	1,00	oui, recyclage intégral possible puisque déjà constitué de matière recyclée (polyéthylène)	1	0, pas d'usine proche, Allemagne ou Suisse	0,1
	tasseau 27x40 épicea massif classe 2	50	0	oui, bois de construction 100 % renouvelable en France	13,38	0,00	13,38	0,27	0,00	0,27	oui, recyclage intégral possible puisque bois non traité	0	1, SPL à Audruicq, France	0,09
TOTAL					378,62	0,00	378,62	10,34	0,00	10,34				4,97

Tableau 97 : Synthèse de l'analyse environnement, santé et management durable du système constructif « rampant de toiture bois massif cloué »

Les différences très importantes entre matériaux conventionnels et matériaux considérés comme écologiques ou relevant de la filière éco-construction tiennent essentiellement à deux critères : la durabilité effective des matériaux et les choix techniques de mise en œuvre.

Les matériaux conventionnels sont dans l'ensemble performants au temps 0, c'est à dire lors de leur mise en œuvre initiale mais sont généralement peu durables et ne peuvent être réparés.

Arrivés en fin de vie, il faut les jeter et les remplacer complètement. C'est par exemple le cas des fenêtres en plastique, évoqué précédemment, ou celui des doubles vitrages. Dans notre exemple, c'est le cas de la laine de verre (3 renouvellements sur 50 ans) et des matériaux liés : pare vapeur et parement gypse de finition.

Il s'agit en fait de s'assurer que les performances du bâti restent les mêmes pendant au moins 50 années d'usage du système constructif, et, qui plus est, du bâti dans sa globalité.

Souvent mal mise en œuvre par méconnaissance des modes de faire, dits de « l'art », les matériaux conventionnels sont au final plus chers d'utilisation que les matériaux écologiques à mise en œuvre identique.

Nous avons donc indiqué une durée de vie typique ou théorique des matériaux au sein du système constructif et un nombre de remplacements jugés cohérents compte tenu des informations recueillies sur ces matériaux et leur pérennité / durabilité effective dans le temps.

La laine de verre, une plaque de plâtre et un pare vapeur sont renouvelés trois fois sur 50 ans non seulement en raison de leur mauvaise mise en œuvre généralement constatée au sein du système constructif mais également de leurs caractéristiques intrinsèques.

Les choix techniques ont également une importance capitale sur le long terme : en éco-construction raisonnée, les choix techniques ne sont plus faits par rapport à la facilité industrielle ou commerciale de distribution d'un produit mais par rapport à sa performance et à sa durabilité une fois mis en œuvre, même si cela demande plus de temps, ce qui n'est d'ailleurs pas toujours exact.

En comparant les deux rampants et leurs matériaux constitutifs, nous pouvons donner les analyses suivantes :

- **Ressources renouvelables** : le rampant bois massif est majoritairement constitué de matériaux de construction élaborés à partir de matières premières renouvelables (5 réponses positives sur 6 matériaux), tandis que le rampant conventionnel qui n'utilise que peu de bois de construction en volume, est constitué à 50 % de matériaux non élaborés à partir de ressources renouvelables (3 réponses négatives sur 6).
- **Contenu énergétique ou énergie grise** : contrairement aux idées reçues, un bois de construction, qu'il soit utilisé en rampant conventionnel (fermettes industrielles) ou en rampant massif, nécessite quand même une quantité non négligeable d'énergie pour être transformé et élaboré en matériau de construction. Les étapes les plus énergétivores, hors transport routier, concernent le sciage, le séchage et le rabotage, qui nécessitent des Kwh électriques. Le rampant bois massif utilise nettement plus de bois en volume que le rampant conventionnel ; par conséquent, son contenu énergétique est plus élevé : 318,75 kwh contre 26,97 kwh par UF. Les autres matériaux sont nettement moins énergétivores pour le système rampant massif que pour le rampant conventionnel, notamment la ouate de cellulose par comparaison à la laine de verre (13,34 kwh contre 60,31 kwh en contenu énergétique initial).

- **Contenu carbone** : en ce qui concerne le contenu carbone équivalent des deux systèmes constructifs, le rampant massif est nettement moins émetteur que le rampant conventionnel, en temps initial (t0) mais surtout en durée de vie typique à 50 ans : 10,34 kg eq C contre 16,55 kg eq C en durée initiale, 10,34 kg eq C contre 52,25 kg eq C en durée de vie globale. Ces valeurs sont données sans prise en compte de la notion de matériaux « puits de carbone » développée par la suite.
- **Recyclabilité en fin de vie** : les matériaux constitutifs du rampant bois massif sont intégralement recyclables en fin de vie, compte tenu non seulement de leurs propriétés initiales mais également des filières et technologies disponibles aujourd'hui (6 réponses positives sur 6) ; les matériaux du rampant conventionnel sont plutôt valorisables que recyclables ; deux matériaux laine de verre et pare vapeur se sont pas recyclables en l'état.
- **Toxicité** : le rampant bois massif est majoritairement constitué de matériaux peu ou non toxiques : 4 réponses « faible » et 2 réponses « non toxique » sur 6, tandis que le rampant conventionnel présente quant à lui des matériaux à toxicité moyenne ou faible : 1 réponse « moyenne », 4 réponses « faible » et 1 réponse « non toxique ».
- **Ressources locales** ou « sourcing géographique préférentiel » : Trois matériaux constitutifs du rampant massif sur 6 sont fabriqués à partir de matières premières de la région Nord Pas De Calais (rampants bois massif, écarteurs et tasseaux). Aucun matériau constitutif du rampant conventionnel n'est issu d'une filière de transformation / production régionale-0 sur 6-.
- **Impact sociétal** : Pour être produit et mise en œuvre dans un contexte de développement socio économique de territoire, le rampant bois massif valorise la main d'œuvre à hauteur de 4,97 heures par UF contre 2,12 heures par UF pour le rampant conventionnel.

En synthèse, le tableau ci dessous présente les conclusions provenant de l'analyse des critères de développement soutenable, dont ceux dédiés à l'environnement et à la santé, pour les deux systèmes constructifs rampant conventionnel et rampant bois massif.

Critères	Rampant conventionnel fermettes industrielles	Rampant bois massif
Ressources renouvelables	83 % MP non renouvelable majoritairement non constituée de matériaux fabriqués à partir de matières renouvelables	50 % MP renouvelable Majoritairement constitué de matériaux fabriqués à partir de matières renouvelables
Energie grise sur DVT	433 kwh / UF	378 kwh/ UF
Contenu carbone sur DVT (hors notion de puits de carbone)	52,25 kg eq C	10,34 kg eq C
Recyclabilité en fin de vie	Majoritairement non recyclables, mais valorisables	100 % recyclables
Toxicité	Toxicité moyenne à faible	Toxicité faible à nulle
Ressources locales	100 % non source localement	50 % source localement (< 200 km, région nord pas de calais)
Impact sociétal	2,12 heures de main d'oeuvre	4,97 heures de main d'oeuvre

Tableau 98 : Comparaison des critères de développement soutenable pour les deux systèmes constructifs étudiés

La comparaison des énergies grises et du contenu carbone des matériaux des deux systèmes constructifs étudiés peut être réalisée ainsi :

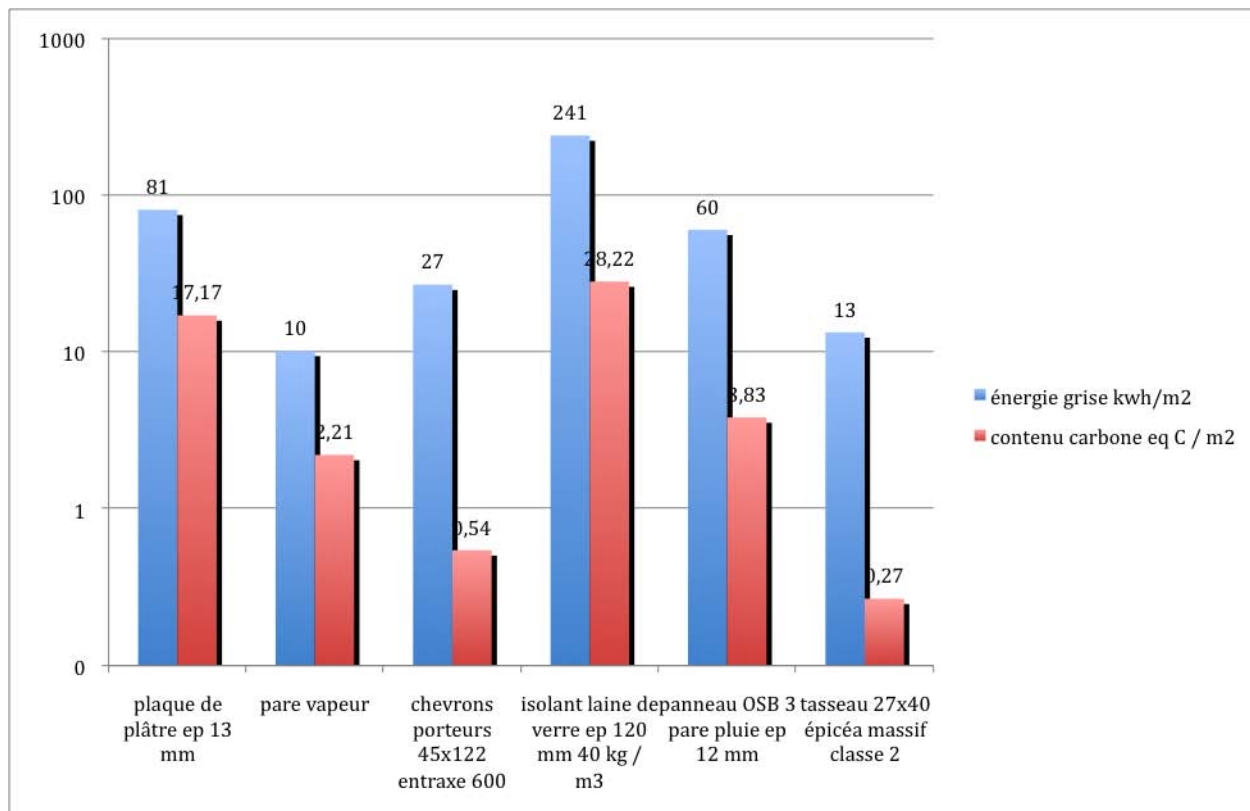


Figure 52 : Comparaison des contributions environnementales des matériaux du système constructif « rampant à fermettes industrielles »

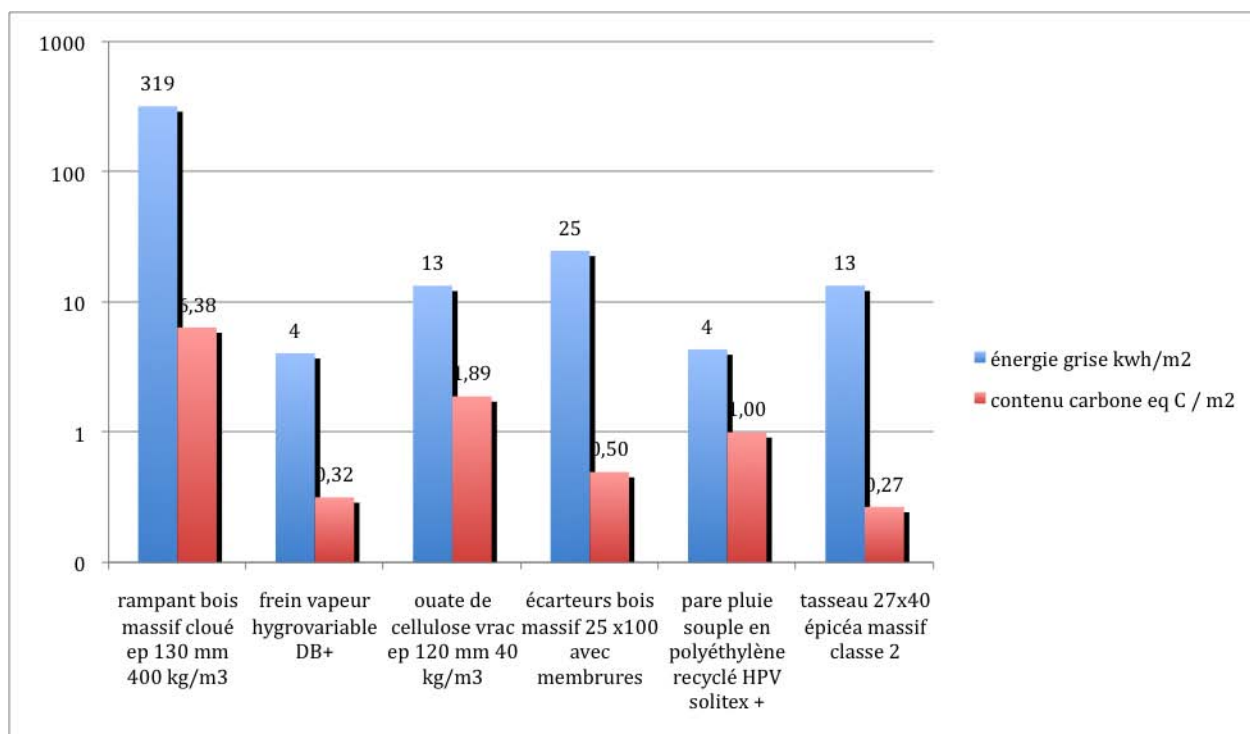


Figure 53 : Comparaison des contributions environnementales des matériaux du système constructif « rampant bois massif cloué »

Dans le système constructif « rampant à fermettes industrielles », les matériaux les plus impactants du point de vue dépense énergétique (énergie grise) sont dans l'ordre : la laine minérale, la plaque de plâtre et le panneau OSB (241, 81 et 60 kwh /UF). Les moins impactants sont logiquement ceux utilisés en quantités très faibles (pare vapeur) et /ou les matériaux bio-sourcés (le bois chevrons porteurs et liteaux de couverture) valorisant les ressources renouvelables.

Dans le système constructif « rampant bois massif », les matériaux les plus impactants d'un point de vue dépense énergétique (énergie grise) sont dans l'ordre : le bois massif cloué, les écarteurs, les tasseaux de couverture et l'isolant ouate de cellulose.

Le bois massif cloué, constitué de bois raboté séché à l'air libre, représente le premier poste de dépense énergétique, ce qui s'explique facilement par la quantité de bois utilisée : 0,13 m³ de bois par UF, même si le bois est peu énergétivore.

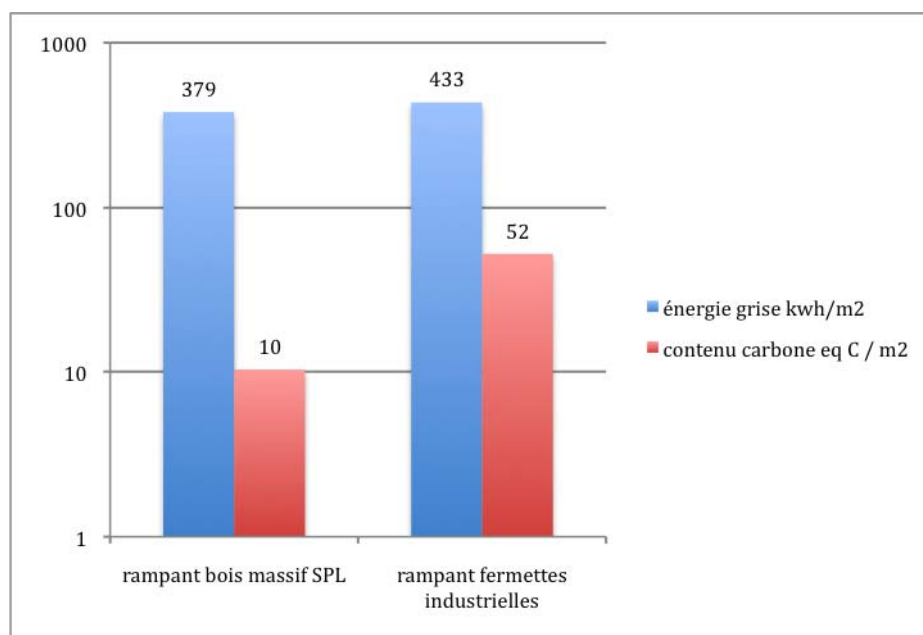


Figure 54 : Comparaison des contributions environnementales des systèmes constructifs « rampant bois massif cloué » et « rampant fermettes industrielles »

En matière d'émission de gaz à effet de serre, traduits en équivalent carbone eq C, l'isolant laine de verre (28,22 kg) est toujours le plus émetteur au sein du système rampant conventionnel, suivi de près par la plaque de plâtre (17 kg) et le panneau d'OSB (3,8 kg).

Pour le système rampant bois massif, le bois massif présent en quantité importante (0,13 m³, 450 kg/m³) représente le matériau le plus émetteur de carbone (6,38 kg), suivi par la ouate de cellulose (1,89 kg) et le pare pluie souple extérieur (1kg).

Si on compare les deux systèmes constructifs, le rampant fermettes industrielles nécessite plus d'énergie pour être fabriqué que le rampant bois massif (54 kwh / UF) et émet 42 kg d'Eq C supplémentaires. Les matériaux conventionnels laine de verre, OSB, plaque de plâtre et pare vapeur sont particulièrement contributeurs.

Le bilan environnemental des systèmes constructifs « rampants » présentés ne tient pas compte de la notion de « puits de carbone ». Pourtant, certains matériaux et produits de

construction sont constitués de matière première renouvelable d'origine bio-sourcée, par exemple le bois, le chanvre, le lin, le liège, la fibre de coco, le bambou, le jute.

Une matière première bio-sourcée stocke du CO₂ par le processus de photosynthèse. En fin de vie, dans le cas de durées de vie courtes, le matériau peut être :

- soit valorisé énergétiquement, auquel cas le CO₂ stocké pendant sa durée de vie est relargué dans l'atmosphère,
- soit recyclé en tant que matière première secondaire, ce qui allonge la durée de vie de stockage du CO₂ séquestré dans le premier matériau.

Le cas du bois est le plus simple à appréhender : l'arbre pousse par photosynthèse, stocke du CO₂ en grandissant et ne le relargue qu'au bout d'une durée de vie relativement longue (50 à 200 ans, voire plus, pour les très vieux arbres).

Utilisé dans la construction, ce bois d'œuvre et d'ouvrage devient matériau de construction, stockeur de CO₂ pour une période d'immobilisation elle aussi relativement longue, eu égard à la durée de vie humaine de 100 ans (DVT donnée pour le bois d'œuvre mis en œuvre dans des conditions correctes de température et d'humidité).

L'Agence de Développement et de Maîtrise de l'Énergie (ADEME), donne un ratio moyen de 500 kg d'eq C par tonne de bois utilisé en tant que matériau de construction. Le bois stocke donc 500 kg d'eq C / 1000 kg de matière.

Le calcul « puits de carbone » est simple : pour le bois massif, par exemple, 130 mm de rampant bois massif représentent pour 1 m² d'unité fonctionnelle 58,5 kg de matière « bois » (densité moyenne de 450 kg/ m³ pour l'épicéa sec, soit 0,13 m³ x 450 = 58,5 kg), 1000 kg de bois stockent 500 eq C, 58,5 kg stockent donc 29,25 kg eq C.

On peut donc tenir compte du CO₂ stocké par le matériau bois dans le bilan carbone.

Pour le rampant bois massif, le nouveau bilan carbone est le suivant :

Rampant de toiture Chenelet	énergie grise totale / UF, en kwh / UF	eq C / UF en kg de C sur DVT	matériaux puits de carbone eq C / UF	bilan carbone total
bois massif cloué épicéa séché à l'air libre, raboté	319	6,38	-29,25	-22,87
frein vapeur DB+	4	0,32		0,32
isolant ouate de cellulose insufflée 40 kg/m ³ , 120 mm	13	1,89		1,89
écarteurs bois massif	25	0,50	-2,25	-1,76
pare pluie souple Proclima Solitex +	4	1,00		1,00
tasseaux bois massif épicéa classe 2 27 x 40, 5 ml au m ²	13	0,27	-1,22	-0,95
total	379	10,34	-32,72	-22,37

Tableau 99 : Bilan carbone des matériaux du système constructif « rampant de toiture bois massif » tenant compte du stockage « puits de carbone » des matériaux bio-sourcés et renouvelables.

Pour le rampant conventionnel, le nouveau bilan carbone est le suivant :

rampant toiture conventionnelle	énergie grise totale / UF, en kwh / UF	eq C / UF en KG de C sur DVT	matériaux puits de carbone	bilan carbone total
plaque de plâtre	81	17,17		17,17
filme pare vapeur recouvrement horizontal et vertical	10	2,21		2,21
suspente métallique et rail supports plaque de plâtre entraxe 600 mm	0	0,00		0,00
laine minérale semi rigide épaisseur 120 mm	241	28,22		28,22
arbalétrier / chevron en bois massif 45 x 122 mm, élément de ferme industrielle entraxe 600 mm, classe d'emploi 2	27	0,54	-2,475	-1,93
écran rigide de sous toiture non porteur, panneau OSB 3 ou CTBH, épaisseur 12 mm, classe d'emploi 2	60	3,83		3,83
litage bois massif section 27x40 mm, classe d'emploi 2, entraxe selon pureau de 200 mm	13	0,27	-1,215	-0,95
total	433	52,25	-3,69	48,56

Tableau 100 : Bilan carbone des matériaux du système constructif « rampant de toiture conventionnel » tenant compte du stockage « puits de carbone » des matériaux bio-sourcés et renouvelables.

Les données concernant l'énergie grise ne changent pas.

Le nouveau bilan carbone comparatif tenant compte de la notion de « puits de carbone » montre que le rampant conventionnel « émet » 48,56 kg Eq C pour une UF sur 50 ans de durée de vie typique (DVT) tandis que le rampant bois massif « stocke » quant à lui 22 kg Eq C.

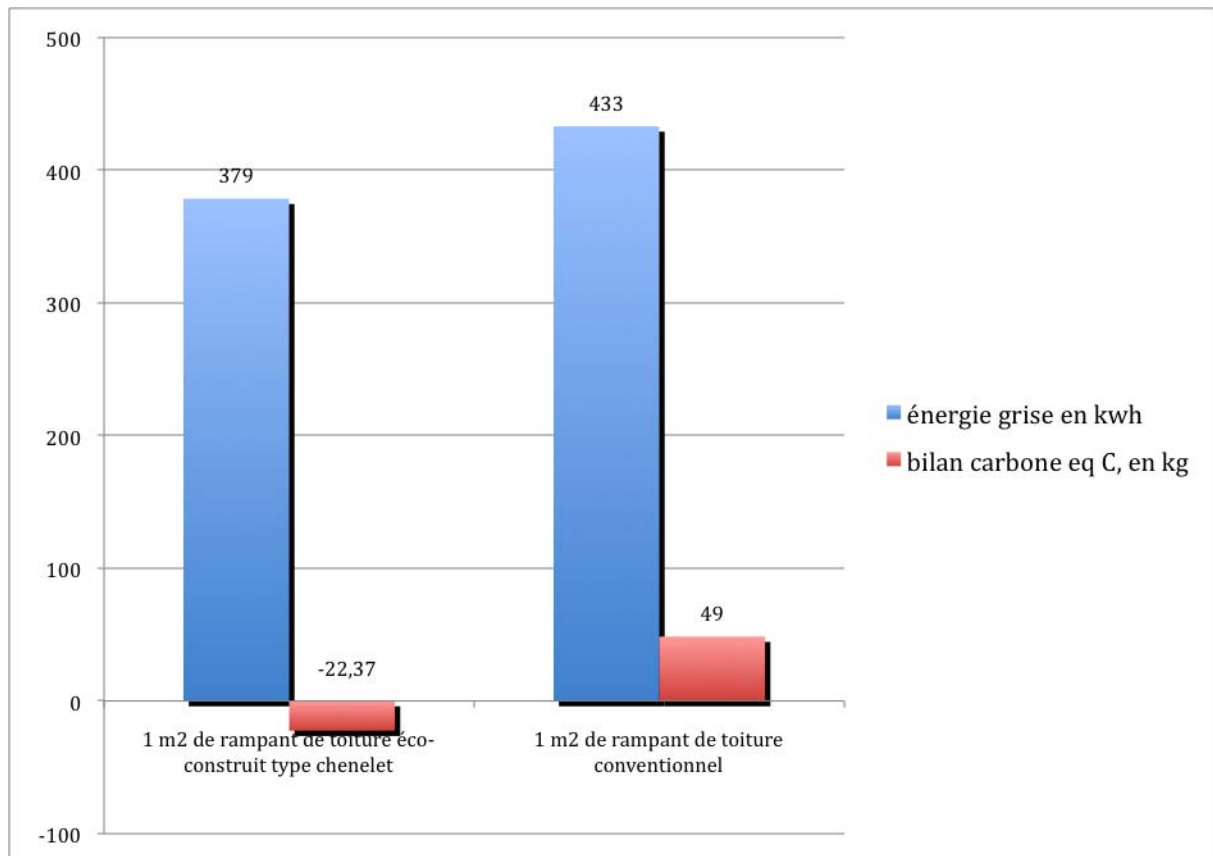


Figure 51 : Comparaison des contributions environnementales des systèmes constructifs « rampant bois massif cloué » et « rampant fermettes industrielles », en tenant compte des matériaux « puits de carbone ».

Dans le contexte actuel le Grenelle de l'Environnement pour le secteur du bâtiment favorise deux axes, i.e. la réduction des consommations d'énergie au m² habitable (principalement chauffage et eau chaude sanitaire) et l'utilisation de matériaux et produits à faible empreinte environnementale ; le rampant de toiture bois massif éco-construit se positionne largement, sur le critère émission de gaz à effet de serre en équivalents Carbone (eq C / kg), devant le rampant de toiture conventionnel à fermettes industrielles.

4.2.4 Analyse économique et financière.

Les critères économiques des deux systèmes constructifs analysés sont ensuite déterminés à partir des données de la base française de référence pour caractériser les prix des systèmes constructifs « Batiprix » (www.batiprix.com).

Pour le rampant bois massif, les prix sont issus directement de l'entreprise SPL à Audruicq, basés sur l'offre remise en 2007 pour la construction des logements écologiques de St Denis en région parisienne.

L'explication des prix donnés est la suivante :

- Prix sec déboursé : fournitures + main d'œuvre + charges sociales sur salaires.
- Prix de revient : coefficient multiplicateur pour frais généraux, coeff moyen de 1,34.
Prix sec déboursé x 1,34 = prix de revient.
- Prix de vente : prix de revient x coefficient multiplicateur pour bénéfices et aléas, en moyenne de 1,11.

Le prix de vente final est donné en € HT, il est égal à : prix sec déboursé x 1,34 x 1,111.
Les matériaux et matériels sont considérés comme « rendus chantier », les temps moyens sont donnés en heures ramenées à un ouvrier moyen.

Pour les prix donnés par l'entreprise Scierie Palettes du Littoral, les prix sont directement exprimés en prix de vente. L'entreprise marge peu sur les matériaux achetés à l'extérieur (exemple de la ouate de cellulose) et préfère valoriser la main d'œuvre, la plupart des ouvriers spécialisés en bâtiment étant en contrats à durée déterminée d'insertion (CDDI).

Les critères économiques des deux systèmes constructifs sont les suivants :

Systèmes constructifs		B3-3 B2-5 B1-1 F1-2 rampant fermettes industrielles	B3-5 B2-6 B1-5 F1-1 rampant bois massif
2.1	Coût « matériaux » d'une unité fonctionnelle		
	plaque de plâtre contre cloison de doublage, finition joints entre plaques, vissée sur montants métalliques, compris rails entraxe 600 mm, fourrures, vis ttpc 35, bandes, joints et enduit	9,49 €	0 €
	film pare vapeur recouvrement horizontal et vertical, 0,25 mm et bandes adhésives	2,86 €	
	frein vapeur proclima DB+ toiture et accessoires		3,34 €
	laine minérale semi rigide épaisseur 120 mm, non revêtue kraft 1 face	6,16 €	
	isolation de rampants de toiture en ouate de cellulose, ep 120 mm, densité 40 kg/m3 (14 € le sac de 13,6 kg, 41,16 € le m3)		4,93 €
	arbalétrier / chevron en bois massif 45 x 122 mm, élément de ferme industrielle entraxe 600 mm, classe d'emploi 2	52 €	
	rampant bois massif cloué ep 130 mm		44,26 €
	caissons pour isolation par l'extérieur sur rampants bois massif, composés d'écarteurs préfabriqués en atelier		19,79 €
	écran rigide de sous toiture non porteur, panneau OSB 3 ou CTBH, épaisseur 12 mm, classe d'emploi 2	6€	
	pare pluie souple proclima solitex + sous toiture avec accessoires de pose		3,15 €
	litage bois massif section 27x40 mm, classe d'emploi 2, entraxe selon pureau de 200 mm, 3 ml au m2, 0,48 € au ml avec clous, 3 ml au m2	1,57 €	1,57 €
	Coût total matériel		
	prix déboursé sec (MO, charges sociales, fournitures principales et annexes)	78,08 €	
	prix de vente compris (MO, charges sociales, fournitures, frais généraux et multiplicateur bénéfiques)		77,04 €
2.2	Coût main d'œuvre pour une unité fonctionnelle		
	coût heure de MO	variable de 23,61 € à 26,16 € en fonction des corps d'état	30 € l'heure de pose, 25 € l'heure de préfabrication
	heures de MO totales pour une UF	1,75	5
	dont heures préfa	0	3,5

	<i>dont heures pose</i>	1,75	1,5
	Coût préfa + mise en œuvre	43,16 € (déboursé)	132,04 € (prix de vente)
2.3	Coût total matériaux + main d'œuvre		
	Coût déboursé	121,24 €	
	Coût de vente		209,08 €
2.4	Coût déboursé ou « prix de revient » (34 %)	162,46 €	
2.5	Coût de vente ou « prix de vente » ou coût d'investissement initial (11%)	180,49 €	
	Prix de vente € HT	180,49 €	209,08 €
2.6	Coût de maintenance		
	Coûts de démantèlement	42,18 €	0 €
	<i>dont unitaire</i>	14,06 €	
	<i>sur DVT : 3 démantèlements</i>	42,18 €	
	Coûts de remplacement du système constructif sur DVT	227,83 €	0 €
	<i>dont plaque de plâtre, bandes jointoiment, enduit de lissage</i>	149,31 €	
	<i>dont film pare vapeur avec accessoires</i>	24,33 €	
	<i>dont laine minérale semi rigide</i>	54,20 €	
	Coûts totaux de maintenance	270,01 €	0 €
2.7	Coûts de fonctionnement	0 €	0 €
	Coûts totaux de fonctionnement sur DVT	0 €	0 €
2.8	Coût global ou total non actualisé (somme des coûts initiaux et intermédiaires en cycle de vie)	450,5 €	209,08 €
2.9	Coût évité brut	241,42 €	

Tableau 101 : Critères économiques des deux systèmes constructifs analysés : rampant conventionnel et rampant bois massif.

Les prix de vente représentant l'investissement initial (2.5) sont de 180,49 € HT pour le rampant conventionnel contre 209,08 € pour le rampant bois massif relevant de l'éco-construction, pour une unité fonctionnelle de 1m² de rampant hors éléments d'étanchéité / couverture.

En ajoutant les coûts de maintenance, entretien et fonctionnement pendant le cycle de vie du système constructif (50 ans), on obtient un coût global non actualisé de 450,5 € pour le système conventionnel fermettes industrielles et de 209,08 € pour le rampant bois massif.

La différence entre coûts globaux est de 241,42 € ou « coût évité brut ».

Compte tenu des valeurs dont nous disposons à cette étape du raisonnement, il est possible d'indiquer certains critères financiers pour les deux systèmes constructifs étudiés : les primes ou subventions sont considérées comme inexistantes pour de l'habitat neuf, en année 0 d'installation.

Systèmes constructifs	C1-1	C1-4	
3.0	Taux d'actualisation des valeurs monétaires	4,58 %	4,58 %
3.1	Gains actualisés	NC	NC
3.2	Temps de retour sur investissement simple	NC	NC
3.3	Prime / Subvention		
	Coût matériel initial (prix de vente) hors main d'œuvre en € HT /m ²	116,24 € (78,04 € prix déboursé sec pour rampant conventionnel)	77,04 €
	Crédit d'impôt ou primes	0 €	0 €
	Coût réel matériel après crédit d'impôt	116,24 €	77,04 €
3.4	Ratio coûts / bénéfiques	NC	NC
3.5	Valeur actuelle nette (VAN)	NC	NC

Tableau 102 : Critères financiers des systèmes constructifs étudiés

Les critères non complétés le seront au fur et à mesure du raisonnement en coût global actualisé et de l'application des différentes pondérations.

Nous avons donc décrit les performances et classé les éléments des deux systèmes constructifs étudiés, notamment la définition des unités fonctionnelles, les normes et réglementations de référence, la description des matériaux associés (figures 42 et 43).

Les trois familles de critères techniques, économiques et financiers ont été complétées en fonction des informations disponibles à cette étape du raisonnement.

La caractérisation environnementale et santé a été réalisée et a notamment permis de mettre en évidence les critères simplifiés ressources renouvelables, contenu énergétique, contenu carbone équivalent, « sourcing » géographique préférentiel et impact sociétal.

D'un point de vue technique, en première approche, les deux systèmes constructifs sont équivalents en termes de performances premières (performances techniques et thermiques).

D'un point de vue économique, en investissement initial non actualisé, un rampant de toiture conventionnel type charpente à fermettes est moins cher de 30 € qu'un rampant bois massif version éco-construction.

Ramenés à une toiture de 100 m² équivalente, soit 100 unités fonctionnelles telles qu'étudiées, ces 30 € unitaires de surcoûts ne représentent pas moins de 30x100 = 3000 €.

D'un point de vue financier, un critère sur les cinq présentés (tableau 36 paragraphe 3.2) est complété. Il s'agit du taux d'actualisation des valeurs monétaires, évalué en moyenne (base Euribor novembre 2008) à 4,58% sur 360 jours.

Le raisonnement est maintenant complété par une pondération avec certains critères complémentaires, pondération mise en évidence au paragraphe 3.5 « pondérations des critères techniques, économiques et financiers ».

4.3 Choix et utilisation de pondérations appropriées aux systèmes constructifs rampant conventionnel à fermettes industrielles et rampant bois massif

Les différents types de pondérations proposées précédemment (chapitre III, paragraphe III-5) pour l'analyse des systèmes constructifs « menuiseries extérieures » sont reprises, à savoir :

- 1. la performance thermique simple des systèmes étudiés,
- 2. les prescriptions de la réglementation thermique actuelle,
- 3. les SMQE et autres systèmes de certification énergétique,
- 4. les utilisateurs finaux assurés pour leur mise en œuvre,
- 5. l'indicateur environnemental simplifié : émissions carbone équivalent liées aux émissions de gaz à effet de serre,
- 6. l'indicateur sociétal « heures de travail générées » par la mise sur le marché des systèmes constructifs.

Les pondérations que nous choisissons d'utiliser pour notre étude des systèmes constructifs « rampants de toiture » sont spécifiquement les indicateurs 3-5-6 :

- la pondération par les SMQE ou référentiels de certification basse énergie,
- les indicateurs environnementaux simplifiés : recyclabilité, émissions carbone équivalent et sourcing local,
- l'indicateur sociétal « heures de travail générées ».

Pondération 1

La pondération 1, performance thermique simple, ne permet pas de différencier le rampant conventionnel du rampant bois massif.

Le calcul réalisé sous LESOSAI6.0 (figures 44 et 46 paragraphe IV-2-2) donne une valeur de déperdition surfacique « U » des rampants de : 0,257 W/m²K pour le rampant conventionnel et de 0,227 W/m²K pour le rampant bois massif.

Traduits en euros de chauffage économisés par la comparaison du pouvoir isolant (limitation des déperditions thermiques) des deux parois en contact avec l'extérieur (un rampant de toiture est considéré d'un point de vue thermique comme une paroi en contact avec l'extérieur ; l'économie est de 0,12 € par an, soit 6 € sur 50 ans, donc négligeable

rampant conventionnel fermettes industrielles	
Surface à isoler	1 m²
Durée de vie de l'investissement	50 années
U	0,26 W/m ² .K
U total (U * surface à isoler)	0,26 W/K
Degré jours normaux (Lille Lesquin)	2993,00 K.Jours
Ratio Degj_équiv/ Degj_normaux	0,80
Degrés jours équivalents	2394,40 K.Jours
Déperditions annuelles par le système ou l'équipement	615,36 W.Jours/an
Déperdition par an	14,77 kwh/an
Déperdition par m ² et par an	14,77 kwh/m ² .an
rampant bois massif	
Surface à isoler	1,00 m ²

Durée de vie de l'investissement	50,00	années	
U	0,23	W/m ² .K	
U total (U * surface à isoler)	0,23	W/K	
Degrés jours normaux (lille Lesquin)	2993,00	K.Jours	
Ratio Degj_équiv/ Degj_normaux	0,80		
Degrés jours équivalents	2394,40	K.Jours	
Déperditions annuelles par le système menuiserie	543,53	W.Jours/an	
Déperdition par an	13,04	kwh/an	
Gain en %	11,67	%	
Déperdition restante par m ² et par an	13,04	kwh/m².an	
Economies			
Economie d'énergie par année	1,72	kwh/an	
Economie sur la durée de vie de l'investissement	86,20	kwh	
Equivalence selon énergie par an			soit par unité
fioul	0,17	litres	0,17
gaz naturel	0,15	m ³	0,15
gaz propane	0,12	kg	0,12
bois bûche	0,00	stères	0,00
bois pellet		m ³	0,00
électricité	0,67	Kwh	0,67
Economie en €			
Prix du kwh utile de chaleur en 2008 (kwh gaz, août 2008)	0,07	€	
gain annuel hors abonnement	0,12	€	
Taux d'actualisation	4,56	%	
Accroissement prix énergie utilisée	4,00	%	
intérêts emprunt Isolto	0,00	%	
Carbone			
TEP			
gain par an	0,00	tep	
gain pour durée de vie de l'investissement	0,01	tep	

Tableau 103 : Comparaison du pouvoir d'isolation des deux rampants de toiture, traduit en euros économisés en fonction du mode de chauffage du logement (gaz naturel).

L'économie d'énergie entre les deux rampants étant négligeable, la pondération n°1 « performance thermique simple » n'est pas pertinente dans ce cas.

Pondération 2

La pondération 2 « réglementation thermique existante » n'apporte elle aussi aucune précision pertinente permettant de différencier les deux systèmes étudiés : les deux rampants répondent quasiment aux exigences réglementaires minimales à savoir : $U = 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ en zone H1, soit $U=1/R$ et $R = 1/U = 5 \text{ m}^2\text{.K/W}$. $R=e/\lambda$, pour un λ moyen de $0,038 \text{ W/m.K}$, on obtient une épaisseur d'isolant de 19 cm d'épaisseur.

Pondération 3

La pondération 3 se rapporte aux systèmes de management de la qualité environnementale dans la construction (SMQE) développés au paragraphe 2.1. Parmi les systèmes étudiés, quatre d'entre eux permettent de valoriser directement les caractéristiques techniques différenciantes des éco-matériaux par rapport aux solutions plus conventionnelles.

Cette valorisation s'effectue principalement pour les systèmes de certification « basse énergie » par une attribution de performances thermiques et hygrométriques supplémentaire venant impacter favorablement le ratio final de consommation d'énergie ramené en kwh ep/m²/an.

L'utilisation de matériaux présentant une classe d'inertie d'accumulation / restitution importante augmente la classe d'inertie globale de la construction (passage de la classe « inertie faible » à « inertie moyenne ») et favorise ainsi les économies d'énergie.

Cette « capacité thermique » peut être calculée en approche simplifiée en utilisant le tableau n°66, paragraphe 3.5.3.

Le calcul précis d'inertie séquentielle et d'inertie de transmission entre matériaux d'isolation thermique et systèmes constructifs présentant la même aptitude à la fonction (garder les calories en période hivernale, se protéger des surchauffes d'été, assurer l'effet porteur et structurel d'un m² de rampant de toiture), peut être réalisé :

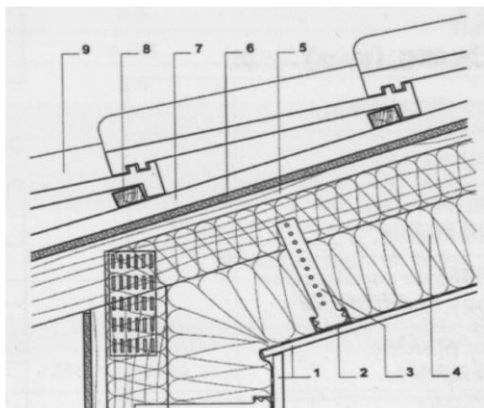
- Déphasage rampant de toiture conventionnel : **4,53 heures.**
- Déphasage rampant de toiture bois massif : **11,68 heures.**

Déphasage thermique d'un toit conventionnel
AW, juillet 2009

4,53 heures...

type	epaisseur	diffusivité thermique en m ² /h	déphasage (en heure)	vitesse de propagation de l'onde en cm/h	
plaque de plâtre BA 13	0,013	0,001051051	0,55	2,35	
laine de verre	0,12	0,002587413	3,26	3,69	
panneau OSB sous toiture	0,012	0,000529661	0,72	1,67	

4,53 heures



rampant de toiture conventionnel fermettes industrielles

Figure 56 : Calcul du temps de déphasage de transmission d'un flux de chaleur extérieur pour le système constructif rampant conventionnel

type	épaisseur	diffusivité thermique en m ² /h	déphasage (en heure)	vitesse de propagation de l'onde en cm/h	
rampant bois massif épicéa sec et raboté 130 mm ep	0,12	0,00047736	7,58	1,58	
ouate de cellulose insufflée 40 kg/m ³	0,12	0,001633166	4,10	2,93	

11,68 heures

maisons écologiques SPL-Chênelet
www.chenelet.org



Figure 57 : Calcul du temps de déphasage de transmission d'un flux de chaleur extérieur pour le système constructif rampant bois massif

Le calcul de déphasage montre clairement qu'un rampant bois massif type SPL est nettement plus performant en déphasage de transmission qu'un rampant conventionnel fermettes industrielles : le rampant bois massif donne une sécurité de 7,15 heures par rapport au rampant conventionnel.

Concrètement ceci signifie que les rayons de soleil qui frappent une toiture aux heures les plus chaudes en été (entre 12 h et 15 h heures solaires) commencent à se faire ressentir, en terme d'augmentation de température directement perçue, 5 heures plus tard pour une toiture conventionnelle et 12 heures plus part pour un rampant bois massif.

- Rampant conventionnel : 12 heures + 5 heures = 17 heures de l'après midi.
- Rampant bois massif : 12 heures + 12 heures = 24 heures soit minuit.

Le flux de chaleur du soleil n'étant jamais présent pendant 12 heures d'affilée à une intensité forte, le peu de chaleur qui parviendra quand même à pénétrer dans l'espace habitable des combles aménagés sera immédiatement évacué par une ventilation minimale (mécanique, ouverture de fenêtres etc.). Aucune surchauffe ne sera constatée dans les combles habitables.

A contrario, pour un rampant conventionnel, le flux de chaleur présent sur la plage horaire 12h-15 h pénétrera en fin d'après midi dans les combles, la surchauffe de l'espace habitable aura déjà eu lieu quand les habitants iront se coucher en début de soirée.

Les éléments de construction auront monté en température, aucune ventilation même minimale ne permettra de rafraîchir les ambiances correctement. La surchauffe des combles habitables sera constatée.

Cette analyse relève de critères et considérations plutôt qualitatives que quantitatives : comment apprécier à sa juste valeur le critère « déphasage thermique » traduit en heures, et surtout comment, ce qui est le but final de notre étude, transformer ces heures en agrégation financière simplifiée, c'est à dire des « € » pouvant s'inscrire en coûts ou bénéfices supplémentaires ?

La méthode la plus simple consiste à attribuer un coût à une dépense énergétique qui serait nécessaire pour retrouver une température de confort jugée correcte pour les activités nocturnes dans des combles habités. Ce coût s'inscrirait en suite en coût évité par une solution technique qui permettrait de s'en affranchir

La seconde méthode consisterait à attribuer une valeur monétaire au confort disponible et/ ou recherché ; le principe en serait simple : Quelle somme supplémentaire des occupants ou futurs occupants d'un logement sont-ils prêts à déboursier en plus pour être sûrs de dormir au frais dans leurs combles en cas de surchauffe estivale ?

La troisième méthode consisterait à définir l'épaisseur d'isolant laine de verre nécessaire pour obtenir, en terme de déphasage thermique, les mêmes performances que l'épaisseur d'isolant ouate de cellulose, et de chiffrer en coût cette épaisseur.

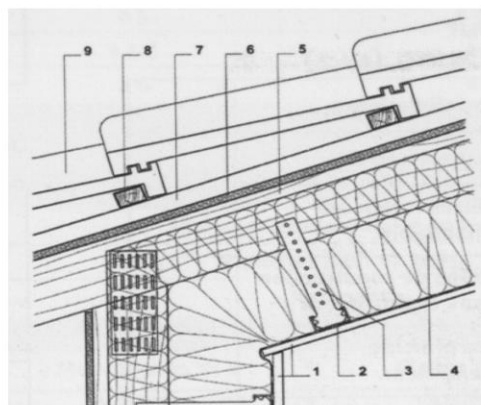
C'est ce que nous avons fait à l'aide des tableaux de calcul de déphasage thermique : clé d'entrée du raisonnement : 11,68 heures de déphasage (performance du rampant bois massif ouate) recherchées ; épaisseur de laine minérale nécessaire pour obtenir 11,68 heures : 384 mm ou 38,4 cm.

Déphasage thermique d'un toit conventionnel
AW, juillet 2009

11,69 heures...

type	epaisseur	diffusivité thermique en m ² /h	déphasage (en heure)	vitesse de propagation de l'onde en cm/h
plaque de platre				
BA 13	0,013	0,001051051	0,55	2,35
laine de verre	0,384	0,002587413	10,42	3,69
panneau OSB sous toiture	0,012	0,000529661	0,72	1,67

11,69 heures



rampant de toiture conventionnel fermettes industrielles

Figure 58 : Calcul de l'épaisseur de laine de verre nécessaire pour obtenir un temps de déphasage de transmission d'un flux de chaleur extérieur pour le système constructif rampant conventionnel de 11,68 heures.

En synthèse, afin d'obtenir un confort thermique d'été équivalent à celui procuré par un rampant de toiture bois massif / ouate de cellulose, il est nécessaire de passer de 120 mm de laine de verre à 380 mm, pour une densité de 50 kg/m³.

	Ouate de cellulose 120 mm	Laine de verre 120 mm	Laine de verre 380 mm
Temps de déphasage du système constructif rampant de toiture	11,69 heures	4,53 heures	11,69 heures
Coût en € HT /m2 fournitures seules	4,93 €	6,16 €	15,22 €
Surcoût LV 120 mm / 380 mm			9,06 €

Tableau 104 : Détermination du surcoût d'épaisseur de laine de verre pour atteindre le même confort thermique d'été que 120 mm de ouate de cellulose.

380 mm de laine de verre coûtent en fourniture 15,22 € contre 6,16 € pour du 120 mm, soit un surcoût de 9,06 € au m², pour un gain en heures de 7,16 heures. L'heure de déphasage gagnée coûte ainsi pour un rampant conventionnel isolé avec de la laine minérale 1,26 €.

Ce surcoût peut être à l'inverse identifié comme un coût évité par le recours à l'isolant ouate de cellulose : 9,06 € au m². Il s'inscrit donc comme un coût évité ou un bénéfice.

La pondération « temps de déphasage thermique » ou « confort d'été » nous permet donc de mettre en évidence un coût évité de 9,06 € / m² en faveur de l'utilisation de la ouate de cellulose au sein d'un système construction rampant de toiture.

Pondération 4 : les utilisateurs finaux

Comme vu précédemment, les utilisateurs finaux ont également un avis plus qu'intéressant sur la durabilité effective des matériaux et produits de construction.

Les ressources disponibles concernant les avis sur les systèmes constructifs étudiés sont très peu nombreuses. Aucune donnée particulière n'a pu être recueillie auprès des professionnels du bâtiment sur la mise en œuvre et la prescription de systèmes de rampants conventionnels à fermettes dites « industrielles ».

La seule information recueillie concerne 50 % des maisons individuelles construites et vendues en France dites maisons « premier prix », dont le prix moyen se situe aux alentours de 1000 € TTC au m² habitable.

Ce type de maisons correspond au modèle proche de celui qu'on trouve aux Etats Unis : construire vite fait, pas cher et jetable.

Sur 100 000 €, le coût réel de la maison est environ de 50 %. Le reste couvre la part liée à la conception « catalogue » initiale, la rémunération des commerciaux, les frais administratifs, la publicité et la marge de l'entreprise pour ses bénéfices.

En décortiquant les différents lots d'une maison premier prix¹ correspondant à 50 % du marché de la maison individuelle française (110 m² habitables), on obtient la répartition suivante. On ajoute également pour base de comparaison, une maison issue de la filière bois, basse énergie et éco-construite :

Nom du poste	Maison premier prix catalogue CCMISTE	Maison bois ossature plate forme éco-construite basse énergie
Raccordements et taxes	3500 €	3500 €
Design / ingénierie	0 €	10000 €
Bilan thermique	0 €	8000 €
Etude de sol	0 €	1500 €
Terrassements, fondations, sous bassements, drainages, plancher bas	19000 €	27000 €
Murs rdc, pignons, murs de refend intérieurs, compris baies et ouvertures pour menuiseries	20000 €	50000 €
Charpente, couverture, cheminées, sorties de ventilation, fenêtres de toit	20000 €	20000 €
Menuiseries extérieures	9000 €	16000 €
Plâtrerie et doublage : enduits intérieurs, isolation, cloisons, plafonds, portes, escaliers, revêtements de sol	25000 €	35000 €

¹ Maison premier prix type Geoxia, maisons Phénix, maisons d'en France, maisons castor etc... étude des lots réalisée avec Batiprix 2009 www.batiprix.com. Ce travail a également été effectué pour différents types de maisons : maison moyenne gamme, maison éco construction bois (plate forme, poteaux poutres), maison éco-construction filière humide type monomur, et enfin maison paille GREB auto-construite partiellement.

Plomberie	6000 €	8000 €
Electricité	6500 €	8000 €
chauffage	2200 €	6500 €
Production ECS	900 €	7500 €
Récupération eaux pluviales	0 €	4500 €
total	111 200 €	205 500 €

Tableau 105 : Comparaison des coûts par lots d'une maison premier prix et d'une maison éco construite en bois, base batiprix 2009 www.batiprix.com, fournitures et pose, en € TTC par m² habitable, maison moyenne de 110 m² habitable.

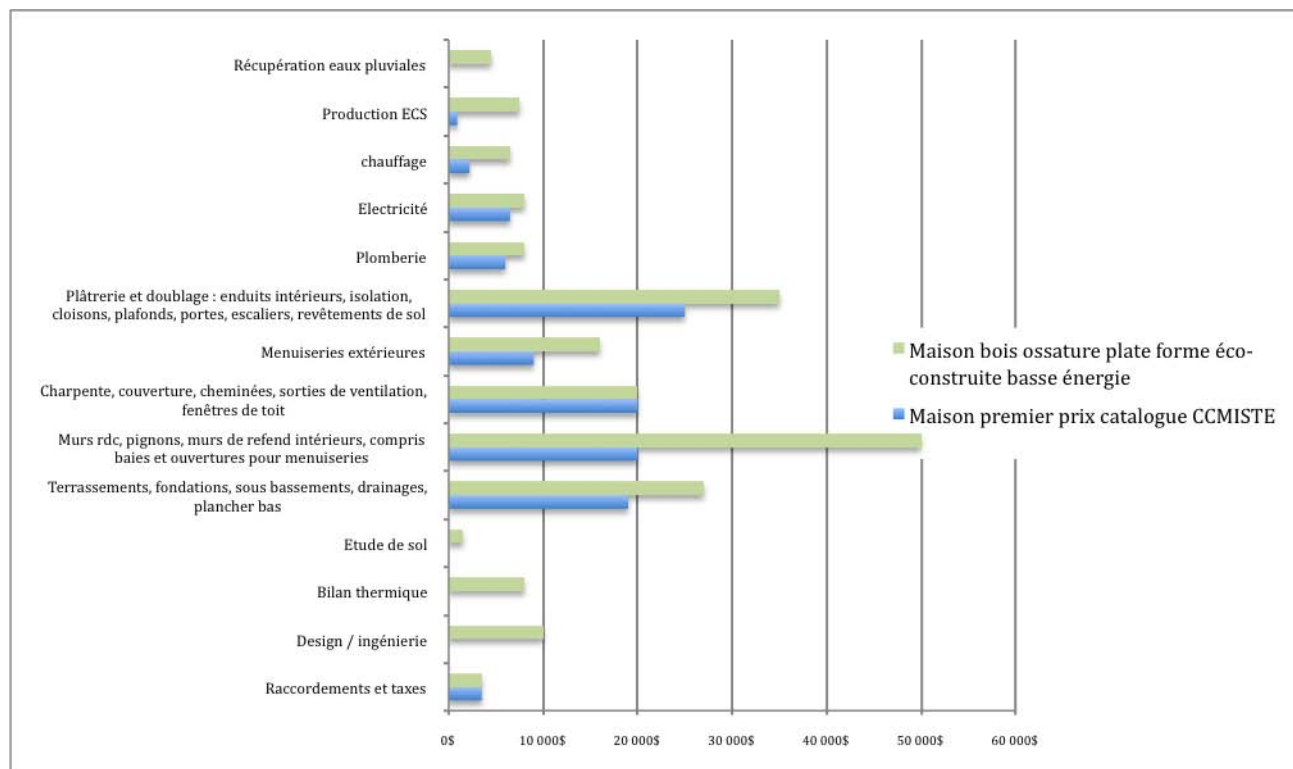


Figure 59 : Comparaison des coûts par lots d'une maison premier prix (50 % du marché français en 2009) et d'une maison éco construite en bois, base batiprix 2009, fournitures et pose, en € TTC par m² habitable, maison moyenne de 110 m² habitable.

En examinant les lots techniques se rapportant aux systèmes constructifs étudiés, c'est à dire le lot « charpente couverture » et le lot « plâtrerie et doublage », nous mettons en évidence la part relative en % de chaque lot par rapport au montant global de la maison :

- charpente couverture : 18 % pour la maison CCMISTE, 10 % pour la maison éco-construction
- plâtrerie, doublage : 22 % pour la maison CCMISTE, 17 % pour la maison éco-construction

La part relative du lot charpente couverture pour la maison CCMISTE est 8 % plus élevée que pour celle de la maison éco-construite. Le lot plâtrerie doublage représente 22 % du total pour la maison CCMISTE contre 17 % pour la maison éco-construction.

Les lots concernés par les matériaux des systèmes constructifs analysés précédemment représentent donc :

- 40 % des coûts totaux d'une maison individuelle premier prix.
- 27 % des coûts totaux d'une maison basse énergie éco-construction bois.

Les clients des maisons premier prix à 100 000 €, et les entreprises qui les construisent, sont beaucoup plus attentifs à une augmentation de 1 % du prix plancher de la maison individuelle qu'ils achètent (1 % = 1000 €) ou qu'ils construisent, tandis que les clients des maisons bois écologiques basse énergie percevront plus facilement 1 % d'augmentation de leur prix. Les premiers raisonnent plutôt en terme de surcoût parce ce qu'on les y a habitués et parce qu'en général, la piètre qualité de la partie structurelle est compensée par toutes sortes de prothèses technologiques, par exemple l'installation d'un système de chauffage avec pompe à chaleur réversible alors qu'on peut construire une maison qui n'a besoin ni de chauffage ni de climatisation.

Dans le cas d'un système constructif « rampant de toiture » en général, hormis les critères de durabilité technique et depuis peu de performance thermique d'hiver (garder les calories dans la maison, réduire les ponts thermiques), les utilisateurs finaux sont peu attentifs à la qualité globale.

L'attention changera avec la mutation écologique de l'offre (voir concept KBANE la maison durable développé au paragraphe 4.1).

La pondération par les utilisateurs finaux des systèmes constructifs analysés semble difficile à appréhender pour le moment.

Pondération 5 : l'indicateur environnemental simplifiés émissions carbone équivalent liées aux émissions de GES

En reprenant le raisonnement développé précédemment concernant l'application d'une taxe carbone (voir paragraphe 3.5.5.2), nous proposons d'appliquer la modélisation d'une taxe carbone liée au contenu carbone des systèmes constructifs analysés, basse, moyenne ou haute.

Le contenu carbone équivalent des deux systèmes constructif est le suivant :

- Rampant conventionnel fermettes industriels : 49 kg eq C émis.
- Rampant bois massif éco-construit : -22,37 kg eq C stockés.

L'application d'une taxe carbone basse, moyenne et haute donne les surcoûts d'investissement suivants, l'équivalent carbone fixant le niveau de la taxe :

Taxe carbone	Contenu carbone eq (initial)	150 € la tonne d'eq C	400 € la tonne d'eq C	1500 € la tonne d'eq C
Système rampant conventionnel	49 kg	+ 7,35 €	+ 19,60 €	+ 73,50 €
% par rapport au prix de vente instantané	Rappel : prix de vente fourniture et main d'œuvre : investissement initial : 180,49 €	4,07 %	10,86 %	40,72 %
Système rampant bois massif éco-construit	-22,37 kg	3,36 €	8,95 €	33,56 €
% par rapport au prix de vente instantané	Rappel : prix de vente fourniture et main d'œuvre : « investissement initial » : 209,8 €	1,6 %	4,27 %	15,99 %

Tableau 106 : Simulation des augmentations de prix de deux systèmes constructifs étudiés : un rampant de toiture conventionnel et un rampant de toiture bois, avec l'application en France d'une taxe carbone de différents niveaux.

Pour une valeur moyenne de 400 € la tonne équivalent carbone, on obtient un surcoût de 19,860 € pour le rampant conventionnel (10,86 % du prix de vente initial) et une économie ou « coût évité » de 8,95 € (4,27 %) pour le rampant bois massif, par UF de 1 m².

La pondération par le critère environnemental contenu carbone équivalent est donc significative et peut être prise en compte dans un calcul en coût global comparatif entre deux systèmes constructifs étudiés, sur l'ensemble de la DVT (50 ans).

Pondération 6 : indicateur sociétal (IS), heures de travail générées

Un volet sociétal permet d'introduire d'autres critères que les critères techniques, économiques, financiers et environnementaux développés précédemment. (voir paragraphe 3.5.6).

L'indicateur d'intensité sociale permet de représenter quelles techniques, à ressources énergétiques égales, laissent la plus grande part au travail humain.

Pour les deux systèmes constructifs faisant l'objet de notre étude, à savoir un rampant conventionnel à fermettes industrielles et un rampant bois massif, nous pouvons donner les indicateurs sociaux et environnementaux permettant de calculer l'indicateur d'intensité sociale (IS) :

	Energie incorporée (énergie grise) sur DVT, en kwh / m ² UF	Emissions de GES (contenu carbone équivalent)	Heures de travail pour la production	Heures de travail pour la mise en oeuvre	Heures de travail (total)	Intensité sociale en heures de travail (production et mise en oeuvre) / kwh d'énergie incorporée	Traduction de l'indicateur IS en jours travaillés générés
Rampant conventionnel	433 kwh/m ²	48,56 kg eq C	0	1,75	1,75	0,0040	0,25 jour
Rampant bois massif	379 kwh/m ²	-22,37 kg eq C	3,5	1,5	5	0,0131	0,71 jour

Tableau 107 : Calcul de l'indicateurs d'intensité sociale (IS) à partir d'indicateurs sociaux et environnementaux sélectionnés pour deux systèmes constructifs étudiés (rampant conventionnel et rampant bois massif), par unité fonctionnelle de 1 m² (UF=1 m²).

L'indicateur d'intensité sociale donne donc :

- 0,0040 heures pour le rampant conventionnel,
- 0,0131 heures pour le rampant bois massif éco-construit.

3,27 fois plus d'heures d'emplois humain sont générées pour 1 kwh d'énergie incorporée dans un rampant bois massif éco-construit que dans un rampant conventionnel à fermettes industrielles.

Si l'énergie incorporée dans un rampant conventionnel est de 1 kwh d'énergie humaine, elle génère 0,0040 heures de travail et coûte 71,43 € (voir figure 41 paragraphe 5.6 chapitre 3). 1 heure de travail destinée à la fabrication d'un rampant conventionnel coûte donc réellement 17 857 €.

Si l'énergie incorporée dans un rampant bois massif est de 1 kwh d'énergie humaine, elle génère donc 0,0131 heures de travail et coûte 71,43 €. 1 heure de travail humain destinée à la fabrication / mise en oeuvre d'un rampant bois massif coûte donc 5452 €.

Le ratio coût d'une heure de travail humain réel entre un rampant conventionnel et un rampant bois massif est de 3,27.

4.4 Synthèse de résultats sur les matériaux et solutions constructives, agrégation des résultats en langage commun « € ».

6 possibilités de pondération qui permettent de caractériser les systèmes constructifs « rampants de toiture » étudiés ont été présentées. Parmi ces pondérations, certaines sont applicables car significatives, quant à leur impact économique en terme de différenciation entre menuiserie PVC et bois PEFC, d'autres sont écartées car non significatives ou imprécises quant aux conclusions qui peuvent en être tirées.

	Dénomination	Indicateur principal	Indicateurs secondaires	Conclusion pour différencier PVC / Bois
Pondération 1	Technique	Performance thermique Uw	Temps de retour simple et élaboré	Non significatif
Pondération 2	Réglementaire	Points de solution technique correspondant à la RT en vigueur : RT 2005	Coefficient de déperditions thermiques surfaciques U	Non significatif
Pondération 3	Systèmes de management de la QEB / Certification basse énergie	Recours obligatoire aux éco-matériaux	Performances techniques différenciantes des éco-matériaux par rapport aux solutions conventionnelles (inertie, hygroscopicité, non dégradation des performances essentielles, propriétés acoustiques)	Significatif pour les systèmes constructifs étudiés : coût évité de 9,06 € HT au m2 pour le choix du rampant bois massif plutôt que rampant conventionnel
Pondération 4	Utilisateurs finaux	Aptitudes techniques	Composants éco-déterminants	Non significatif
Pondération 5	Traitement des déchets	Quantité de déchets en fin de vie à traiter	Coûts de traitement des déchets	Non appliqué par manque de données relatives au traitement des déchets des matériaux correspondant aux systèmes constructifs
Pondération 6	Emissions de gaz à effet de serre	Contenu carbone équivalent	Contribution climat énergie en cas de création d'une taxe carbone	Significatif : surcoût de 9,86 € pour le rampant conventionnel et coût évité de 8,95 € pour le rampant massif
Pondération 7	Heures de travail générées	Intensité sociale	Coût d'une heure de travail générée par l'utilisation d'une énergie (mécanique ou humaine) en France	Significatif

Tableau 108 : Synthèse des pondérations étudiées et choix d'utilisation pour la comparaison des systèmes constructifs étudiés.

Au final, seules trois pondérations parmi les six réalisées sont significatives; elles complètent efficacement la différenciation technique, économique et financière mais aussi environnementale et santé proposée précédemment :

- systèmes de MQEB et certification basse énergie : inertie thermique,
- émissions de gaz à effet de serre en équivalents carbone eq C,
- heures de travail générées traduites en indicateur « d'intensité sociale ».

Comme pour l'analyse précédente concernant les systèmes de menuiseries extérieures, les autres pondérations proposées peuvent être significatives pour d'autres systèmes constructifs. Le raisonnement est à reprendre pour chaque catégorie de système constructif étudié.

Nous pouvons désormais appliquer l'agrégation des résultats en indicateur financier commun « € ». L'objectif du raisonnement est de proposer une agrégation simplifiée, les indicateurs étudiés étant in fine traduits en ratio simplifié « coûts / bénéfices » (paragraphe 2.2.4.5). Nous obtenons donc :

Pour les coûts :

	Rampant conventionnel	Rampant bois massif
Coût total sur DVT (€ HT)	450,5 €	209,08 €
Surcoût lié au confort thermique d'été (inertie)	+ 9,06 €	0 €
Taxe carbone liée au contenu Eq C	+19,86 €	0 €
Coût d'une heure de travail (énergie humaine) destinée à la fabrication du système constructif	17 857 €	5 452 €
Total coûts	18 336 €	5 661 €
Rappel : surcoût initial	28,59 €	

Tableau 109 : Synthèse des coûts pour les deux systèmes constructifs étudiés

Et pour les bénéfices :

	Rampant conventionnel	Rampant massif
Crédit d'impôt « matériel » (base 2009, xx % coût du matériel HT), année N+1	0 €	0 €
Economie liée au confort thermique d'été (inertie)		9,06 €
Economie de taxe carbone	0 €	8,95 €

Economie de coûts sur DVT	0 €	241,42 €
Total bénéfices sur DVT	0 €	259,43 €
Bénéfices théoriques par an (pour 50 ans de DVT)	0 €	5,18 €

Tableau 110 : Synthèse des bénéfices pour les deux systèmes constructifs étudiés, par unité fonctionnelle de 1 m² (UF=1 m²).

Le surcoût initial en analyse simple est lissé en $28,59 / 5,18 = 5,5$ années, compte tenu des bénéfices dégagés pour l'ensemble de la DVT.

En réalité, l'économie de taxe carbone et l'économie liée au confort thermique d'été (inertie) viennent lisser au bout de 2 ans le surcoût initial.

La deuxième année, le restant de surcoût est déjà lissé : $28,59 € - 18,01 €$ (inertie + taxe carbone) = $10,58 €$ et $5,18 \times 2 = 10,36$.

Le ratio coûts / bénéfices pour un rampant conventionnel est de 18 336 ($18\,336 / 1$ (bénéfices = 0)). Le ratio coûts / bénéfices pour un rampant bois massif est de 21,82. Le ratio coûts / bénéfices du rampant bois massif est 840 fois moins élevé que celui du rampant conventionnel fermettes industrielles.

4.5 Eléments complémentaires et reproductibilité

La démonstration développée précédemment part de l'hypothèse majeure émise au préalable que la durée de vie des matériaux considérés comme conventionnels au sein du système constructif de base ou de référence est relativement limitée, eu égard à la durée de vie typique globale de l'ouvrage.

Pour le rampant de toiture conventionnel composé de l'association de différents matériaux, nous pouvons reprendre les valeurs suivantes, utilisées dans le tableau 89 paragraphe 4.2.3.

nom	DVT	Rpts sur DVT
plaque de plâtre ep 13 mm	50	3
pare vapeur	50	3
chevrons porteurs 45x122 entraxe 600	100	0
isolant laine de verre ep 120 mm 40 kg / m ³	50	3
panneau OSB 3 pare pluie ep 12 mm	50	0
tasseau 27x40 épicea massif classe 2	50	0

Tableau 111 : Synthèse des durées de vie typique et des renouvellements des matériaux considérés comme « normaux » pour maintenir la performance du système constructif « rampant conventionnel » sur sa DVT.

Les matériaux « bois », bien que traités aux produits de conservation réglementaires pour augmenter leur classe d'usage, sont les plus durables. Ils ne nécessitent aucun changement sur la DVT globale.

Par contre, les matériaux d'isolation (laine de verre, pare vapeur) et de parement sont considérés comme les moins durables, nécessitant 3 remplacements sur 50 ans pour maintenir leur efficacité basée sur le pouvoir isolant de la paroi.

Le problème de durabilité fonctionnelle ne se pose pas au niveau du matériau laine de verre en tant que tel mais concerne son application au sein du système constructif et son association avec les autres matériaux de construction sensés garantir le bon fonctionnement de l'isolant ; la pose d'isolants doit obligatoirement s'accompagner de la mise en œuvre d'une membrane régissant l'étanchéité à l'air et les transferts de vapeur d'eau au sein des parois en contact avec l'extérieur.

Ces techniques sont maîtrisées dans les pays dans lesquels on considère le corps d'état « isolation » comme un métier à part entière et on forme les acteurs de la construction à la physique du bâtiment et aux interactions air / humidité intérieur / extérieur.

Les lés de pare vapeur se recouvrent et sont collés entre eux sur toute la surface isolée (collage aux joints avec les murs et le plancher inclus). Ces joints doivent être réalisés avec des produits adaptés (scotchs et mastics) et permettre la dilatation de l'ensemble.

Ceci n'est quasiment jamais réalisé en France ; en témoignent de nombreux guides pour bricolage et isolation de combles diffusés par les grandes surfaces de bricolage ou les vendeurs de matériaux, souvent trop imprécis sur ce sujet.

Non correctement jointoyé et posé, la membrane d'étanchéité va créer des points de condensation entraînant l'apparition de moisissures et la dégradation de l'isolant.

Les documentations ISOVER françaises montrent l'absence de joints entre les lés de pare vapeur sans recouvrement ; en Belgique, pays dans lequel l'isolation thermique est plus sérieuse, la documentation ISOVER insiste particulièrement sur l'étanchéité à l'air et propose toute une gamme de produits adaptés.

Dans le contexte français, il est donc tout à fait acceptable d'attribuer une durée de vie technique et fonctionnelle limitée aux matériaux liés à la fonction d'isolation thermique, ce qui entraîne un renouvellement du système parement / pare vapeur et isolant 3 fois sur la DVT de 50 ans.

Si on modifie cette hypothèse de moindre durabilité des matériaux conventionnels due aux mauvaises conditions de mise en œuvre et aux aptitudes restreintes des matériaux d'isolation thermique à base minérale à accumuler / restituer de la vapeur d'eau, le raisonnement et les résultats changent complètement :

Pour le rampant conventionnel :

Rampant de toiture conventionnel	Avec prise en compte de 3 renouvellements des matériaux parement – isolation sur DTV	Sans prise en compte de 3 renouvellements des matériaux parement isolation sur DVT
Energie grise	433,15 kwh	183,83 kwh
contenu carbone équivalent kg eq C / UF	49 kg	12,86 kg
Prix de vente, compris frais d'entretien, maintenance et remplacement sur DVT	450,5 €	180,49 €
Coût taxe carbone (base moyenne 400 € la tonne)	19,6 €	5,144 €
Coût d'une heure de travail	15494 €	7518,9 €
Economie de coûts sur DVT	0 €	28,59 €

Tableau 112 : Comparaison des données pour le rampant de toiture conventionnel avec et sans renouvellement des matériaux sur la DVT.

- Le contenu carbone passe en terme d'émissions à 12,86 kg eq C pour la DVT complète (effet puits de carbone déduit).
- Le bilan énergie grise montre une différence de 250 kwh (433 contre 183). Pour la DVT complète.
- En terme de prix, le coût total « prix de vente » passe de 450 € à 180 €, le coût de la taxe carbone associée aux équivalents C (eq C) passe de 19,6 € à 5,144 €.
- Le coût d'une heure de travail humaine destinée à la fabrication d'un m² de rampant conventionnel devient 7518,9 € (IS = 0,0095 h/kwh d'énergie incorporée, qui coûtent 71,43 €, soit pour une heure de travail humaine : 7518 €).
- L'économie de coût sur la DVT devient positive, simple différence entre les prix de vente initiaux des systèmes rampant conventionnel et rampant bois massif.

En ce qui concerne le rampant bois massif, rien ne change puisque les renouvellements sur DVT des différents matériaux sont déjà nuls.

Nous pouvons appliquer la nouvelle agrégation des résultats en indicateur financier commun « € » :

Pour les coûts, nous obtenons :

	Rampant conventionnel sans prise en compte de 3 renouvellements de matériaux sur DVT	Rampant bois massif
Coût total sur DVT (€ HT)	180,49 €	209,08 €
Surcoût lié au confort thermique d'été (inertie)	+ 9,06 €	0 €
Taxe carbone liée au contenu Eq C	+5,144 €	0 €
Coût d'une heure de travail (énergie humaine)	7518,9 €	5 452 €

destinée à la fabrication du système constructif		
Total coûts	7713,59 €	5 661 €
Rappel : surcoût initial	28,59 €	

Tableau 113 : Synthèse des coûts pour les deux systèmes constructifs étudiés, sans prise en compte des renouvellements de matériaux pour le maintien de la performance des systèmes constructifs sur la DVT.

Et pour les bénéfiques :

	Rampant conventionnel sans prise en compte de trois renouvellements sur la DVT	Rampant massif
Crédit d'impôt « matériel » (base 2009, xx % coût du matériel HT), année N+1	0 €	0 €
Economie liée au confort thermique d'été (inertie)		9,06 €
Economie de taxe carbone	0 €	8,95 €
Economie de coûts initiale	28,59 €	0 €
Total bénéfiques sur DVT	28,59 €	18,01 €
Bénéfices théoriques par an (pour 50 ans de DVT) NC	0 €	0 €

Tableau 114 : Synthèse des bénéfiques pour les deux systèmes constructifs étudiés, par unité fonctionnelle de 1 m² (UF=1 m²), et sans renouvellement des matériaux sur la DVT.

Sans prise en compte des trois renouvellements sur la durée de vie typique, le ratio coûts/bénéfices du rampant conventionnel devient donc:

7713,59 € / 28,59 € soit 270. Pour le rampant éco-construit, sur l'ensemble de la DVT, le ratio coûts / bénéfiques est de 314 (5661/18,01).

Le comparatif suivant peut être établi :

Ratio coûts / bénéfices	Rampant conventionnel à fermettes industrielles	Rampant bois massif type éco-construit
Avec prise en compte des renouvellements de matériaux conventionnels sur la DVT des systèmes constructifs	18 336	21,82
Sans prise en compte des renouvellements de matériaux conventionnels sur la DVT des systèmes constructifs	270	314
interprétation	>1	>1

Tableau 115 : Synthèse des bénéfices pour les deux systèmes constructifs étudiés, par unité fonctionnelle de 1 m² (UF=1 m²).

L'analyse qui en découle est la suivante : avec prise en compte des renouvellements de matériaux conventionnels, le ratio coûts / bénéfices du rampant bois massif est nettement favorable, puisque 840 fois inférieur à celui du rampant conventionnel (18 336 contre 21,82).

Il est de ce fait nettement plus avantageux d'investir dans un rampant bois massif que d'investir dans un rampant conventionnel.

Sans prise en compte des renouvellements de matériaux conventionnels, le ratio coûts / bénéfices du rampant conventionnel devient un peu plus favorable que celui du rampant bois massif. Il est donc plus avantageux, en analyse instantanée, d'investir dans le rampant industriel que dans le rampant bois massif.

Si on rajoute le bénéfice lié au confort thermique d'été, non traductible en terme de remplacement de matériaux sur une DVT, on rajoute 9,06 € (paragraphe 4.3, pondération 3) de « surcoûts » pour le rampant conventionnel, le ratio coûts bénéfices devient donc : 270 (7722,55 / 28,59). Le ratio reste toujours favorable pour le rampant conventionnel.

4.6 Conclusions

Notre méthodologie d'analyse est appliquée à un système constructif qui associe d'avantage de matériaux que le système « menuiseries extérieures », en l'occurrence un rampant de toiture.

Ce rampant de toiture est proposé en première approche, en version conventionnelle avec des matériaux conventionnels considérés comme matériaux de 1^{er} choix en termes d'accessibilité prix. Et en seconde approche, en version éco-construite, avec des matériaux relevant de l'éco-construction, considérés comme matériaux représentant un investissement initial plus important car de meilleure qualité.

En prenant en compte la moindre qualité en terme de durabilité technique et fonctionnelle des matériaux conventionnels, l'investissement initial des éco-matériaux du système constructif rampant bois massif est rapidement lissé, le ratio coûts/bénéfices du rampant bois massif est plus favorable que le ratio coûts/bénéfices du rampant conventionnel.

En ne tenant pas compte de la qualité moindre des matériaux conventionnels, l'investissement initial des éco-matériaux du système constructif rampant bois massif n'est pas lissé, le ratio coûts/bénéfices du rampant bois massif est moins favorable que celui du rampant industriel.

L'impact des autres critères, à savoir le surcoût lié au confort thermique d'été, la taxe carbone ou le coût réel d'une heure de travail humain, est encore négligeable pour l'instant.

L'actualité récente (juillet 2009) cautionne malgré tout la recherche de critères différenciants afin de légitimer la prescription et l'usage de solutions « éco » par rapport aux solutions conventionnelles : le comité d'experts sur la contribution climat énergie, présidé par Michel Rocard, propose de fixer à 32 € la taxe carbone par tonne d'Eq C d'ici à 2010 dans le but de modifier les comportements et « *principalement celui qui consiste à utiliser des énergies d'origine fossile dont le fait de les brûler produit du gaz à effet de serre* »¹.

Au chapitre III, paragraphe 3.5.5.2, la question du montant à appliquer pour qu'une taxe carbone fasse infléchir les comportements sans être insupportable à court et moyen terme pour la société était posée. Les estimations faites pour la modélisation d'une taxe carbone à la tonne étaient : estimation basse 150 €, moyenne 400 €, haute 1500 €.

La valeur 32 € est une hypothèse largement en dessous de notre estimation basse ; s'agissant d'un premier pas, il apportera une contribution indéniable et marquera une étape « politique ». Mais ce prix bas ne devrait pas permettre d'infléchir suffisamment les comportements par rapport aux objectifs de diminution à atteindre. Finalement, le montant retenu par le gouvernement français², pour fixer la première contribution climat énergie en 2010 est de 17 € la tonne d'eq C presque deux fois moins que la proposition initiale du comité ROCARD.

¹ Taxe carbone, 32 € par tonne pour la contribution climat énergie, www.developpementdurablelejournal.com/spip.php?article4997

² 17 € la tonne d'Eq C, contribution climat énergie pour 2010.

CONCLUSION GENERALE

Cette thèse concerne l'étude des indicateurs techniques, économiques et financiers permettant de qualifier un éco-matériau de construction par comparaison avec un matériau conventionnel, tous deux utilisés pour les mêmes fonctions au sein d'un système constructif.

Le principal intérêt est une prise du recul par rapport à la thématique générale de l'approche environnementale dans le secteur de la construction / rénovation de bâtiments ie de l'éco-construction.

Un premier chapitre, dédié à un état de l'art sur la thématique éco-matériaux » a permis de comprendre et situer les enjeux auxquels le secteur du bâtiment se trouve confronté depuis les années 1970, période du premier choc pétrolier qui marque la fin d'une énergie abondante et peu coûteuse. Ces enjeux sont particulièrement exacerbés depuis la tenue en France en 2007 du Grenelle de l'Environnement.

Les diverses définitions des éco-matériaux disponibles de part le monde ont été recensées : acteurs de terrain, chercheurs, organismes publics ou associations militantes, chaque organisation d'acteurs propose sa propre définition des éco-matériaux en fonction de son activité et de ses intérêts.

Pour les éco-matériaux et éco-produits, une définition harmonisée et révélatrice d'un consensus entre les différents collèges de pensée français a été proposée : les éco-matériaux sont « *des produits manufacturés destinés à être intégrés dans les ouvrages du bâtiment, compatibles avec les critères de développement soutenable, éco-conçus, sourcés localement, économiquement accessibles et satisfaisant aux critères de sécurité de fonctionnement après intégration dans les dits ouvrages* ».

Un deuxième chapitre présente et analyse, sur la base des définitions identifiées et retenues, la place accordée aux éco-matériaux dans les principaux systèmes de management de la qualité environnementale du bâtiment-SMQEB- ; ceux-ci sont utilisés au niveau mondial pour concevoir et construire un bâtiment à qualité environnementale ou à basse consommation d'énergie. La plupart des référentiels de SMQEB ne rendent pas cependant obligatoire le recours aux éco-matériaux, certains valorisant leurs caractéristiques techniques différenciantes alors que d'autres proposent une définition proche de la définition harmonisée.

Le troisième chapitre permet de définir le cahier des charges d'une méthodologie simplifiée d'aide au choix d'éco-matériaux, sur la base de familles de critères généralement peu utilisés pour éco-différencier des matériaux et produits de construction. Ces critères sont techniques, économiques, financiers- indicateurs de premier rang- et également socio-environnementaux et de santé-indicateurs de second rang.

Un outil innovant permet ainsi d'appliquer un raisonnement structuré par étapes, en facilitant in fine la conversion des critères sélectionnés en indicateurs financiers « € », langage utilisable par les utilisateurs finaux. Les cinq familles de critères sont complétées par des pondérations, adaptées à la fois au domaine d'utilisation des matériaux ou systèmes analysés, au contexte politique récent (par exemple la contribution climat énergie dite « taxe carbone ») ou à des thématiques sociétales fortes (par exemple les heures de travail générées ou le coût réel d'une heure de travail humain).

L'aboutissement de l'agrégation proposée est un ratio « coûts / bénéfices » qui positionne la rentabilité d'un investissement dans un produit ou service conventionnel par rapport à un autre plus écologique : un cas d'application permet de tester la méthodologie sur

les systèmes constructifs « menuiseries extérieures », la menuiserie bois éco-conçue étant plus rentable que la menuiserie PVC étudiée : le temps de retour sur investissement élaboré (TRE) est sept fois plus élevé pour la menuiserie PVC que pour la menuiserie bois.

Le dernier chapitre concerne le territoire de l'étude et son contexte socio-économique. Sur la base de la définition harmonisée proposée, des éco-matériaux fabriqués localement peuvent être identifiés et regroupés au sein de systèmes constructifs plus élaborés que le système test pris pour référence au troisième chapitre.

La méthodologie élaborée est utilisée sur le système rampant de toiture : un rampant conventionnel dit à fermettes industrielles, proposé par des entreprises de construction alimentant le marché en offre premier prix (CCMISTES)¹ est comparé avec un rampant type bois massif fabriqué à proximité de Calais par une SCOP d'insertion spécialisée dans la construction bois.

Le raisonnement permet de comparer les performances des systèmes étudiés non seulement au temps de l'investissement initial mais également le long du cycle de vie, en prenant en compte les renouvellements théoriques de matériaux d'après leur qualité, leur performance et modes de mise en œuvre.

Sur une durée de vie typique de 50 ans, le rampant de toiture bois massif éco-construit (Unité Fonctionnelle de 1m²) est plus rentable sur cinq critères que le rampant conventionnel ; il évite l'émission de 22 kg de gaz à effet de serre et génère 5 heures de travail de main d'œuvre qualifiée.

Sur une durée de vie correspondant à l'investissement initial, le rampant de toiture conventionnel devient plus rentable que le rampant bois massif éco-construction mais génère l'émission de 16 kg de gaz à effet de serre et n'engendre que 1,75 heures de travail de main d'œuvre non qualifiée, par exemple non formée à la problématique d'étanchéité à l'air des constructions.

Le rampant conventionnel est en terme de maintien de performances, moins durable que le rampant éco-construit : la qualité de l'étanchéité à l'air différencie beaucoup les deux systèmes (savoir-faire de l'entreprise de construction), la qualité des matériaux constitutifs du système constructif et le maintien de leurs performances en cas de mauvaise mise en œuvre (isolant thermique par exemple) est un deuxième critère essentiel.

La méthodologie et l'outil sont reproductibles ; le même raisonnement d'agrégation financière sur la base de trois critères principaux, de deux critères secondaires et de pondérations intermédiaires peut désormais être appliqué à d'autres systèmes constructifs permettant de comparer des matériaux conventionnels et des éco-matériaux sourcés en Nord Pas de Calais.

Il s'agit de différencier les éco-matériaux régionaux des matériaux conventionnels par d'autres critères que ceux de l'environnement – santé, peu parlants aux acteurs de terrain.

La question de l'assurabilité des éco-matériaux évoquée au chapitre 1 se pose également dans une perspective d'augmentation de leur fabrication – distribution –

¹ CCMISTES : Constructeurs de maisons individuelles proposant un contrat de construction de maisons individuelles « clé en main ». Ils donnent une garantie « tous corps d'états » à leurs clients et assurent le hors d'eau hors d'air jusqu'aux finitions. GEOXIA, maisons Phénix, qui représentent 50 % du marché des maisons individuelles en France

prescription – utilisation. Les petits fabricants d'éco-matériaux souvent PME-PMI n'ont pas les ressources techniques et financières pour obtenir un avis technique ou normatif.

Les entreprises de construction qui engagent leur assurance décennale sur les travaux qu'elles effectuent évitaient jusqu'alors de prescrire et d'utiliser des matériaux et procédés constructifs sans avis techniques, même s'ils sont utilisés depuis très longtemps dans de nombreuses constructions traditionnelles régionales (exemple du torchis).

Aujourd'hui avec l'émergence d'un marché de l'habitat sain et peu énergétivore (préconisations du Grenelle de l'environnement, émergence de concepts de distribution dédiés au grand public, préconisations des associations spécialisées), la demande en éco-matériaux est en constante augmentation et les procédés les plus alternatifs sont proposés par des entreprises qui utilisent la concurrence entre assureurs comme levier¹.

Par exemple, les constructions ossature bois isolation bottes de paille de céréales émergent partout au niveau national..

Le travail complémentaire à cette thèse serait de comparer un système constructif global « maison individuelle conventionnelle » à un autre système « maison individuelle éco-construite » à l'aide de ratios agrégés « coûts / bénéfices » sur une durée de vie typique de 50 ans ou de 100 ans.

¹ Une entreprise de construction qui ne trouve pas auprès de son assureur de solution pour engager sa décennale à moindre coût sur la mise en œuvre de procédés constructifs non traditionnels (au sens certification), peut faire jouer la concurrence entre assureurs en émettant une requête auprès du Bureau Central de Tarification (BCT) ; les positions s'inversent alors : l'entreprise choisit un assureur en fonction de l'intérêt qu'il manifeste à assurer (c'est aussi un marché pour les assureurs) telle ou telle technique ou tel chantier.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

-
- ¹ VINCENT FOURRIER, M : « *Construire sain et naturel, le guide des matériaux écologiques* », Editions Ouest France, Mars 2006.
- ² GIEC 2007 : « *Climate change 2007, the physical science basis* », IPCC Group 1, Paris, février 2007.
- ³ MARLAND, G : “*Global, Regional, and National Fossil Fuel CO2 Emissions. In Trends: A Compendium of Data on Global Change*”. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., United States, 2003.
- ⁴ Les chiffres clés du bâtiment, énergie et environnement, ADEME 2006.
- ⁵ SIDLER, O : « *Rénovation à basse consommation d'énergie des logements en France* », Programme Européen Concerto, Août 2007, disponible sur www.negawatt.org
- ⁶ COLLET, F : « *Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux* », Thèse de doctorat en génie civil, INSA Rennes, déc 2004.
- ⁷ GUINARD, M : « *Rapport d'étude éco-construction* », Conférence de l'artisanat Pyrénéen, Novembre 2006. Disponible sur www.sig-pyrenees.fr
- ⁸ BRUNTLAND, GH : « *Notre avenir à tous* », 1987, éditions du Fleuve.
- ⁹ JANCOVICI, JM : « *A quoi sert le développement durable ?* », article publié sur www.manicore.com
- ¹⁰ GOBIN, C : « *Le développement durable en BTP, optimisation des ressources par la R&D* », Sciences et techniques de l'ingénieur, 2006.
- ¹¹ AFNOR : *NFP 01-010 « Norme française définissant le contenu et le mode de réalisation de la Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire dans le cadre des produits de construction »*, AFNOR, 2005.
- ¹² LEMAIRE, S : « *Aide au choix des produits de construction sur la base de leurs performances environnementales et sanitaires* », Thèse de Doctorat en Génie Civil, INSA Lyon, 26 janvier 2006.
- ¹³ SESSI : « *Les matériaux de construction, en chiffres* », Production Industrielle (hors série), chiffres clés, 2003.
- ¹⁴ CHATAGNON, N : « *Développement d'une méthode d'évaluation de la qualité environnementale des bâtiments au stade de leur conception* », Thèse de Doctorat, Université de Savoie, 1999.
- ¹⁵ AFNOR : « *NFP 01-020, Cadre méthodologique pour la description et la caractérisation des performances environnementales et sanitaires des bâtiments* », 2005.
- ¹⁶ WIGNACOURT, A : « *Caractérisation, mesure et évaluation des avantages techniques, économiques et financiers des éco-matériaux* », Colloque Confere 2006, Ecole des Mines de Paris, 2006.
- ¹⁷ SWEATMAN, A. et SIMON, M. : “*Design for Environment Tools and Product Innovation*”. CIRP, 3rd International Seminar on Life Cycle Engineering ECOPerformance 96, Zürich, Suisse, 1996.
- ¹⁸ XP ISO TR 14062 : « *Management environnemental - Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit* », norme expérimentale, 2003.
- ¹⁹ GRAEDEL (T.E.) et ALLENBY (B.R.) : « *Design for Environment* ». AT&T, 1996
- ²⁰ AFNOR Normalisation, département génie industriel et environnemental : « *Etude sur l'éco-conception : état de l'art dans le domaine de l'éco-conception* », Mars 2005.
- ²¹ AFNOR : « *NF P 01-010 Norme sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des matériaux et produits de construction* », disponible sur www.afnor.fr .

-
- ²² ADEME : « *Bilan carbone, méthode de comptabilisation des émissions de gaz à effet de serre (GES)* », 2003. Disponible sur www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=15729&m=3&catid=15731
- ²³ WIGNACOURT, A : « *Approche technique, économique et financière de la notion de coût global dans la démarche Haute Qualité Environnementale (HQE)* », Thèse professionnelle de Mastère Spécialisé, INSA Strasbourg – Lille Métropole Communauté Urbaine, 2004. disponible sur miel21.free.fr
- ²⁴ KATS, G : « *The costs and financial benefits of green buildings* », a report's of California sustainable building's task force, oct 2003.
- ²⁵ MEDD : « *Campagne 2005 de promotion des ecolabels* », Dossier de presse, disponible sur <http://ecologie.gouv.fr/ecolabels>
- ²⁶ AFNOR Certification : « *Liste des produits certifiés NF Environnement, peintures, vernis et produits connexes* », NF 130, Edition 2008/5, disponible sur www.marque-nf.com
- ²⁷ CSTB : « *Base de données française de référence sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits et matériaux de construction* », INIES, disponible sur www.inies.fr
- ²⁸ PEUPORTIER, B et PUTZEYS, K : Presco work package 2, “*Intercomparison and benchmarking of LCA Based environmental assessment and design tool*”, Final report, 2005, 74 p, disponible en ligne sur www.etn-presco.net
- ²⁹ CHEVALIER, J : « *Identification des performances environnementales des produits de construction* », rapport pour le compte de la DGUHC, document de travail, Paris, DGUHC, 2003, 31 pages.
- ³⁰ BARTELS, J, BOWDIDGE, J, HAMANS, C : « *Materials, Energy use, overall performance and the integrated building performance* », Integrated environmental performance of buildings, discussion paper, Roermond, Rockwool, 2003 15 p.
- ³¹ DGEMP, Ministère de l'Industrie : “ *Comment calculer le temps de retour sur investissement?*”, disponible sur www.lsi.industrie.gouv.fr/energie/developp/econo/cee/q-rtps-retour.htm
- ³² KATS G, CAPITAL E : « *The Cost and Financial Benefits of Green Buildings* », California's Sustainable Building Task Force, octobre 2003. Disponible sur internet : <http://www.usgbc.org/Docs/News/News477.pdf> .
- ³³ WIGNACOURT, A : « *Coût global et projets de construction* », Lille Métropole Communauté Urbaine, 2004. disponible sur http://miel21.free.fr/dossiers/dossiers_pdf/cout_global_projets_construction.pdf
- ³⁴ STERNER, E : “*Green procurement of buildings: estimation of life-cycle cost and environmental impact*”. Ph.D. dissertation thesis, Department of Mining Engineering, LuleÅa University of Technology, 2002.
- ³⁵ Larsson N, Clark J : “*Incremental costs within the design process for energy efficient buildings*”. Building Research and Information 2000;28(5/6):411–6.
- ³⁶ SELLIER, D : « *Construction durable, les bénéfices économiques* », Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies (ARENE), 2004, 4 p. Disponible sur www.arenidf.org/HQE-urbanisme/pdf/Constrdurable.pdf
- ³⁷ De BAKER, P : « *Les indicateurs financiers du développement durable* », Editions d'organisation, 2006.
- ³⁸ Brower, D, Friends of the Earth, 1969. Disponible sur www.foei.org
- ³⁹ HALADA, K & YAMAMOTO, R : « *The current status of research and development on ecomaterials around the world* », MRS bull 2001 : 11/871-9.
- ⁴⁰ CONSIGNY, D : « *Situation et perspective des éco-matériaux en France* », Rapport au Secrétariat d'état au Logement, 2002.
- ⁴¹ ESCADEILLAS, G : « *Les éco-matériaux dans la construction, enjeux et perspectives* », Septième édition des journées scientifiques du regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton, Toulouse, 19-20 juin 2006. Disponible sur <http://www-lmdc.insa-toulouse.fr/RF2B/Actes-RF2B-2006/%25pdf-Escadeillas.pdf>

-
- ⁴² WIGNACOURT, A : « *Négoce spécialisés en éco-construction selon les régions* », indicateur sur le nombre de négoce spécialisés en vente d'éco-matériaux en France, Cd2e, Nov 2007. Disponible sur www.cd2e.com/CD2EStatic/contenu/ecoconstruction/negoce_specialises_ecomateriaux.pdf
- ⁴³ ZIJLSTRA, L : « *Material skills, evolution of materials* », Materia Rotterdam 2005, disponible sur www.materialexplorer.com/341.0.html
- ⁴⁴ KBOB : « *Données des éco-bilans dans la construction* », Office fédéral de la construction et de la logistique (OFCL), Suisse, 2006. Disponible sur www.bbl.admin.ch/kbob/00493/00495/index.html?lang=fr
- ⁴⁵ KUR, F : « *L'habitat écologique, quels matériaux choisir?* », Terre Vivante, 1999.
- ⁴⁶ JOURDAN, S – MIRENOWICZ, J : « *A contre courant* », La Revue Durable, n° 19, Mars 2006
- ⁴⁷ SCHUMACHER, EF : « *Small is beautiful, Economics As If People Mattered .. 25 years later* », Hartley & Marks, 1999.
- ⁴⁸ CHAUTARD (G) et BOULEAU (D) : « *Le mouvement HQE dans les régions* », 4eme Assises HQE, Reims, 10 et 11 mars 2005, disponible sur www.assohqe.org/docs/HQEdanslesregions.doc
- ⁴⁹ BIOHAB : « *Analyse du développement de la qualité environnementale en Europe* », Biohab / Eco-conseil, mission d'audit de mastère spécialisé, INSA Strasbourg, Avril 2004. disponible sur <http://biohab.free.fr>
- ⁵⁰ UTOPIES : « *La construction durable, une stratégie d'entreprises* », Utopies, 2005, p 61.
- ⁵¹ ENVIROBAT MEDITERRANNEE : « *Analyse des certifications des systèmes de management de la qualité environnementale dans la construction* », disponible sur www.envirobat-med.net
- ⁵² ADEME-PUCA-CSTB : « *Comparaison internationale bâtiment et énergie* », Déc 2007, disponible sur www.prebat.net/benchmark/document/A0-couv-som-lecture-resume-2008.pdf
- ⁵³ OLIVA, JP & COURGEY, S : « *La conception bioclimatique en construction neuve et en rénovation* », Editions Terre Vivante, 2006.
- ⁵⁴ MAZRIA, E : « *The passive solar energy book* », Rodale Press, 1979., paru en France sous le titre « *Le guide de l'énergie solaire passive* », Editions parenthèses, 1981., ré-édité en 2005 sous le titre « *Le guide de la maison solaire* », aux mêmes éditions.
- ⁵⁵ Robert A KEGEL : « *The energy intensity of building materials, Heating, piping, Air conditioning* », New York, Juin 1975, pp 37-41.
- ⁵⁶ SIDLER, O : « *Rénovation à basse consommation d'énergie des logements en France* », Projet Renaissance, programme européen CONCERTO, août 2007, Disponible sur www.negawatt.org/telechargement/Docs/Sidler%20Renovation%20final%201107.pdf
- ⁵⁷ SIMOS. J : « *Evaluer l'impact sur l'environnement : une approche originale par l'analyse multicritères et la négociation* », Presse Polytechniques et Universitaire Romande, Lausanne, 1990, 261 p.
- ⁵⁸ ROY, B & BOUYSSOU, D : « *Aide multicritère à la décision, méthodes et cas* », Paris, Economica, 1993, 695 p.
- ⁵⁹ MAYSTRE, L.Y : « *Méthode multicritères ELECTRE* », Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1994, 323 p.
- ⁶⁰ DESHAYES, P : « ... »
- ⁶¹ UNTEC : « *Prévision et maîtrise du coût des constructions* »
- ⁶² CSTB : « *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, version 1, Juillet 2005. Disponible sur www.inies.fr/documents/comprendreFDES.pdf

-
- ⁶³ AFNOR : « *Guide à l'attention des entreprises pour la prise en compte du développement durable* », 2003.
- ⁶⁴ AFNOR : « *FD X30-021 : SD 21000 - Développement durable - Responsabilité sociétale des entreprises* », 2003.
- ⁶⁵ GLUCH, P & BAUMANN, H : « *The life cycle costing (LCC) approach : a conceptual discussion of it's usefulness for environmental decision making* », Building and Environment 39, 2004, p 571-580.
- ⁶⁶ HENN, CL : « *The new economics of life cycle thinking* », New York, IEEE, 1993.
- ⁶⁷ SPITZER, M : « *Accounting and capital budgeting for pollution prevention* », United States Environmental Protection Agency, The Engineering Foundation Conference, 1993, 24-29 janvier, San Diego, CA.
- ⁶⁸ SPITZER, M & ELWOOD H : « *An introduction to environmental accounting as a business management tool : key concepts and terms* », Washington DC, EPA, 1995.
- ⁶⁹ WHITE, A & BECKER M : « *Total cost assessment : catalyzing corporate self interest in pollution prevention* », New Solutions, 1992.
- ⁷⁰ BENNET, M & JAMES, P : « *Environment related management accounting : current practice and future trends* », Greener management international, 1997.
- ⁷¹ CLIFT, M & BOURKE K : « *Study on the whole life costing* », DETR Report n° CR 366/98, 1999.
- ⁷² TG4 : « *LCC in construction* », Meeting Group on the competitiveness of the construction industry, Final Report, Version 29 octobre 2003.
- ⁷³ Strategic Forum for Construction : « *Accelerating change* », July 2002.
- ⁷⁴ Outrequin, P : « le coût global partagé d'un projet de construction, le modèle d'aide à la décision CoParCo », La Calade, août 2006, disponible sur www.unil.ch/webdav/site/ouvdd/shared/Colloque%202006/Communications/Eco-urbanisme/Bonnes%20pratiques/Ph.%20Outrequin.pdf
- ⁷⁵ GURUNG & MAHENDRAN : « *Comparative life cycle costs for new steel portal frame building systems* », Building Research and information, 2002, p 35-46.
- ⁷⁶ SEKHAR & KENNETH : « *On the study of energy performance and life cycle cost of smart window* », Energy and Buildings, 1998, P 307-316.
- ⁷⁷ CYRIL SWEETT : « *Sustainable construction, whole life cost benefits* », Research for kent county council, Interreg IIIA, March 2006, 19 p.
- ⁷⁸ TEPFER, F : « *Floor material life cycle cost comparison* », School Facilities reading, Université d'Oregon, 2006.
- ⁷⁹ KATS, G : « *Greening america's schools, costs and benefits* », Capital E Report, Octobre 2006, 23 p.
- ⁸⁰ MEEDDAT : « *Marché de réalisation d'un logiciel d'aide à la décision pour les maîtres d'ouvrage publics intégrant le coût global sur l'ensemble du cycle de vie des constructions par référence au projet de norme ISO-DIS 15686/5* », Cahier des Clauses Techniques Particulières, 20 mai 2008.
- ⁸¹ JANCOVICI, JM : « *Combien plus cher paierions nous les choses avec une taxe carbone ?* », sept 2003, disponible sur www.manicore.com/documentation/serre/taxe_C.html
- ⁸² KATS, E & PERLMAN, J : « *National review of green schools : costs, Benefits and implications for Massachusetts* », Massachusetts Technology Collaborative, 2005.
- ⁸³ SELLIER, D : « *Construction durable, les bénéfices économiques* », ARENE IdF, 2004.
- ⁸⁴ STURM, 2002 : « *The importance of commissioning green buildings* », HPAC (Heating, Piping, Air conditioning Engineering, Février 2000.

-
- ⁸⁵ INSEE : « Répartition des entreprises artisanales par département et par principales activités (NES 36) au 01/01/2006, données départementales », Mise à Jour octobre 2007. Disponible sur www.insee.fr/fr/insee_regions/nord-pas-de-calais/rfc/chifcle_fiche.asp?ref_id=ENTOP401&tab_id=947
- ⁸⁶ ERNST & YOUNG : « *Etude des filières de distribution des éco-matériaux en Europe* », Avril 2006. Disponible auprès du Cd2e www.cd2e.com
- ⁸⁷ BATIPRODUITS, guide Internet, éditions le Moniteur, disponible sur www.batiproduits.com
- ⁸⁸ 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* », Organisation internationale de normalisation, 2000.
- ⁸⁹ ISO 14041 : « *Management environnemental, analyse du cycle de vie, principe et cadre* », Organisation internationale de normalisation, 1997.
- ⁹⁰ LEMAIRE, S : « *Les fiches de déclaration environnementale et sanitaire* », CETE de l'Ouest, disponible sur <http://www2.urbanisme.equipement.gouv.fr/actu/ip/n8/textes/dossier-FDES-CETE%20OUEST-V3.pdf>
- ⁹¹ AQC : « *La réglementation thermique dans les bâtiments existants* », revue AQC, Juillet / Août 2008.
- ⁹² CAH : « *Les données du marché de la réhabilitation des logements existants* », Juin 2008, disponible sur www.cah.fr/pub/page.php?id=130
- ⁹³ CETE : « *Perméabilité à l'air de l'enveloppe des bâtiments, généralités et sensibilisation* », CETE, octobre 2006 disponible sur www.effinergie.org/xwiki/bin/download/Main/BaseDocumentaire/Energie_batiment_permeabilite_CETE_Lyon.pdf
- ⁹⁴ Association de soutien Eco-devis : « *Eco-devis, principes de la méthode* », Office des Bâtiments du Canton de Berne, Suisse, Août 2000. Disponible sur www.eco-bau.ch/francais/files/edMethF.pdf
- ⁹⁵ TRIBU ENERGIE : « *simulation maison Mozart* »
- ⁹⁶ ISOVER : « *Fiche de déclaration environnementale et sanitaire IBR contact épaisseur 220 mm* », INIES, Janvier 2006. Disponible sur www.inies.fr
- ⁹⁷ SALOMON, T : « *La maison des négawatts* », éditions Terres Vivantes, 2006.
- ⁹⁸ IPCC : « *Climate Change, The Science of Climate Change* », Cambridge University Press, 1996.
- ⁹⁹ DEOUX, S & P : « *Guide de l'Habitat sain* », éditions Médiéco, 2004.
- ¹⁰⁰ AFME – IBO : « *The Healthy Indoor Air Guide, the Chemistry of Housing* », Austrian Institute for Healthy and Ecological Building, 2000.
- ¹⁰¹ TISSEAU.G , PITRAT.J : « *Intelligence artificielle, problèmes et méthodes* », Presses universitaires de France, 1996, 255 p.
- ¹⁰² DGUHC : « *Solutions techniques RT 2000, maisons individuelles non climatisées* », Ministère de l'Équipement, du Transport et du Logement, 2001. Disponible sur www.rt2000.net/documents/ST_maisons_individuelles_NC.pdf
- ¹⁰³ COSTA.S, GARCIA.S & IBANEZ.L : « *Substitution entre matériaux et comportements des consommateurs, une application au marché des fenêtres* », ECOFOR, Paris, 18 et 19 octobre 2006.
- ¹⁰⁴ BATIM ETUDES : « *Les 8 tableaux qui permettent de comprendre le marché de la fenêtre en France en 2006* », Juillet 2007, disponible sur www.snfa.fr/stock_docs/communiqu_e_public_etude_fenetre_2006_synthese_2007_07_13.pdf
- ¹⁰⁵ CEE : « *Livre vert, problèmes environnementaux du PVC* », Commission des Communautés Européennes, 26/07/2000. Téléchargeable sur http://ec.europa.eu/environment/waste/pvc/green_paper_pvc.htm

¹⁰⁶ ADEME : « *Coûts de l'incinération des ordures ménagères en France* », Période 1993-2001, Direction des Déchets municipaux, Mars 2003. Disponible sur www.compensationco2.fr/servlet/getBin?name=B19D2C1FE9CAB81AA60DC2B268CB2C911153467749501.pdf

¹⁰⁷ FLORIO.F, TERRIBLE.C & VINCENT.V : « *Déchets du bâtiment et des travaux publics* », Sciences et techniques de l'ingénieur, 2003.

¹⁰⁸ JANCOVICI, JM : « *Le plein s'il vous plaît, la solution au problème de l'énergie* », Editions du seuil, Février 2006.

¹⁰⁹ ADEME : « *Bilan carbone pour comptabiliser les émissions de GES de toute organisation* », 2003.

¹¹⁰ PIGOU.AC : « *The Economics of Welfare* », 1920.

¹¹¹ HULOT.N & Comité de Veille Ecologique : « *Pour un pacte écologique* », Broché, 2006.

¹¹² HOURCADE.JC & GHERSI.F : « *La taxe carbone : une bonne idée à ne pas gâcher* », Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement, Laboratoire d'Econométrie de l'Ecole polytechnique, *„Pour La Science”*, Dossier « *CLIMAT : Comment éviter la surchauffe ?* », Janvier/Mars 2007.

¹¹³ Commissariat au plan : « *Effet de serre, modélisation économique et décision publique* », mars 2002. Disponible sur http://lesrapports.ladocumentationfrancaise.fr/cgi-bin/brp/telestats.cgi?brp_ref=024000142&brp_file=0000.pdf

¹¹⁴ MARCOM.A : « *Enquête sur la mesure de productivité dans les techniques de construction en terre* », DPEA Terre, Ecole d'Architecture de Grenoble – CRA-Terre, 2002. Disponible sur http://www.atelierblanc.asso.fr/IMG/rtf/MEMOIRE_FINI_Alain.rtf

ANNEXES

ANNEXE 1



- **Nom** : BREEAM et Eco-Homes
- **Organisme gestionnaire** : Building Research Establishment (BRE)
- **Type** : Approche transversale de type « système », avec utilisation d'éco-points cumulables pour l'évaluation d'un score global.
- **Année de création** : 1990
- **Priorités** : Système de certification axé à l'origine sur l'évaluation des bureaux et sites industriels; étendu aux maisons individuelles (Eco-homes) et surfaces commerciales et écoles récemment. Eco-homes est la version du BREEAM adaptée aux maisons individuelles, soit en construction neuve (ECO-Homes for new buildings), soit en rénovation / réhabilitation sur des maisons existantes (Eco-Homes XB). Pas de priorités particulières sur les 8 cibles (voir cibles développées) du BREEAM initial; à compter d'avril 2007, le ECO-Homes est devenu le « Code for sustainable homes » avec pour cible principale la création de logements « Zéro Carbone ».
- **Cibles développées** : BREEAM évalue la performance d'un bâtiment selon 8 cibles principales : gestion / management ; efficacité énergétique ; santé et bien être; pollution (émissions générées); utilisation du terrain; matériaux et impact environnemental évalué sur un cycle de vie; consommation d'eau; transport. Pour Eco-homes, on retrouve les mêmes cibles d'évaluation, avec des adaptations de critères pour le logement individuel.
- **Fonctionnement accréditation / évaluation** : Deux modèles de grilles d'évaluation développés : une grille pour les bâtiments existants (Existing occupied buildings), une grille pour les bâtiments neufs au stade « conception » (pre-assessment estimator). Attribution de points ou « crédits » cumulables pour atteindre un score global correspondant à un niveau de performance : par exemple, pour EcoHomes, passable (>36 points), bon (>48 points), très bon (>58 points), excellent (>70). BREEAM permet également de fixer des objectifs d'amélioration réalistes et donne un support efficace pour les stratégies de management des plus grosses entreprises.
- **Outils spécifiques** : Existence d'un estimateur utilisable en pré-évaluation pour orienter la conception, soit pour un projet (construction neuve), soit pour un bâtiment existant. Grilles et méthodes d'évaluation pour BREEAM et Eco-Homes : Pre-assessment estimator at design stage (Bâtiments neufs) & Pre-assessment estimator at management and operationnal stage (Existing buildings) pour BREEAM; Grilles de quotation et manuels d'utilisation pour Eco-Homes & Eco-Homes XB + grille de pré-estimation pour simple orientation et évaluation rapide. Existence d'un outil « online » pour l'évaluation environnementale et en coûts complets d'un bâtiment (Envest); Utilisation d'Eco-points traduisant l'impact « planétaire » global (notion proche de l'empreinte écologique) ramené à l'impact d'un résident britannique « moyen » pendant une année.
- **Certification possible des bâtiments** : Oui, par système de points dédiés et apposition du label BREEAM ou Eco Homes avec le niveau de crédits cumulables liés. Système de Label largement diffusé et préconisé, pour tous types de maîtrise d'ouvrage : bénéfiques en tant que bâtiments expérimentaux; affichage des performances; financières; leader en bonnes pratiques (gestion et management du bâtiment).

- **Accréditation des professionnels** : Oui, système d'accréditation disponible (environ 700 livres) par suivi d'une formation et audit post formation (250 livres). Le professionnel est ensuite "licencié" du BRE pour pouvoir conduire des évaluations BREEAM / Eco-Homes.
- **Nombre de réalisations** : Référentiel de MQE le plus utilisé dans le monde, 25 % des immeubles de bureaux construits en Angleterre suivent la démarche BREEAM. Chiffres non disponibles pour les maisons individuelles.
- **Approche « matériaux » (si cible dédiée)** : Oui, cible entière dédiée à l'approche « matériaux », avec critères et évaluation réalisés sur le cycle de vie du bâtiment. Approche particulièrement intéressante car attribution d'un nombre de points maximum pour les produits et matériaux évalués "A" dans le « *Green Guide to specification* » et/ou par le BREEAM Materials Calculator. En cas d'association de matériaux pour la mise en oeuvre d'un système, on considère que 80 % des matériaux qui composent ce système doivent être évalués "A". Les autres critères sont : la possibilité laissée aux futurs occupants de choisir eux mêmes leurs revêtements de sols et peintures de finition (MW03), la réutilisation d'au moins 50 % de matériaux recyclés pour la construction de la façade (MW05), la réutilisation à plus de 80 % (en rénovation) de l'ancienne structure existante; l'approvisionnement en matériaux pour usage structurel ou non structurel doit être réfléchi intelligemment et durablement (ex certification FSC pour le bois, ou système de management environnemental pour l'entreprise d'extraction / collecte / négoce); la présence d'une surface minimale dédiée au recyclage des matériaux, avec accès simplifié (2 m² pour 1000 m² de surface au sol). Pour le label Eco-homes, les critères sont identiques en construction neuve ou en réhabilitation. Note : pour la reconstruction : un élément existant dans un bâtiment ancien, réutilisé dans le nouveau bâtiment bénéficie automatiquement d'une note "A" car on considère que son impact environnemental est minimal par comparaison avec celui d'un élément nouveau "fabriqué" (même si l'élément ancien comporte des CFC ou HCFC...).
- **Correspondance avec définition « éco-matériaux » retenue** : Oui, notamment en lien avec l'approche « ingénierale » en cycle de vie et en terme de « vulgarisation » (Eco-points). Limite : le coût de la procédure d'évaluation en cycle de vie et de traduction des impacts liés en éco-points. A noter l'existence d'une base de données « annexe » de prescription environnementale des produits et matériaux de construction « Greenspec » du National Green Specification (NGS).
- **Liens web** : www.bre.co.uk ; www.greenspec.co.uk

ANNEXE 2

USA & Canada : LEED



- **Nom** : Leadership in Environmental and Energy Design (LEED)
- **Organisme gestionnaire** : US Green Building Council (USGBC) pour les USA ; CA GBC pour le Canada.
- **Type** : Approche produit intégrale basée sur l'évaluation du bâtiment tout au long de son cycle de vie
- **Année de création** : 1998-1999
- **Priorités** : tous types de bâtiments, y compris ensembles en rénovation.
- **Cibles développées** : 5 grands thèmes déclinés en 34 cibles, regroupées par familles : durabilité du site, gestion de l'eau, énergie et rejets atmosphériques, matériaux et ressources, qualité environnementale de l'environnement intérieur, innovation et conception
- **Fonctionnement accréditation / évaluation** : Les 34 cibles, déclinées en 5 grands thèmes (voir cibles développées) comportent 69 crédits au total. L'accréditation est attribuée à partir du moment où le bâtiment reçoit "26 points" au minimum ; 4 niveaux de certification sont proposés (différenciation marketing) : de base, silver, gold et platinum.
- **Outils spécifiques** : 6 outils - guides méthodologiques ont été développés : NC pour les constructions nouvelles et projets de rénovation majeurs ; EB pour la rénovation sur bâtiments existants ; CI pour des projets de rénovation d'intérieurs de bâtiments commerciaux ; CS pour les projets "Core and Shell" ; H pour les habitations individuelles ; ND pour les espaces publics partagés. Développement récent et adaptation pour les établissements de santé et les bâtiments militaires
- **Certification possible des bâtiments** : Oui, se référer au fonctionnement du système d'évaluation : 4 niveaux, de base à platinum
- **Accréditation des professionnels** : Oui, examen d'entrée pour reconnaissance en tant que professionnel "accrédité" LEED ; Edition d'un livre de préparation " LEED Professional Accreditation Candidate Handbook", téléchargeable en ligne (voir lien rubrique "Liens web")
- **Nombre de réalisations** : 1100 projets de construction certifiés ou sur le point de l'être aux Etats-Unis (Estimation Juin 2006 sur site web USGBC)
- **Approche « matériaux »** (si cible dédiée) : Oui, grand thème "matériaux et ressources" décliné en 6 crédits individuels par exemple pour le LEED Rating System for Homes : Taille de la maison; Matériaux d'encadrement performants; Utilisation de ressources locales; Plan de durabilité sur enveloppe et systèmes (plan de maintenance); Produits à performance environnementale (éco-matériaux) sélectionnés à partir de la liste MR5 A et/ou du répertoire Green Spec (www.greenspec.co.uk) élaboré à l'origine pour le BREEAM anglais.

- **Correspondance avec définition « éco-matériaux » retenue** : Oui, directement, notamment dans la proposition de définition "Environmentally Preferable Products means products or services that have a lesser / reduced effect on human health and the environment when compared with competing products or services that serve the same purpose". En clair, les EPP's sont des produits dont les effets présentent des impacts restreints sur l'environnement et la santé que des produits conventionnels remplissant les mêmes fonctions et services (page 85 Document LEED for Homes, voir liens web pour téléchargement)
- **Lien web** : Site internet de LEED : www.usgbc.org/LEED. Référentiel LEED for Homes (LEED pour maisons individuelles) disponible sur www.usgbc.org/ShowFile.aspx?DocumentID=855

ANNEXE 3

Suisse : MINERGIE, MINERGIE P et MINERGIE ECO



- **Nom** : Minergie, Minergie P et Minergie Eco
- **Organisme gestionnaire** : Association Minergie (AMI), secrétariat et agence du bâtiment, Plate forme commune « Eco-Bau », association chargée de la publication en français et allemand d'instruments pour la construction de bâtiments sains et écologiques. Ces instruments permettent d'optimiser la planification, la construction, la gestion et la déconstruction des bâtiments. L'association met périodiquement ces instruments à jour et en développe de nouveaux en cas de besoin.
- **Type** : approche de type mixte « système / produits » (depuis Minergie Eco) avec une clé d'entrée fortement accès sur la cible « énergie ». Idée générale : la consommation énergétique doit être réduite d'un facteur « 3 » par rapport aux bâtiments « traditionnels ».
- **Année de création** : 1999
- **Priorités** : Différentes en fonction des trois labels Minergie – Minergie P (passif) et Minergie Eco (construction écologique et santé). Pour Minergie « classique », cinq niveaux d'exigence pour le système bâtiment retenus, distinction bâtiments récents (construction après 1990) et bâtiments anciens (construction avant 1990) – 12 types de bâtiments concernés : collectifs, individuels, administrations, écoles, commerces, restaurations, lieux de rassemblement publics, hôpitaux, industries, dépôts, installations sportives, piscines couvertes. Pour Minergie « P » (passif), labellisation possible des bâtiments habitat individuel, collectif et administrations. Pour Minergie Eco (construction saine et écologique), pas d'utilisation possible en maisons individuelles ou habitats collectifs pour l'instant (2006) mais la démarche classique ou « P » est un préalable à l'obtention de Minergie Eco.
- **Cibles développées** : 5 cibles de travail pour tous les bâtiments « Minergie » : confort, salubrité, absence de dommages, consommation d'énergie, rentabilité. Avec une priorité concernant la performance énergétique : maximum de 42 kwh/m²/an de SHON pour les constructions neuves, 80 kwh/m²/an pour les réhabilitations. Pour Minergie P, consommations en énergie finale de 30 kwh/m²/an maximum (habitat collectif et individuel) et 25 kwh pour les bâtiments administratifs. Pour Minergie Eco, voir « correspondance avec définition éco-matériau retenue ».
- **Fonctionnement accréditation / évaluation** : La déclaration des niveaux de performance peut se faire soit en mobilisant un BET professionnel, soit par simple « auto-déclaration ». L'accréditation est effectuée par l'office de certification Minergie. Le premier certificat est provisoire et valable pour 3 ans (construction en cours). Un certificat définitif peut être obtenu sur déclaration d'achèvement des travaux. Le label 'Minergie' délivrable sur plaquette en aluminium est valable pour 5 ans. Des contrôles aléatoires peuvent intervenir à tout moment.
- **Outils spécifiques** : Guides méthodologiques d'aide à la conception/ rénovation selon les niveaux « Minergie » disponibles en téléchargement.
- **Certification possible des bâtiments** : Oui, étiquette de communication « G » Minergie – Minergie P et Minergie Eco. Le coût du label Minergie pour un bâtiment est par

exemple de 750 Fsuisses en dessous de 500 m² de SHON. Le label Minergie est utilisable pour un bâtiment complet, pour une partie du système constructif (produit ex fenêtre, complexe de toiture, 5200 € pour un module mur par exemple pour un système et sa licence).et pour un produit /matériau d'un fabricant fournisseur.

- **Accréditation des professionnels** : Oui, statut de « partenaire professionnel Minergie » pour les entreprises de conception / prescription / construction qui ont réalisé au moins 2 bâtiments « Minergie » en construction neuve ou en rénovation – coût moyen d'adhésion de 400 F suisses annuels (apposition logo sur communication de l'entreprise, référencement privilégié pour les projets Minergie etc..)
- **Nombre de réalisations** : 6524 Minergie et 121 Minergie P. Pas de données (2007) pour Minergie Eco disponible depuis peu.
- **Approche « matériaux »** (si cible dédiée) : Oui, notamment avec le label Minergie Eco. Pour Minergie « simple », la certification de « modules » comme éléments standards simplifiés pour atteindre les niveaux de performance Minergie permet de vulgariser l'approche technique systèmes constructifs et matériaux. Pas de références pour autant dans la version « simple » aux éco-produits, les niveaux de performance énergétiques peuvent être atteints indifféremment avec ou sans éco-matériaux. Pas de bilan énergétique (énergie grise) pris en considération pour la prescription des matériaux (ex d'isolation). Pour Minergie Eco (Comme « Eco-construction »),
- **Correspondance avec définition « éco-matériaux » retenue** : Oui mais spécifiquement pour Minergie Eco (Ecoconstruction). L'accent est par exemple mis sur la concentration de polluants dans l'air, l'utilisation de matériaux locaux et recyclés, consommant peu de ressources et d'énergie en phase fabrication, facilement démontables et recyclable en fin de vie etc..
- **Lien web** : www.minergie.ch/fr et www.eco-bau.ch ; les données sur éco-bilans des produits et matériaux de construction (Minergie Eco) sont disponibles sur le site de la Confédération des services fédéraux de la construction et de l'immobilier <http://www.bbl.admin.ch/kbob/00493/00495/index.html?lang=fr>

ANNEXE 4

Autriche : TOTAL QUALITY



- **Nom** : Total Quality – TQ
- **Organisme gestionnaire** : Austrian Institute for Applied Ecology - "Osterreichisches Okologie Institut"
- **Type** : Approche intégrée produits / système
- **Année de création** : 1998
- **Priorités** : 8 domaines d'évaluation sont repris, sans priorités particulières. Les aspects « techniques » du bâtiment priment sur les considérations architecturales, même si le « design » (au sens conception) conserve son importance. Bâtiments administratifs et bureaux (à l'origine) pour démonstration par l'exemple. Le modèle de calcul (voir outils disponibles) est utilisable aussi bien pour les bâtiments collectifs que les maisons individuelles ou les bureaux.
- **Cibles développées** : 8 cibles principales : consommation de ressources, gains environnementaux, la qualité environnementale intérieure, la durabilité, la sécurité et l'innocuité sanitaire, la qualité du processus de conception, la qualité du processus de construction, la qualité des aménagements et du site.
- **Fonctionnement accréditation / évaluation** : Le système d'évaluation Total Quality est basé sur un outil informatique prévu pour les phases de conception d'un bâtiment : pour chaque cible, une échelle d'évaluation en 8 étapes est disponible ; ces étapes correspondent à des niveaux de points, allant de -2 à + 5. On retrouve une évaluation des coûts, les consommations de ressources, le confort, la durabilité, la sécurité, la qualité de conception, le contrôle qualité pendant la construction / réalisation et les gains environnementaux. Le système n'est pas prévu pour l'évaluation post construction des performances environnementales du bâtiment ; Le TQ système représente une partie d'un package plus large "TQ Information Package", qui offre un guide d'orientation sur chacune des échelles d'évaluation. Ce package est disponible en téléchargement (voir liens web)
- **Outils spécifiques** : 1 outil spécifique "feuille de calcul Excel" utilisable pour n'importe quel type de bâtiment (distinction possible entre blocks multi-résidentiels, maisons individuelles et bâtiments de bureaux)
- **Certification possible des bâtiments** : Oui, premiers projets certifiés au printemps 2002. La certification est réalisée par Arge TQ - Institut Autrichien d'Ecologie et Institut Autrichien de baubiologie, sur la base de l'évaluation des diagnostics transmis.
- **Accréditation des professionnels** : Pas d'informations sur une accréditation des professionnels pour la réalisation du diagnostic.
- **Nombre de réalisations** : 12 projets "pilotes" en Autriche en 2002, données actualisées non disponibles en 2007.
- **Approche « matériaux »** (si cible dédiée) : Oui, pas de cible directement dédiée mais présence d'une feuille de calcul dans l'outil informatique « TQtool » disponible en

téléchargement. Cette feuille « Baustoffe » permet ainsi de saisir le type de matériau utilisé, la quantité, la distance de transport « primaire », le type de transport utilisé, les émissions liées etc.. Des données par défaut sont systématiquement attribuées, notamment pour les critères "énergie grise" et "Emissions de CO₂". La prise en compte de ces données s'effectue sur une partie du cycle de vie complet du produit ; elle ne concerne pas, par exemple, le transport secondaire de l'usine de fabrication jusqu'au lieu de négoce et de chantier final.

- **Correspondance avec définition « éco-matériaux » retenue** : Non, pas directement, à minima pour certains critères comme "contenu énergétique" et "émissions de CO₂" liées. Des matériaux plus favorables ou moins impactants pour l'environnement et la santé ne sont pas cités explicitement (en tout cas, pas dans le document traduit en anglais, à voir sur documents en Allemand)
- **Lien web** : en allemand www.argetq.at, document en anglais disponible.

ANNEXE 5

Allemagne : la certification PASSIV HAUSS (maison passive)

- **Nom** : Passivhaus
- **Organisme gestionnaire** : Passihauss Institut Darmstadt
- **Type** : Approche intégrée système
- **Année de création** : 1996
- **Priorités** : la certification « label » maison passive fait référence, à l'instar de Minergie en Suisse, à un standard de construction de maisons basse énergie. Ces constructions assurent une ambiance intérieure confortable en hiver et en été, sans faire appel à un système conventionnel de chauffage ou de ventilation. Le standard maison passive peut être atteint en combinant conception, technologies et matériaux. Les cibles prioritaires concernent donc la consommation maximale d'énergie pour le chauffage, la ventilation et le rafraîchissement des bâtiments « Passivhaus » : 15 kwh/m²/an en énergie finale (compteur) pour le chauffage, 50 kwh/m²/an en énergie finale pour le chauffage (15 kwh) / Eau chaude sanitaire / Ventilation / électricité annexe (-80 % de consommations par rapport à une construction neuve traditionnelle). La disparition des coûts liés aux systèmes de chauffage « conventionnels » rend normalement la réalisation d'une maison passive au même prix qu'une maison conventionnelle vendue en 2008.
- **Cibles développées** : les principales cibles développées concernent la réduction des pertes de chauffage par transmission (isolation des planchers, murs, toits, menuiseries et réduction des ponts thermiques), la réduction des pertes par ventilation (étanchéité et récupération d'énergie sur l'air extrait), les gains en chaleur « passive » ou apports gratuits du soleil qui relèvent directement du type de conception utilisé (conception bioclimatique, maison « solaire », la ventilation, l'efficacité des consommations domestiques et les sources d'énergies renouvelables. Les critères énergétiques du label « passivhaus » ont servi de référence à la réglementation thermique revue en 2002 pour intégrer la consommation d'énergie liée à la climatisation.
- **Fonctionnement accréditation / évaluation** : Il n'existe pas de dossier « prêt à remplir » pour la certification d'une maison passive ; un certain nombre de pièces sont indispensables à l'instruction du dossier : les feuilles du logiciel PHPP, avec tous les calculs fournis, les documents de construction, les informations techniques, imperméabilité à l'air de l'enveloppe, protocole de ventilation, déclaration du maître d'œuvre, photos. Une fois la construction terminée, le requérant doit fournir la vérification de l'étanchéité à l'air, les données concernant l'ajustement du système de ventilation, une déclaration du maître d'œuvre et au moins une photographie du bâtiment.
- **Outils spécifiques** : Guide d'aide à la conception de bâtiments « passifs » et logiciel PHPP 2007 pour affiner les simulations et calculs. Le PHPP (Passive House Planning Package) est à la "maison passive" ce que les deux roues sont au vélo : il permet de concevoir l'habitation pour s'assurer qu'elle respectera les très faibles consommations énergétiques recherchées, mais de plus c'est aussi l'outil de validation de la construction pour l'attribution d'une certification.



- **Certification possible des bâtiments** : Oui label maison passive disponible pour les bâtiments collectifs et individuels, mais également non habités. En complément de la certification, une carte d'identité « énergétique » du bâtiment doit accompagner sa mise en vente depuis 2002 (certificat de performance énergétique).
- **Accréditation des professionnels** : Oui, accréditation de professionnels et d'équipements et matériels (matériaux, composants, systèmes énergétiques).
- **Nombre de réalisations** : 7000 en Allemagne, 10000 en Europe, leur nombre double chaque année.
- **Approche « matériaux »** (si cible dédiée) : oui mais uniquement via la cible « performance énergétique ». Les niveaux de performance « thermique » des matériaux d'isolation, composants structurels des murs, menuiseries, systèmes de ventilation sont extrêmement importants. Les feuilles de calcul du logiciel PHPP 2007 permettent de prendre en considération ces valeurs et de mesurer l'impact du choix de matériaux, composants et systèmes performants sur le niveau de consommation global du bâtiment.
- **Correspondance avec définition « éco-matériaux » retenue** : Non, le label Passivhaus n'accorde pas de bonus complémentaire pour l'utilisation d'éco-matériaux conformes à la définition retenue. A noter la possibilité de valoriser des caractéristiques techniques thermiques avantageant les éco-matériaux par rapport aux solutions conventionnelles (ex chaleur massique des matériaux).
- **Lien web** : site de l'institut de référence en Allemagne www.passivehouse.com , www.passivhaus.org.uk pour la grande bretagne et www.passiefhuisplatform.be pour la France et la Belgique.

ANNEXE 6

Pays-Bas : l'Index Environnemental et le logiciel GREEN CALC

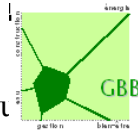


- **Nom** : Index Environnemental et le logiciel Green Calc
- **Organisme gestionnaire** : Dutch Institute for Building Biology and Ecology (NIBE)
- **Type** : Approche produits / système
- **Année de création** : NC.
- **Priorités** : L'Index environnemental « IE » est estimé en comparant le poids écologique du bâtiment avec un bâtiment de référence virtuel. Ce bâtiment de référence est exactement du même type mais construit avec les matériaux et installations tels qu'ils étaient utilisés ou disponibles en 1990, année de référence du calcul. La nouveauté, par comparaison avec des logiciels d'évaluation d'un bâtiment basés sur l'analyse en cycle de vie complète (voir paragraphe 2-2-4 page 15), est l'utilisation de la méthode des « coûts cachés environnementaux » (hidden environmental costs) qui permet d'aller au-delà de l'évaluation financière des dommages directs liés à l'environnement et de prendre en compte les coûts évités apportés par des éco-solutions, par comparaison avec des solutions plus conventionnelles.
- **Cibles développées** : Le calcul se décompose en 4 modules : les matériaux (matériaux bruts, pollution, déchets, nuisances environnementales, effets écologiques, énergie, « re-utilisation », facilité d'entretien et durée de vie), l'énergie (utilisation du bâtiment, chauffage, climatisation, ventilation, chauffage de l'eau, type d'éclairage, utilisation de l'énergie solaire,...), l'eau (type de sanitaire, utilisation des eaux de pluie pour les sanitaires ou l'arrosage des plantes,..) et la mobilité (localisation du site, infrastructures, connexions et accessibilité des transports publics,...). La cible « matériaux de construction » est analysée via un modèle spécifiquement développé « Twin model » développé par l'Université de Leiden, qui permet de prendre en compte les coûts cachés environnementaux, ou les coûts nécessaires pour prévenir toute pollution environnementale.
- **Fonctionnement accréditation / évaluation** : Un indicateur de valeur 100 correspond à un bâtiment de niveau de durabilité équivalent au bâtiment virtuel correspondant. Le calcul a été fait pour plus d'une centaine de projets : pour la plupart, l'index se situe entre 100 et 200, certains atteignent 250 et quelques rares exceptions vont au-delà.
- **Outils spécifiques** : le logiciel Green Calc utilisé pour réaliser l'évaluation environnementale.
- **Certification possible des bâtiments** : Non, et certification non développée par l'organisme prestataire de services.
- **Accréditation des professionnels** : Non

- **Nombre de réalisations** : 40 bâtiments évalués selon l'IE et via GreenCalc aux Pays Bas, quotations disponibles en ligne sur www.greencalc.com/greencalc/viewprojects?stylesheet=en-overzicht.xsl&prefix=EN
- **Approche « matériaux »** (si cible dédiée) : Oui, un module matériaux est disponible et spécifiquement dédié au calcul de l'impact environnemental lié à l'utilisation de matériaux de construction, sur la durée de vie complète du bâtiment. La particularité de GreenCalc est de faire référence à un outil spécifiquement dédié à l'analyse des matériaux de construction, le TWIN MODEL développé par un organisme partenaire (NIBE) et l'université de LEIDEN.
- **Correspondance avec définition « éco-matériaux » retenue** : oui, selon l'analyse proche du modèle en cycle de vie, mais pas explicitement sur la définition « éco-matériaux » notamment via l'évaluation « hidden costs » proposé par Greencalc et le Twin Model.
- **Lien web** : Greencalc www.greencalc.com et www.nibe.org

ANNEXE 7

Belgique : le Green Building Brussels



Green Building Brussels

Caractérisation de la qualité environnementale d'un bâtiment en exploitation

Version 1 - 2006

- **Nom** : Green Building Brussels
- **Organisme gestionnaire** : Bruxelles Environnement IBGE, développé par Architecture et Climat (UCL) et Green arch
- **Type** : Approche produits / système
- **Année de création** : 2006
- **Priorités** : Basé sur une check-list d'origine danoise, l'outil est spécifiquement adapté aux logements de Bruxelles. Il se base sur des informations quantitatives (consommation d'eau, de combustibles et d'électricité) ainsi que sur une description du bâtiment et de caractéristiques relevant de son architecture, de ses installations techniques et de son fonctionnement.
- **Cibles développées** : 5 familles de cibles sont développées par l'outil : confort, santé, énergie, matériaux, eau, gestion.
- **Fonctionnement accréditation / évaluation** : L'appréciation finale s'exprime en note globale, de 125 à 225 points, avec 4 niveaux de performance : mention (125-150), honorable (151-175), excellent (176-225), state of the art (>225).
- **Outils spécifiques** : Tableur Excel GBB version 1 2006. Le tableur comporte 5 feuilles distinctes : Confort et Santé, Energie, Matériaux, Eau, Gestion.
- **Certification possible des bâtiments** : Non
- **Accréditation des professionnels** : Non.
- **Nombre de réalisations** : Non mentionné.
- **Approche « matériaux »** : oui, une feuille de calcul est dédiée à l'analyse de matériaux « respectueux de l'environnement », tout en faisant référence à la durabilité technique et fonctionnelle de la construction ainsi qu'à la conception « durable » proche du bioclimatisme.
- **Correspondance avec définition « éco-matériaux » retenue** : Oui, notamment sur la cible « matériaux plus respectueux de l'environnement » : bois certifié, matériaux sans polyuréthane ou polystyrène, matériaux recyclés ou ré employés, matériaux naturels mis en œuvre de manière significative, matériaux renouvelables mis en œuvre.
- **Lien web** : Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement IBGE www.ibgebim.be/Templates/Professionnels/Informer.aspx?id=2472&langtype=2060 ; Unité Architecture et Climat www-climat.arch.ucl.ac.be

ANNEXE 8

France : HQE – Haute Qualité Environnementale

- **Nom** : Haute Qualité Environnementale (HQE®)
- **Organisme gestionnaire** : Association HQE
- **Type** : Approche Système
- **Année de création** : 1996
- **Priorités et bâtiments concernés** : Bâtiments de la commande publique en démarrage (Collèges, Lycées, Logements sociaux). Cible « Energie », puis niveaux maximum / minimum de performances ; tous bâtiments dont MI avec NF HQE MI.
- **Cibles développées** : 14 cibles du système de management de la qualité environnementale « DEQE », réparties au sein de 4 familles : éco-construction (relations harmonieuses, choix intégré des matériaux, chantier à faible nuisance), éco-gestion (gestion de l'énergie, eau, gestion des déchets d'activité, entretien et maintenance), confort (hygrothermique, acoustique, visuel, olfactif) et santé (conditions sanitaires, qualité de l'air, qualité de l'eau). Depuis peu (2007-2008), L'association HQE a décidé d'appuyer la cible énergétique de ses référentiels sur ces labels en imposant l'obtention d'un label de haute performance énergétique dans les certifications liées à la démarche HQE® et en fixant un niveau minimal équivalent à celui d'un label de haute performance énergétique pour la cible énergie de la démarche HQE®
- **Fonctionnement de l'évaluation** : Evaluation centrée d'avantage sur le déroulement du système de management environnemental choisi que sur les choix techniques proprement dits.
- **Outils spécifiques** : Non, SME et DEQE disponibles en téléchargement gratuitement sur site www.assohqe.org
- **Certification possible des bâtiments** : Oui, via norme NF HQE Bâtiments tertiaires par Certivea et NF HQE Maisons Individuelles par Cequami. Coût moyen de 15 à 20 000 € pour une certification NF HQE Bâtiments Tertiaires.
- **Accréditation des professionnels** : Oui spécifiquement au titre de la démarche HQE ; l'évaluation se fait désormais, depuis le lancement de la démarche volontaire NF HQE Bâtiments tertiaires et NF HQE Maisons Individuelles par des « auditeurs » agréés (formations dispensées par le CSTB en France). Coût de l'agrément : environ 1300 € TTC, hors coût formation auditeur qualité.
- **Nombre de réalisations** : 600 en France (estimations 2007) dont 170 en Nord Pas de Calais (1^{ère} région française)
- **Approche « matériaux »** (si cible dédiée) : oui, cible numéro 2 « *Choix intégré des produits et matériaux de construction* » mais non nécessaire à l'obtention de la certification NF HQE. Correspondance et interaction avec d'autres cibles telles que « chantier à faible nuisance » ou « qualité de l'air ».



- **Correspondance avec définition « éco-matériaux » retenue** : non, pas de reconnaissance explicite de la définition proposée. Approche « système » et « aptitude à la fonction » privilégiée. Un bâtiment peut être labellisé « HQE » et ne pas transposer d'éco-matériaux correspondant à la définition retenue.
- **Lien web** : www.assohqe.org