



THESE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *L'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse*

Discipline: *Génie Civil*

Présentée et soutenue par Marc-André Méquignon

Le 30 novembre 2011

Titre : **Comment la durée de vie des bâtiments peut-elle influencer les performances en termes de développement soutenable?**

JURY

Pr. Luc ADOLPHE

Dr. Frédéric BONNEAUD

Pr. Niklaus KOHLER

Pr. Catherine SEMIDOR

Pr. Alain SELLIER

Pr. Jean-Michel RENEAUME

Pr. Armand COUJOU

Dr. Jean-Pierre MIGNOT

Directeur de thèse

Co-directeur

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Invité

Invité

Ecole doctorale : MEGEP

Unités de recherche : Laboratoires LMDC et LRA

Co-encadrants : Luc Adolphe et Frédéric Bonneaud



REMERCIEMENTS

Je remercie Messieurs Luc Adolphe, Professeur des Universités à l'INSA de Toulouse et Frédéric Bonneaud pour la direction de cette thèse, leur disponibilité et leurs encouragements permanents qui ont guidé et facilité l'approfondissement de mes recherches.

J'exprime ma sincère reconnaissance à :

- Madame Catherine Semidor, Professeur à l'ENSAP de Bordeaux,
- Monsieur Niklaus KOHLER, Professeur de l'Université de Karlsruhe et conférencier à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lauzanne,
- Monsieur Seillier, Professeur et Directeur adjoint au Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de Toulouse – Université Paul Sabatier,
- Monsieur Reneaume, Professeur au LATEP et Directeur adjoint de l'E.N.S-G.T.I à l'Université de Pau,
- Monsieur Armand Coujou, Professeur émérite au Centre d'Elaboration de Matériaux et d'Etudes Structurales – CNRS,

pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Je remercie Messieurs Gilles Escadeillas, Directeur du LMDC et Alain Chatelet, Directeur du LRA, pour leur soutien logistique sans faille, ainsi que Hélène Roux de Balman pour avoir guidé mon parcours tout au long de ces trois années.

Je remercie, tout particulièrement, Monsieur Jean-Pierre Mignot, Maître de Conférences en Sciences économiques (HDR) au Laboratoire d'Etudes et de Recherches Appliquées en Sciences Sociales pour son soutien permanent et Nadège Gunia pour le temps qu'elle m'a consacré et les conseils dispensés.

Je remercie Sylvie Bourdin (CERTOP), Juan Martinez-Vega (LAPLACE) et tout particulièrement Sylvie Roques (OMP) pour leur bienveillance qui m'a permis de réaliser ces travaux dans la sérénité.

Je remercie Hassan Ait Hadou pour sa collaboration experte.

Je remercie les équipes du LMDC et du LRA pour leur disponibilité qui m'a permis la vérification rapide de résultats et l'avancée de mes travaux. A l'intérieur de ces équipes, je remercie tout particulièrement Jean-Paul Balayssac, Claire Oms, et Christian Darles pour le temps qu'ils m'ont consacré et l'assurance qu'ils m'ont procurée dans mes travaux.

Je remercie par ailleurs Béatrice Jalenques (INSA), Nathalie Domède (INSA), Françoise Thellier (PHASE), Jean-Pierre Bédrune, Didier Gossart (PHASE), Vincent Viguier (CIRED), Félix Pérosanz (OMP) et Michel Galaup pour leur expertise et leurs conseils.

Je remercie l'Institut Universitaire de Technologie et l'Université Paul Sabatier pour le soutien matériel sans lequel cette thèse n'aurait pu être réalisée.

Je remercie encore Catherine, Marion, Tathiane, Uyen et Nathalie pour leur extrême gentillesse qui me laissera un souvenir inoubliable.

Enfin, je n'oublie pas ma famille qui a consenti des sacrifices importants qui ont permis la réalisation d'un travail passionnant mais chronophage.

RESUME

Cette thèse se fixe comme objectif de mettre en évidence l'importance de la durée de vie des bâtiments et de ses composants, durée de vie que nous apprécions à l'aune des contraintes qu'imposent les critères du développement soutenable, plus précisément dans le cadre de ses principales caractéristiques, à savoir, environnementale, économique et sociale.

Après avoir analysé et présenté l'état des travaux qui concernent la durée de vie des bâtiments ainsi que ceux de l'approche du bâtiment en termes de développement soutenable, il s'agit de caractériser l'impact du premier sur le second. La méthode s'appuie sur deux objets principaux :

- le premier est une unité de mur extérieur : celui-ci permet de définir précisément la fonction d'usage et les réponses techniques envisageables pour cette fonction ;
- le second objet est un bâtiment de logement type : la méthode reprend celle développée pour l'unité de mur mais, en la systématisant, elle permet de vérifier la neutralisation des comportements à l'usage et de produire d'autres résultats plus facilement quantifiables.

Nous nous sommes donc attachés à caractériser les comportements de l'unité de mur et du bâtiment dans le cadre des contraintes imposées par le développement soutenable. Nous pouvons résumer ainsi le cadre dans lequel s'est déroulé notre recherche :

- une première approche consiste à poser des hypothèses concernant la durée de vie des solutions techniques sur lesquelles reposent nos simulations.
- dans un second temps, l'analyse prend en compte des durées de vie variables avec comme finalité d'en analyser les conséquences.

Afin de favoriser l'exploitation des connaissances produites et de mieux les situer au sein de la démarche de projet, nous précisons les étapes concernées et nous proposons schématiquement une modification des outils actuels d'évaluation de performances.

Enfin, nous précisons les perspectives de recherche qui s'ouvrent à nous, les différentes pistes qui se dégagent de notre travail et des résultats obtenus.

Mots clés : bâtiment, développement durable, soutenabilité, matériaux, durée de vie, cycle de vie, gestion de projet, outil d'aide à la décision, éco-conception

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to highlight the importance of the lifespan of the building and its components and as well as to see it in the light of constraints imposed by sustainable development criterias. The focus of our paper is to characterize the behavior in this approach, namely environmental, economic and social features.

After presenting and analyzing the state of art concerning the lifespan of the building and approach the building in terms of sustainable development, we characterize the impact of the former on the latter. Our method is based on two objects of study :

- The first is a wall unit outside. This allows us to define precisely the function of use and the technical solutions more specifically for this function;
- The second study is a housing-type building. This method is based on that of the wall unit, but we can check behaviour of each technical solutions in the use stage. Thus, we can easily produce results commensurate.

The first approach involves assumptions of lifetimes of technical solutions with which we make the simulations. In a second step, the analysis takes into account the lifespan as a variable and we analyze the consequences in terms of sustainable development.

To promote the exploitation of knowledge produced and to situate them within the project approach, we propose a schematic modification of current tools for assessing performance.

Keywords : building, lifespan, sustainable development, product, economy, lifecycle, decision making tool

TABLE DES MATIERES	P 7
INTRODUCTION GENERALE	P 11
I. Le développement soutenable et le bâtiment	P 11
1. Le développement soutenable	P 11
2. Le bâtiment et le développement soutenable : une demande institutionnelle	P 12
3. La recherche scientifique face au développement soutenable	P 13
II. Positionnement du travail et problématique générale	P 15
1. Le questionnement initial	P 15
2. La durée de vie des bâtiments et l'approche de développement soutenable	P 15
3. L'organisation de la thèse	P 17
CHAPITRE I : CONTEXTE DE LA RECHERCHE	P 18
I.1. Le bâtiment et la durée de vie	P 18
I.1.1. Le vieillissement du bâtiment	P 18
I.1.2. Le bâtiment, les produits de construction et la durée de vie	P 20
I.1.3. Les facteurs d'influence de la durée de vie	P 27
I.1.4. Les outils d'évaluation de la performance	P 32
I.1.5. L'analyse	P 35
I.2. Le bâtiment et le développement soutenable	P 39
I.2.1. Généralités	P 39
I.2.2. Le bâtiment et les piliers du développement soutenable	P 44
I.2.3. Les indicateurs et les données du développement soutenable	P 64
I.2.4. Les outils de la performance de développement soutenable	P 77
I.2.5. L'analyse des travaux de recherche	P 80
I.3. La gestion du projet architectural et le cycle de vie du « bâtiment ».	P 83
I.3.1. La gestion du projet architectural	P 83
I.3.2. La nature et les caractéristiques du projet architectural	P 86
I.3.3. Le « produit » bâtiment	P 87
I.4. Synthèse et problématique retenue	P 89
I.4.1. Synthèse	P 89
I.4.2. Problématique retenue	P 90

CHAPITRE II : CONSTRUCTION DU CADRE THEORIQUE ET METHODOLOGIQUE

II.1. Définition de l'objet étudié	P 91
II.1.1. La délimitation du système	P 91
II.1.2. Les échelles d'évaluation	P 93
II.1.3. Synthèse	P 93
II.2. Le choix des indicateurs et des moyens mobilisés	P 94
II.2.1. Les principes généraux d'évaluation	P 94
II.2.2. Le choix des indicateurs et des moyens mobilisés	P 95
II.2.3. La disponibilité et le choix des sources de données	P 97
II.3. Présentation de la méthode	P 104
II.3.1. L'analyse des performances de l'unité de mur et du logement	P 104
II.3.2. La prise en compte des impacts d'usage	P 105
II.3.3. Le développement de la méthode	P 106

CHAPITRE III : APPLICATION - ETUDE DE L'UNITE DE MUR ET DU BATIMENT

III.1 Le choix des indicateurs environnementaux	P 114
III.1.1. La méthode	P 114
III.1.2. Les résultats	P 117
III.1.3. L'analyse	P 121
III.1.4. Les limites	P 121
III.2. Etude d'une unité de mur porteur extérieur	P 123
III.2.1. Développement de la méthode	P 123
III.2.2. Résultats	P 127
III.2.3. Analyse des résultats - Eléments de discussion	P 136
III.3. Etude d'un logement type	P 145
III.3.1. Définition de l'objet et des conditions de l'étude	P 145
III.3.2. Résultats des simulations - Logement type	P 150
III.3.3. Eléments de discussion	P 162
III.3.4. L'approche sociale	P 170
III.3.5. Synthèse des résultats et limites	P 175

CHAPITRE IV : ENRICHISSEMENT DU CADRE D'ANALYSE INITIAL POUR UNE PRISE EN COMPTE DE LA DUREE DE VIE DANS LE PROJET

IV.1 Propositions pour une amélioration des outils existants	P 178
IV.1.1 Présentation schématique de fonctionnement des outils d'évaluation	P 178
IV.1.2. Proposition d'amélioration des outils actuels d'évaluation	P 182
IV.2 Eléments du cahier des charges	P 186
IV.2.1 L'arbre de déroulement	P 186
IV.2.2 Description de l'interface homme-machine (IHM)	P 187
IV.3 Exemples de résultats de l'outil proposé	P 189
IV.3.1 Performance actuelle du bâtiment	P 189
IV.3.2 Impacts de la réalisation d'un projet	P 190
IV.4 Nécessité d'informations et perspectives d'évolution	P 190
IV.4.1 Connaissance de la durée de vie des produits	P 190
IV.4.2 Dans l'attente de la constitution d'indice	P 191
Conclusion	P 191
 CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	
I. Synthèse de notre travail	P 191
I.1. Contributions pour l'approche de développement soutenable	P 191
I.2. Limites	P 193
II. Perspectives et prolongements envisagés	P 194
III. Conclusion	P 197
 Références bibliographiques	P 198
Index des tableaux	P 207
Index des graphiques	P 208
Index des Figures	P 208
Index des Annexes	P 209
Principales Abréviations	P 210
 ANNEXES	P 211

INTRODUCTION GENERALE

Le cadre général de notre recherche est présenté ci-dessous. Celui-ci comprend le bâtiment dans une approche de développement soutenable et la prise en compte du facteur temps. Aussi, nous profitons de cette introduction pour justifier de la nécessité et de l'intérêt de la recherche pour ces questions. Pour finir, nous précisons la problématique générale.

I - Le développement soutenable et le bâtiment

1. Le développement soutenable

Le développement soutenable est une notion complexe difficile à caractériser. Aucune des définitions produites ne semble suffire, à elle seule. Pour décrire cette notion et tenter d'en cerner le contour et les composantes, nous allons reprendre trois différentes interprétations assez complémentaires.

La définition la plus fréquemment utilisée est probablement celle du rapport Brundtland publié en 1987 par la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement des Nations Unies (WCED, 1987) qui précise : « *le développement durable est le développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs* ». Cette définition comprend deux idées fortes. La première est la reconnaissance d'un développement nécessaire pour la satisfaction des besoins d'une population et une meilleure répartition des richesses. Il y a, à ce niveau, une volonté d'équité entre les différents groupes humains peuplant la terre à un instant donné. La seconde idée introduit la notion de « durabilité » du développement et cherche à imposer le critère d'équité intergénérationnelle. Le temps est donc l'un des facteurs à prendre en compte.

Le développement soutenable est aussi schématiquement une notion visant à situer les actions à l'intersection des trois piliers formés par les domaines environnemental, économique et social. Il s'agit de prendre en compte les conséquences et les impacts des trois domaines simultanément lors de toutes prises de décision ou de toutes évaluations d'une action anthropique. Outre l'aspect symbolique d'une démarche équilibrée autorisée par trois appuis, cher à tous concepteurs, la notion lie les domaines de la nature au travers des sciences environnementales et ceux des sciences humaines, l'économie et le social. La nécessité de ces liens est apparue par l'expérience. Historiquement, la seule prise en compte des facteurs environnementaux a entraîné l'essoufflement rapide de toutes entreprises et même, parfois, l'absence d'action visant la préservation du patrimoine environnemental. La prise en compte d'un facteur environnemental implique qu'il soit économiquement viable et que l'Homme puisse le supporter voire en profiter. La seule approche économique a montré aussi ses limites. Par exemple, les mécanismes d'accumulation du capital aboutiront en toute logique à une rupture et à l'épuisement des ressources naturelles. L'action doit donc se situer au sein des piliers et doit se fixer dans la durée.

Enfin, la notion de développement soutenable englobe aussi les impacts d'une action évaluée au travers de l'agrégation de différentes échelles. Toute entreprise humaine doit faire l'objet d'une attention à toutes les échelles. Il s'agit de les considérer et de les agréger de la plus petite, l'échelle locale, constituée par exemple par la matière première utilisée, à la plus grande, l'échelle terrestre, soit une échelle globale et les conséquences que cette dernière peut subir ou induire. La notion introduit aussi la nécessité d'une prise en compte du cycle de vie complet lors des actions. Cet aspect a donné lieu à la formulation d'une prise en compte du « berceau au tombeau » de la vie des produits dans le cadre des évaluations.

Ces trois interprétations fixent donc la notion du développement soutenable dans une perspective temporelle.

Ces perspectives d'approche du développement soutenable justifient le questionnement des impacts du temps et de la durée des activités anthropiques.

Précision terminologique

La question du développement soutenable appelle une précision terminologique. Le rapport Bruntland définissait le concept du « Sustainable development » (WCED, 1987). Le concept a été traduit dans la langue française par « développement durable ». Cette traduction peut parfois entraîner des confusions. Celles-ci proviennent en partie de la difficulté à traduire de façon satisfaisante l'expression anglaise de « sustainable » qui désigne « l'action de supporter, d'entretenir, de nourrir ». Parfois, par raccourci, le français utilise le terme de « durabilité ». L'analogie avec la notion de pérennité attachée à la durabilité est la source de ces confusions. Afin de lever l'ambiguïté, nous employons le terme de développement *soutenable* dans cette thèse. Les justifications de cette position sont les suivantes :

- d'une part, la traduction du terme anglais la plus fidèle est bien le terme « soutenable »
- d'autre part, il existe un vieux terme français, « soustenir » que l'on retrouve dans les ordonnances royales qui s'appliquent à l'entretien des forêts et dans lesquelles on affirme la nécessité de « soustenir » celles-ci en bon état. Ce terme a donc un sens très précis en français ;
- ensuite, le terme de durable implique la notion de durée des phénomènes pris en compte, comme si le principal souci consistait à vouloir faire durer le développement alors que la soutenabilité insiste plus sur les questions relatives à la répartition sociale des richesses créées à la fois à l'intérieur d'une même génération mais aussi entre les différentes générations ;
- enfin, le problème vient aussi de l'ambiguïté liée à la notion de développement. La diversité des sens affectés à ce concept, des paradigmes qui le supportent et les différentes approches que constituent les analyses qui lui sont dédiées montrent la difficulté de poser de façon définitive le sens d'un tel concept.

Le terme de « développement durable » est conservé uniquement lorsqu'il s'agit des titres et des citations d'auteurs. Le terme de durabilité est réservé à la notion de durée de vie.

2. Le bâtiment et le développement soutenable : une demande institutionnelle

L'importance du développement soutenable n'est plus à démontrer. La prise de conscience des individus est telle qu'elle a entraîné l'expression d'une volonté politique forte de la part des institutions. L'Union Européenne, dans son article 2 du traité, stipule que le développement soutenable constitue en objectif fondamental de l'Union. A ce titre, une stratégie en faveur du développement soutenable a été adoptée en juin 2001 par le Conseil européen de Göteborg. Il a été précisé « *qu'il est nécessaire de tenir compte des conséquences économiques, sociales et environnementales au travers des processus de décision des actions publiques* ».

Le secteur de la construction, compte tenu de l'importance de son activité, est l'un des premiers concernés par le développement soutenable qu'il s'agisse d'émission à gaz à effet de serre, d'épuisement des ressources naturelles, de production de déchets ou encore d'impacts économiques et sociaux.

Des organismes, publics ou professionnels, interpellent les spécialistes sur les questions qui lient le développement soutenable et la durée de vie. L'Agence Nationale de la Recherche (ANR) précise, dans son appel à projets « Ville et Développement soutenable » de 2008, l'intérêt qu'elle porte aux outils de gestion patrimoniale et d'aide à la décision qui doivent permettre d'optimiser le coût global pour la durée de vie prévue des bâtiments et d'informer sur les avantages de la prolongation de celle-ci. Cette demande est réitérée dans les appels à projets de 2009, 2010 et 2011 sous l'intitulé « Ville durable » (ANR-Ville durable, 2011) de manière plus globale et liée. Tout d'abord, *l'axe de travail projeté cherche à prendre en compte l'imbrication des échelles spatiales « du bâtiment/infrastructure - voire des matériaux qui les constituent - à l'aire urbaine » et des échelles temporelles*. Ensuite, l'ANR propose, au travers des échelles spatiales et temporelles, une approche transdisciplinaire. L'aspect temporel est repris à nouveau au travers de l'incitation à proposer des innovations qui permettront de développer les capacités d'adaptabilité des constructions aux besoins des générations futures. Toujours dans l'appel à projet « Ville durable », l'ANR suggère qu'au travers des projets proposés, il soit pensé à : « *une flexibilité des équipements et des infrastructures réfléchie dès leur conception, afin de permettre, à moindre coût, leur adaptation à des préoccupations et des besoins nouveaux ou saisonniers (confort, consommations énergétiques, nouveaux usages...), l'intégration aisée pendant leur vie de percées technologiques ou d'innovations et leur déconstruction ultérieure, et enfin à la prolongation de la durée de vie au-delà de ce qui était initialement prévu* »

Dans le cadre du développement soutenable et au travers des propositions de ces axes de travail, l'ANR demande explicitement de tenir compte de la question de l'impact de la durée de vie des aménagements auxquels participe le bâtiment placé dans une perspective de production de la ville jusqu'à l'échelle du territoire.

3. La recherche scientifique et l'approche du développement soutenable

Au prétexte que le développement soutenable ne constituerait pas une discipline académique spécifique, il est parfois entendu que la communauté scientifique ne devrait pas investir ce champ au travers d'un questionnement.

Les politiques, les organisations commerciales ou industrielles et la société civile se sont emparées de la notion de développement soutenable et s'y réfèrent souvent à outrance. La recherche et ses acteurs doivent-ils s'exclure des questions propres au développement soutenable ? E. Zaccàï, emprunte à P. Bourdieu (Bourdieu, 1995), (Bourdieu, 2001) la notion de champs disciplinaires scientifiques. Il analyse le statut du développement soutenable en tant que science et le rapport que celui-ci doit entretenir avec la recherche. Pour se faire, il propose une caractérisation du développement soutenable en retenant cinq éléments qui sont :

- l'importance donnée à l'environnement ;
- la vision à long terme ;
- la vision mondiale ;
- l'intégration des dimensions du développement ;
- et l'affirmation de la nouveauté du projet.

Il déduit de ces caractéristiques la nécessité d'investiguer ce champ et la responsabilité du chercheur au regard des enjeux en présence et des besoins de la société (Zaccàï, 2008). La difficulté de l'approche par la recherche vient de son cloisonnement dans les confrontations transdisciplinaires.

Le développement soutenable a pour composantes initiales, d'une part l'environnement, soit une affiliation avec les sciences naturelles, et d'autre part les sciences humaines et sociales au travers du développement. Ces deux composantes offrent au développement soutenable son intérêt et ses difficultés (Redclift, 1999). On voit donc la nécessité de l'interdisciplinarité dans l'approche scientifique.

Pourtant, ces deux derniers siècles ont vu le cloisonnement croissant des sciences. Kuhn observe que les principales disciplines scientifiques ont leurs communautés bien établies (Kuhn, 1983). Les membres de ces communautés ont « *tous eu une formation et une initiation professionnelle semblables, à un degré inégalé dans la plupart des disciplines. [...] ils ont assimilé la même littérature technique et en ont retiré dans l'ensemble le même enseignement* ». Ceci explique qu'ils évitent en général de dépasser les limites de leurs frontières disciplinaires. A-M Boudet, Professeur Émérite à l'Université Paul Sabatier propose une explication aux raisons du cloisonnement : « *Simplifier la complexité ; Nos limites mentales et notre paresse intellectuelle qui ne nous incitent pas à sortir d'un cadre parfois simplificateur ; Souci de confort et de sécurité où l'on utilise un langage commun avec des proches qui nous permet de nous sentir bien avec les nôtres et nous rassure...* » (Boudet, 2009). L'explication de cette spécialisation est encore développée par Edgar Morin (Morin, 1973) qui précise la vertu de la spécialisation : « *la discipline est une catégorie organisationnelle au sein de la connaissance scientifique. Elle y institue la division et la spécialisation du travail.* » Bien qu'englobée dans un ensemble scientifique plus vaste, une discipline tend naturellement à l'autonomie. Mais E. Morin précise par la suite le risque de l'hyperspécialisation. « *Il ne suffit pas d'être à l'intérieur d'une discipline pour connaître tous les problèmes afférents à celle-ci et il existe un risque de «chosification» de l'objet étudié dont on risque d'oublier qu'il est extrait ou construit. L'objet de la discipline sera alors perçu comme une chose en soi. Les liaisons et solidarités de cet objet avec d'autres objets, traités par d'autres disciplines, seront négligées* ». En l'absence de décloisonnement, le développement soutenable est réinterprété par différentes disciplines. Des concepts comme la matière, la vie ou l'environnement, le développement, sont eux aussi réinterprétés et n'ont pas la même signification selon les approches. « *Déjà, l'évaluation globale des seules atteintes sur l'environnement, n'est plus du ressort d'un seul spécialiste car il n'existe pas de méthode scientifique universellement admise pour agréger les conséquences des atteintes qui ont trait à des phénomènes aussi différents. L'évaluation globale d'un état futur est une démarche interdisciplinaire* » (Simos, 1997).

Pour mieux analyser la complexité, on découpe en sous-ensembles mais en même temps cela éloigne de la capacité à appréhender les choses globalement. Nous sommes de plus en plus conditionnés par une démarche analytique et nous nous éloignons d'une démarche systémique. Cette complexité se manifeste au niveau des objets d'études individuels, au niveau des problématiques intégrées qui sont multi-paramétriques et au niveau des interactions qui se développent entre science et technologie et entre société, économie et éthique (Doudet, 2009).

En résumé, le développement soutenable est donc un champ d'investigation pour la communauté scientifique qui ne peut en faire abstraction. Pour une investigation rigoureuse, le chercheur doit aussi dépasser son domaine d'expertise. Parallèlement à la démarche scientifique traditionnelle, le décloisonnement et l'approche systémique sont donc nécessaires pour une approche raisonnée du développement soutenable par les scientifiques.

II. Positionnement du travail et problématique générale

1. Le questionnement initial

Notre problématique est sous-tendue par la question initiale suivante :

Comment la durée de vie des bâtiments peut-elle influencer les performances d'une approche en termes de développement soutenable ?

Cette question implique que soient analysés les facteurs et les liens qu'entretiennent :

- le bâtiment et la durée de vie
- le bâtiment et le développement soutenable ;
- les implications de la durée de vie du bâtiment sur le développement soutenable

Ces liens sont brièvement explicités ci-dessous

2. La durée de vie des bâtiments et l'approche de développement soutenable

2.1 La durée de vie des bâtiments dans l'approche de développement soutenable

La notion de développement soutenable implique que les choix d'aujourd'hui ne limitent pas les possibilités des générations futures. C'est précisément une des questions posées dans l'acte de bâtir. Comment concevoir et réaliser une construction qui soit équitable entre les générations c'est-à-dire qui satisfasse les besoins des usagers sans compromettre les possibilités futures?

Dans son manifeste « développement durable et architecture responsable » (CNOA, 2007), l'Ordre des Architectes rappelle que:

« Les constructions et projets d'urbanisme doivent être pensés dans le long terme, ce qui implique non seulement d'envisager l'évolution fonctionnelle d'un bâtiment ou d'un quartier d'un point de vue technique mais également de réfléchir à ses évolutions en échangeant avec les différentes parties prenantes du projet. Un bâtiment doit désormais pouvoir facilement être réattribué à d'autres types d'activités que celles prévues initialement en minimisant les coûts écologiques et économiques de ces évolutions, mais également s'adapter aux exigences et besoins des utilisateurs. ».

De son côté, en 2009, dans le rapport de son assemblée générale, le Conseil des Architectes d'Europe (CAE, 2009), tente de sensibiliser à la question de la durée de vie en rappelant « *qu'il importe de tenir compte de l'ensemble du cycle de vie du bâtiment en évitant les tentatives à courte vue de minimiser seulement le coût initial* ». Il ajoute « *qu'une stratégie de développement durable cherchera à prolonger la vie des structures existantes et à favoriser par conséquent l'utilisation des matériaux à l'aide desquels elles ont été construites à l'origine. L'adaptation est généralement préférable à un nouveau bâtiment et l'amélioration de la performance représente généralement un déploiement efficace de ressources.* »

Déjà, Léon Batiste Alberti, architecte de la Renaissance, dans son « Art d'édifier » (Caye et al., 2004), critique la solution de facilité comprise dans l'acte de démolir. En s'adressant aux architectes il dit : « *les architectes incompetents sont incapables de disposer ces angles tant que l'aire ne se trouve pas débarrassée de tout ce qui l'occupe et que le sol n'a*

pas été libéré et entièrement aplani. À cette fin, ils lancent incontinent sur le site des démolisseurs armés de leur masse pour tout renverser et détruire. Ils commettent là une erreur qu'il faut stigmatiser; en effet, les revers de fortune, l'adversité des temps, le hasard et la nécessité peuvent susciter des situations qui t'interdisent et t'empêchent de poursuivre ce que tu as commencé ; en attendant, il est indigne de sacrifier les travaux de nos aînés sans tenir compte des commodités que les citoyens tirent des anciennes demeures de leurs ancêtres, alors qu'il reste toujours en notre pouvoir de détruire, d'abattre, et d'arracher entièrement toutes choses en tout lieu. ».

Cette attitude qui peut être considérée comme conservatrice, s'adresse aux bâtiments en usage. Elle répond, d'après les commentaires de Caye et Choay, à deux préoccupations : « *d'une part, du point de vue du constructeur, le statut des bâtiments construits selon les règles les voue à la durée, tandis qu'à contrario les bâtiments mal construits ne méritent pas d'être conservés. D'autre part, du point de vue du citoyen, les ouvrages édifiés par les générations antérieures pour abriter leurs institutions appellent la fidélité mémoriale et le respect.* » (Caye, 2004)

A l'opposé, des acteurs s'interrogent sur la nécessité de réaliser des constructions pour une durée de 30 ans qu'ils considèrent comme un temps long (Babey, 2003). Ils justifient ce questionnement sur la base de deux arguments. Le premier concerne l'accélération de l'évolution des technologies. Construire pour longtemps signifie réduire l'accessibilité des occupants à ces nouvelles technologies. Par ailleurs, le nomadisme des populations grandissant, le besoin est davantage éphémère. Des durées de vie courtes des constructions permettent une meilleure adéquation entre le besoin et l'offre..

Parallèlement, des travaux scientifiques d'évaluation des structures fournissent des résultats statistiques et probabilistes de la durée de vie des bâtiments. (Re Cecconi, 2003), (Crémona, 2003), (Proccacia et al., 2006), (Talon, 2006),... Mais qu'en est-il des durées réelles ? Quel est l'impact du comportement des propriétaires et des usagers sur la durée de vie des bâtiments ? Quels sont les impacts des politiques et des réglementations mises en place ? Les impacts de la durée de vie des bâtiments n'ont pas été approfondis dans le rapport de celle-ci au développement soutenable.

2.2. Le développement soutenable et le bâtiment

La société civile a progressivement investie la notion de développement soutenable qui ne semble plus pouvoir être délaissée. Progressivement, les plus sceptiques ont admis la nécessité d'une prise en compte des activités humaines et de leurs impacts. Cependant, la rapidité d'appropriation collective n'a pas permis l'acquisition d'une maturité de la notion de développement soutenable, garante d'une fondation scientifique solide et immuable. La notion de développement soutenable est donc rentrée dans le langage commun ainsi que dans les discours mais elle ne semble pas avoir fait l'objet d'un approfondissement permettant l'établissement d'un réel consensus. Seule une définition générale, contenue dans le rapport Bruntland G.H (WCED, 1987), paraît collectivement admise. L'application de la notion semble rester imprécise lorsqu'elle est utilisée dans un domaine particulier. En l'état et en ce qui concerne le bâtiment, la notion de développement soutenable est une réalité empirique et pratique qui traite de la consommation de ressources naturelles et de la production de diverses nuisances.

En synthèse, aborder une question traitant du développement soutenable dans le domaine du bâtiment impliquera un travail de définition et de délimitation du cadre d'étude.

2.3. La multiplication des contraintes lors de la conception des bâtiments

Parce que le processus de conception architectural est un travail de consensus, la multiplication des contraintes, nécessairement prises en compte lors du choix des solutions techniques rend plus complexe l'exercice. Aujourd'hui, il est important de prendre en compte les notions de développement soutenable dans ces choix. Les performances des solutions techniques utilisées dans le bâtiment en termes de développement soutenable ne sont pas directement intelligibles pour le concepteur. Une des raisons tient dans le fait que les performances attendues ne résultent pas d'un corpus de connaissances homogènes communément admises. Ces performances relèvent d'une ingénierie aux contenus complexes, variés et aux outils d'évaluation d'un niveau d'expertise élevé. De plus, les décisions concernant les choix de solutions techniques lors de la conception architecturale doivent s'inscrire dans un temps « long » correspondant aux échelles de durée de vie du bâtiment soit, parfois plusieurs siècles. Comment cette question des impacts de la durée de vie du bâtiment et de ses conséquences peut-elle être appréhendée ? Qui est interpellé par la question ? Comment introduire ces informations dans le processus de conception ? Enfin, à quelle étape du développement du projet, ces informations sont-elles utilisables ?

Les points énoncés ci-dessus constituent la structure de l'état de l'art.

3. L'organisation de la thèse

Notre thèse s'articule en quatre chapitres.

Le premier chapitre présente le contexte de la recherche. Il comprend quatre sections. La première présente les connaissances qui portent sur la question de la durée de vie du bâtiment. L'analyse de la durée de vie du bâtiment comprend l'analyse de la durée de vie fonctionnelle et celle de la durée de vie technique. La seconde section présente les connaissances du bâtiment dans une approche de développement soutenable. La troisième expose l'organisation du processus de conception architecturale. La structure du développement du projet architectural doit permettre de fixer les modalités de l'exploitation des connaissances produites. Enfin, la dernière section permet d'établir la définition précise du sujet de la recherche.

Le second chapitre présente la méthode mise en œuvre dans cette étude. Suite à la définition précise de la question et de l'objet étudié, des indicateurs sont fixés, les données utilisées précisées et enfin, la méthode est énoncée.

Le troisième chapitre comprend la mise en œuvre de la méthode établie précédemment, présente les résultats obtenus et leurs analyses. Ce chapitre est composé de trois phases successives articulées. La première étudie les indicateurs de comportement de l'objet dans l'approche environnementale afin d'en réduire le nombre à observer tout en cherchant à conserver la représentativité du comportement. La seconde comprend l'étude d'une unité de mur porteur extérieur permettant d'obtenir une première série de résultats et de valider la méthode. La troisième phase, qui s'appuie sur la méthode de la phase précédente, permet la production de résultats dont les échelles sont plus représentatives et commensurables. Ces deux dernières phases font l'objet d'analyse des résultats, de précision des limites et de conclusions.

Le quatrième chapitre a pour objet de fixer les bases qui permettent l'exploitation des connaissances produites. Cette partie comprend donc le développement d'un cahier des charges d'un outil permettant l'amélioration de la mesure des performances grâce à une meilleure prise en compte de l'impact de la durée de vie.

Pour finir, le rapport présente une conclusion ainsi que les perspectives et prolongements envisageables.

CHAPITRE I : CONTEXTE DE LA RECHERCHE

La problématique générale implique une analyse détaillée de l'état de l'art. Celui-ci concerne le bâtiment et la durée de vie, le bâtiment et le développement soutenable et enfin la gestion du projet architectural.

I.1. Le bâtiment et la durée de vie

L'objet de ce sous-chapitre est d'étudier la durée de vie du bâtiment. Une première section décrit les mécanismes de vieillissement et d'obsolescence. La seconde section présente les caractéristiques des vies physique et technique du bâtiment qui permettront la production de définitions. Lorsqu'ils existent, les outils et méthodes de mesure de la durée de vie sont mentionnés tandis que leur absence est précisée. Enfin la dernière section tente d'analyser synthétiquement les conséquences de la durée de vie des bâtiments.

I.1.1. Le vieillissement du bâtiment

Analyser le vieillissement du bâtiment, implique que celui-ci soit défini. A cette fin, nous empruntons la définition contenue dans le « Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement » (Choay, 2010).

1/ Bâtiment voir construction

2/ Par extension les édifices que l'on construit ; mais le bâtiment et l'édifice ne sont pas exactement synonymes. Un bâtiment désigne toute construction qui sert d'abri aux hommes, animaux, objets. Il désigne aussi le secteur d'activité économique correspondant à la construction.

C'est dans le sens de « construction qui sert d'abri aux hommes, animaux, objet » que nous utilisons le mot « bâtiment ». Lorsqu'il s'agira de l'ensemble de l'activité du bâtiment, le terme utilisé est celui de « secteur du bâtiment ».

A. Le vieillissement

Le vieillissement des objets se définit comme l'accroissement du risque de mortalité avec le temps. (Miller R., 2002). Les objets vieillissent autant que les espèces vivantes. Le vocabulaire de l'ingénieur d'ailleurs s'inspire largement de celui du monde des vivants : vieillissement, bien sûr, mais aussi pathologie, niveau de désordre, perte d'endurance, réduction de durée de vie, mémoire de forme ou fatigue,...

André Zaoui, dans la lettre n°3/printemps 2002 de l'Académie des sciences (Zaoui, 2002), explique que les produits fabriqués « *subissent des contraintes variant entre le moment de la fabrication et celui de l'usage. Les matériaux qui les composent subissent « une force motrice implacable engendrée par ce déséquilibre thermo-dynamique, qui agira inéluctablement pour le réduire en modifiant l'architecture intime de la matière et les propriétés dont elle est responsable : c'est le vieillissement* »... « *Le processus est qualifié de « vieillissement thermique » car, derrière le temps, responsable apparent, se cache la toute-puissante température et sa manière de régir l'activation thermique, la vraie coupable, et son obscur travail de sape* ».

Le vieillissement est aussi la réaction du produit à l'usage qui peut correspondre également à une augmentation de température interne. C'est le phénomène d'usure. Même si assez récemment, certains matériaux, tels que des bétons, ont été conçus pour se réparer eux-

mêmes (Wang et Lorente, 2006), leur durée de vie est prolongée mais ils restent malgré tout l'objet d'un vieillissement.

Concernant le vieillissement des immeubles et des quartiers, le mécanisme de dégradation, attaché au statut du propriétaire et associé à l'entretien, a été très précisément décrit (Lévy et al., 1992). Ce vieillissement est largement attaché à l'évolution sociale des occupants dont le départ engendre inexorablement un remplacement par un occupant acceptant un état un peu plus dégradé. Cet état de fait entraîne le voisin à la même démarche, tandis que le bâtiment, de proche en proche, se dégrade et ne fait l'objet que d'un entretien minimum.

Par ailleurs, la description du phénomène « mécanique » de vieillissement de la ville et des bâtiments qui la compose, peut aussi s'appuyer sur des analyses démographiques (Le Bras, 1976). Les arrivants de nouveaux quartiers présentent un profil social relativement homogène. Cette homogénéité entraîne un vieillissement similaire de la population et, par là, de la vie sociale du quartier.

B. L'obsolescence

Dans le domaine des biens consommés, il se produit le phénomène d'obsolescence. C'est-à-dire que le produit, indépendamment de ses caractéristiques physiques, ne répond plus aux besoins qui ont évolué. Sous couvert d'une démarche de qualité, à l'aide d'outils tel que l'analyse de la valeur, les durées de vie des objets qui nous entourent visent la stricte satisfaction du besoin du consommateur. Conséquence d'une mercatique aux outils de plus en plus performants, les besoins évoluent de plus en plus vite et les durées des cycles de vie commerciale des produits se réduisent dans tous les secteurs. Par exemple, dans l'automobile, la durée du cycle de vie d'un modèle était de 14 ans dans les années 1960 pour se réduire à 10 ans en 1975 (Dupuy et al., 1975) et à environ 6 ans y compris un restylage intermédiaire aujourd'hui. Il en résulte une durée de renouvellement par le consommateur diminuée. Ce phénomène amène certains analystes critiques à parler d'obsolescence programmée. Cette notion consiste à introduire la programmation de la fin de vie d'un produit lors de sa conception ou de sa réalisation. Ainsi, la filière aurait la certitude d'une obligation de renouvellement par l'utilisateur. A l'opposé, les mercaticiens associent ce phénomène d'obsolescence à la « création de nouveaux besoins ». Cette position est validée par une mise au rebut des produits ménagers antérieurement à leur défaillance technique (Cooper, 2004). Par ailleurs, les défenseurs de l'activité industrielle rétorqueront, que cet état de fait est le corolaire de coûts optimisés et donc de prix de vente réduits.

Dans le secteur du bâtiment, au travers d'un savoir-faire s'affinant et se précisant, les bâtiments ont souvent traversé des siècles. Il suffit de se promener dans nos centres anciens et historiques pour constater qu'une grande proportion du bâti a perduré tout au moins en ce qui concerne la structure. Cette observation amène une interrogation sur ce phénomène d'obsolescence parfaitement décrit par C. Lemer (Lemer AC, 1996). Les caractéristiques d'un grand nombre de bâtiments, associées à la volonté de leurs propriétaires successifs, ont permis leurs adaptations continues ou saccadées repoussant dans le temps les conséquences d'une éventuelle obsolescence.

I.1.2. Le bâtiment, les produits de construction et la durée de vie

Des études montrent que les biens d'équipement ménager ne sont que rarement mis au rebut et détruits avec pour cause la panne technique ou la peur de sa réalisation (Cooper T., 2004). Bien que les bâtiments ne soient probablement pas uniquement des biens de consommation courante, il paraît nécessaire d'étudier les causes qui entraineront la fin de vie. L'objet de ce paragraphe est de lister le plus exhaustivement possible les facteurs susceptibles de modifier le déroulement du cycle de vie et d'en analyser les mécanismes. A cette fin, il est nécessaire de dissocier la durée de vie « technique », de la durée de vie « fonctionnelle ».

A. La durée de vie « technique » et ses outils d'évaluation

La durée de vie technique résulte de l'usure liée à l'usage et à l'effet du temps. La question de la durée de vie des ouvrages d'art a été abordée dès la fin des années 1970. La question de l'évaluation de la durée de vie des bâtiments et surtout des produits qui les composent est abordée depuis les années 1990. Sur la base d'analyses structurelles et fonctionnelles des éléments composant le bâtiment, les causes de défaillance sont établies et les durées de vie évaluées. Concernant les outils d'évaluation de durée de vie, de grands progrès ont été réalisés. Les méthodes et outils d'évaluation des durées de vie utilisant les calculs statistiques et les modèles de défaillance, sont précisément décrits et mis en œuvre (Lair, 2000), (Talon, 2006).

A.1. Durée de vie technique des produits et du bâtiment

La durée de vie technique des produits composant le bâtiment peut être évaluée avec une probabilité précise. A. Talon (Talon, 2006) a ainsi établi que la durée de vie technique d'une fenêtre PVC à double vitrage se situe entre 23 et 27 ans. Tous les éléments défaillants d'un bâtiment n'entraînent pas la fin de vie de celui-ci. Une analyse systémique du bâtiment permet de produire une liste exhaustive des éléments dont la défaillance amène la fin de vie du bâtiment. Le tableau détaillé ci-après permet cette analyse.

Composants	Fonction	Risques	Lien avec les autres éléments	Risque pour le bâtiment
Fondations	Répartition des charges sur le support	Rupture	Non échangeable	X
Structure porteuse : murs, poteaux	Reprendre les charges supérieures et sa propre charge, les transmettre jusqu'au sol	Rupture mécanique	Non échangeable	X
Isolant thermique	Réduire les échanges entre l'intérieur et l'extérieur	Détérioration et perte d'efficacité	Echangeable	
Revêtement extérieur	Protéger des agressions climatiques et regards extérieurs	Diminution de l'imperméabilité	Echangeable	
		Aspect esthétique dégradé	Echangeable	
Revêtement intérieur	Supporter la finition Protéger l'isolant	Détérioration	Echangeable	
Dalles/ Planchers	Permettre les fonctions d'usage de la vie quotidienne	Rupture mécanique	Non échangeable	X
		Augmentation du standard de confort		
Cloisons	Réaliser la distribution interne du logement	Modification des besoins	Echangeable	
		Rupture mécanique		
Charpente	Supporter la couverture	Rupture mécanique	Echangeable	
Couverture	Protéger l'ensemble du logement	Rupture mécanique	Echangeable	
		Destruction par soulèvement		
Menuiseries/ Volets	Favoriser l'éclairage Permettre l'aération Isoler de l'extérieur (thermique et phonique)	Perte d'étanchéité	Echangeable	
		Rupture mécanique		
Finition	Embellir l'aspect	Dégradation de l'aspect	Echangeable	
Equipements	Améliorer le confort	Pannes	Echangeable	
Risques accidentels internes sur les éléments				
Incendie				X
explosions				X

Tableau 1 : *Analyse des risques techniques des éléments du bâtiment*

En résumé, concernant l'impact de la durée de vie des composants sur le bâtiment, seules les fondations, les murs porteurs et, dans une moindre mesure les planchers, dont la fiabilité serait douteuse, sont susceptibles d'amener à la destruction du bâtiment. La probabilité de démolition ne se réalise que lors d'un constat de dommage généralisé. Lorsque le dommage est partiel, il est encore possible que le bâtiment soit réparé. Les autres composants, dont la durée de vie est parfois très courte, n'ont aucun impact direct sur la pérennité du bâtiment. Par exemple, les menuiseries seront changées dès qu'elles n'assureront plus l'étanchéité ou la protection d'intrusion. La couverture sera vérifiée, voire déposée et reposée,... Enfin, il existe deux risques techniques internes de fin de vie. Il s'agit des risques d'incendie ou d'explosion. C'est donc la durée de vie mécanique de la structure qui engendre la durée de vie technique du bâtiment. Pour le calcul de dimensionnement des structures, l'EUROCODE 0, mis en application le 1^{er} mars 2010, définit la durée de vie de référence des bâtiments en fonction du type d'usage. Pour les bâtiments courants, la durée fixée est de 50 ans.

A.2. Les outils

Ces dernières décennies, plusieurs normes ont été produites

Les études réalisées ont donné naissance à un certain nombre de normes et réglementations en support de calcul de durée de vie :

- 1978 norme américaine ASTM E 632-82 du sous-comité E06.22 de l'American Society for Testing and Materials
- 1988 : norme française NF X 60-500
- 1992 : norme britannique BS 7543
- 1993 : version anglaise du guide japonais de l'Architectural Institute of Japan
- 1995 : guide canadien CSA S478-95 de la Canadian Standards Association
- 2000 : ISO 15686 - Buildings and constructed assets – Service life planning
- 2010 : EUROCODE 0 précisant les modalités pour les calculs de structure d'un bâtiment ainsi que les durées de vie.

Le développement d'outils a imposé l'établissement de définitions résumées dans l'ISO 15686-1 - Bâtiments et biens immobiliers construits -- Conception prenant en compte la durée de vie -- Partie 1: Principes généraux et cadre -. Ces définitions sont les suivantes :

- Durée de vie de conception : « durée de vie recherchée par le concepteur », par exemple la durée de vie de conception du viaduc de Millau est fixée à 120 ans,
- Durée de vie de référence : « durée de vie prévue d'un produit, d'un composant, d'un assemblage ou d'un système pour un ensemble particulier ». Cette vie peut-être obtenue sur la base d'évaluation faisant suite à des essais de vieillissement accéléré.
- Durée de vie estimée : « durée de vie prévue d'un bâtiment ou des composants de bâtiment pour un ensemble de conditions de service spécifiques, déterminée à partir de données de durée de vie de référence en prenant en compte les différences de conditions de service », par exemple l'estimation de la durée de vie d'une fenêtre sous des conditions différentes à partir de la durée de vie de référence précédente.
- Durée de vie résiduelle : « durée de vie restante à partir du moment considéré »,

En synthèse, la norme ISO 15686 présente une définition collectivement admise. La durée de vie y est définie comme « ***le laps de temps après mise en œuvre pendant lequel un bâtiment ou des composants de bâtiment atteint ou dépasse les exigences de performance*** ».

Enfin, différentes méthodes d'évaluation des durées de vie techniques ont été développées. Ces méthodes sont présentées dans le tableau ci-après (Talon, 2006).

Approche	Données utilisées	Echelle	Avantages	Limites
Approche fiabiliste	Données expérimentales obtenues selon des expositions sur le terrain, dans des bâtiments expérimentaux, de courte durée accélérée.	Matériau Produit Bâtiment	Possibilité de prendre en compte plusieurs paramètres aléatoires.	Nécessité d'une modélisation probabiliste des données.
Approche statistique	Tous types de données expérimentales.	Matériau Produit Bâtiment	Possibilité de prendre en compte plusieurs paramètres aléatoires.	Nécessité d'un grand nombre de données expérimentales.
Modèles de mécanisme de vieillissement	Données expérimentales obtenues selon des expositions sur le terrain, dans des bâtiments expérimentaux, de courte durée accélérée.	Matériau	Modélisation théorique du comportement des matériaux.	Plus le modèle est « fin » moins il est extrapolable à d'autres systèmes constructifs.
Dire d'expert	Tous types de données expérimentales.	Matériau Produit Bâtiment	Analyse rapide.	Résultats subjectifs.
Méthode des facteurs	Tous types de données expérimentales et élaborées (obtenues selon les autres approches).	Produit Bâtiment	D'application (en apparence) aisée.	Résultats subjectifs.

Tableau 2 : Comparatif des méthodes de traitement des données de durée de vie

Ces approches se distinguent les unes des autres par le type d'éléments étudiés, le type et le nombre de données expérimentales, le type d'approche (aléatoire, semi déterministe, déterministe), les temps de traitement et la précision des résultats.

Talou reproche à ces approches d'une part, le fait qu'elles n'évaluent qu'un élément à la fois et que d'autre part, les durées de vie élaborées contiennent des erreurs, imprécisions et incomplétudes dont l'origine réside essentiellement dans les modes d'acquisitions et les incertitudes liées.

Il ressort de l'analyse de cet ensemble de méthodes l'existence de possibilités sophistiquées et intéressantes de calcul d'évaluation de durée de vie des matériaux, des produits et des bâtiments. Mais comment ces modèles de calculs auraient-ils appréhendé la durée de vie des bâtiments du 16 ou du 17ème siècles ou encore de grandes fenêtres du 18ème siècle parfois toujours en service? Le comportement des décideurs, acteurs dans une société de consommation, attachée au renouvellement rapide des biens, pourrait être un facteur pouvant modifier la durée de vie. Par ailleurs, la nécessité d'approches plus globales et la prise en compte, par exemple, de critères socio-économiques sont énoncées (Baroghel-Bouny, 2008).

B. Les durées de vie fonctionnelles des produits et des bâtiments.

A. Sarja (Sarja, 2009) a analysé les études et les outils traitant de la durée de vie des bâtiments sur les principes techniques et d'obsolescence. Dans son article, il décrit l'urgence de développer des outils renseignant sur la durée de vie et les états limites de l'obsolescence tout en rappelant que la question n'est pas du ressort de l'étude des matériaux.

L'analyse de la durée de vie fonctionnelle du bâtiment s'attache davantage à son rôle social et donc à la réponse qu'il donne aux besoins. La durée de vie du bâtiment peut être affectée par les modifications fonctionnelles, c'est-à-dire des changements importants des besoins auxquels il peut répondre. Afin d'explicitier de manière exhaustive les risques pesant sur la durée de vie, la démarche proposée ici est de type fonctionnelle et systémique (Bertalanffy, 1968). Sur la base de la Méthode APTE[®] (Brethesh, 2000) les différentes fonctions du bâtiment sont analysées et évaluées. Le bâtiment, répondant à un ensemble de fonctions d'usage, est replacé dans son environnement. Après avoir listé les différents éléments du système et nommé les fonctions associées, la démarche a consisté à analyser et évaluer l'impact des risques des dégradations fonctionnelles sur la durée de vie du bâtiment.

Pour chaque fonction établie, il est nécessaire de se poser les questions : « Qu'est-ce qui peut faire disparaître le besoin ? Qu'est ce qui peut le faire évoluer ? Quelle en est la grandeur de risque ?

Les fonctions du bâtiment et les risques associés sont présentés dans le tableau ci-après.

Référence	Elément du système concerné par la fonction	Fonctions	risques	Impact sur durée de vie du bât
FI1	Occupants / Environnement extérieur	Permettre aux occupants de se protéger de l'environnement extérieur	Défaillance des composants échangeables	
			composants non échangeables	X
FI2	Occupants/Activités et milieu	Permettre aux occupants de réaliser les activités familiales, sociales et professionnelles	Inadaptation à des nouveaux besoins, modification ou absence d'offres sociales et professionnelles	X
FA1	climat	Résister aux agressions extérieures : vent, pluie, neige, UV, chaleur, catastrophe naturelles...	Défaillance des composants échangeables	
			Composants non échangeables	X
FA2	Environnement extérieur	Réduire l'impact environnemental sur l'ensemble du cycle de vie	Nuisances importantes ex : consommation énergétique importante	
FA3	Maintenabilité / Sécurité	Faciliter l'entretien	Absence d'entretien sur le long terme	X
FA4	Passant	S'intégrer au paysage, l'enrichir et flatter le regard du passant	Modification du paysage et modification de la perception	
FA 5	Images de soi	Correspondre à l'image que l'occupant a de lui et qu'il veut qu'on ait de lui	Ne plus correspondre à une image de soi	X
FA 6	Patrimoine	Participer au patrimoine	Ne plus avoir de valeur patrimoniale	X
FA 7	Culture	Participer au patrimoine culturel	Ne plus avoir de valeur culturelle	

Tableau 3 : Tableau fonctionnel – Risques d'obsolescence

Les causes pouvant modifier la durée de vie sont donc nombreuses.
Les fonctions comprenant un risque pouvant produire la démolition sont :

- FI1 - Le bâtiment ne permettant plus de protéger ses occupants de l'environnement extérieur à cause de la défaillance de composants non échangeables entraîne la démolition. *Exemple : risque d'effondrement lié à des désordres structurels ou terrain instable; Equipement proche à grande nuisance.* La réalisation de ces risques est relativement faible.

- FI2 - Le bâtiment qui ne permet plus la réalisation d'activités sociales ou professionnelles *Ex : Disparition de toutes activités professionnelles, sociales ou touristiques* ou qui ne favorisent pas les relations du milieu dans lequel il se situe *ex : grands ensembles qui ne reprennent pas, ou insuffisamment, les fonctions intégrées de la ville.*

- FA1- Certaines réalisations de risques, tel qu'un tremblement de terre, peuvent engendrer la fin de vie du bâtiment.

- FA3 – L'absence d'entretien engendre de gros désordres sur le long terme et donc des risques d'une démolition.

- FA5 - Le bâtiment qui ne correspond plus à aucune « image de soi » que peut se faire un occupant est voué à la démolition, surtout en période de faible pression démographique.

FA6 - Le bâtiment qui n'a plus aucune valeur patrimoniale. L'absence de réponse à une fonction de patrimoine culturel ne l'expose pas à un risque important de démolition. Tandis qu'un bâtiment qui acquerrait un statut d'élément de patrimoine culturel se verrait protéger du risque de démolition

Concernant la fonction principale de protection FI1 ou FA1 d'interaction avec le climat, la dégradation des composants échangeables, tels que les menuiseries extérieures, enduits, couverture, n'ont pas d'impact direct sur la durée de vie du bâtiment. Bien que la probabilité du risque de défaillance ou d'obsolescence soit importante, ces composants peuvent être échangés ou réparés y compris tardivement. Des contraintes exogènes sont susceptibles d'entraîner la démolition. Ces contraintes sont présentées dans le tableau ci-dessous.

	Éléments	Fonctions	Risques	Impact sur la durée de vie
C1	Réglementation/ Politique	Ne pas être l'objet d'un arrête de démolition	Etre en opposition à l'intérêt public	X
C2	Marché	Résister à la pression foncière	Etre dans une zone de demande foncière importante	X
C3	Climatique	Résister aux phénomènes climatique violents	Structure endommagée	X
C4	Xylophages	Résister aux attaques des insectes	Etre attaqué par les termites	
C5	Lignivores	Résister aux attaques des champignons	Les pièces en bois attaquées par les champignons (humidité)	
C6	Pollution	Résister aux attaques des pollutions	Revêtements de façade	
C7	Explosions	Résister aux explosions extérieures	Structure endommagée	X
C8	Tremblement de terre	Résister à un tremblement de terre	Structure endommagée	X
C9	Feu	Résister à un feu d'origine externe	Structure endommagée	X

Tableau 4 : Risques extérieurs susceptibles d'entraîner la démolition

- C1 : Le bâtiment faisant l'objet d'un arrêté de démolition. *Exemple : le bâtiment se trouve sur un espace de projet d'intérêt public ou dans une zone considérée à risques pour les occupants ou encore ne présente plus le caractère de fonctionnement tel qu'on l'attend d'un élément d'îlot de la ville ;*

- C2 : le bâtiment se trouve dans une zone à la pression foncière importante due à une grande demande de logements ;

- C3 : Le bâtiment est l'objet d'un phénomène climatique violent mettant sa structure en péril ou ses occupants en danger ;

- C6, C7, C8 et C9 : des phénomènes externes tels qu'une explosion, un tremblement de terre ou un feu peuvent entraîner la démolition.

En résumé, plusieurs causes attachées aux fonctions sociales, peuvent entraîner la démolition. Il s'agit, par exemple, d'un principe de précaution¹ attaché aux catastrophes naturelles, de la disparition de toutes les activités locales, de la perte de toute valeur patrimoniale. Ce peut être encore le rejet par tout occupant de l'image reflétée par le bâtiment dont l'origine se trouve dans la médiocrité architecturale ou l'absence d'entretien. Il peut s'agir d'un bâtiment se présentant en rupture avec la cohérence et le fonctionnement d'un îlot de la ville. La fin de vie peut aussi résulter d'un phénomène accidentel interne ou externe extraordinaire. Il est à noter qu'il semble n'exister aucune étude approfondie publiée ou outil d'évaluation de ces mécanismes dans le secteur du bâtiment.

I.1.3. Les facteurs d'influence de la durée de vie

A. L'impact de l'entretien sur la durée de vie.

De nombreux articles et ouvrages ont montré l'importance d'une gestion du patrimoine immobilier en termes d'entretien (Bonetto et al., 2006). La surveillance, l'entretien, et les réparations engendrent l'extension, sous certaines conditions, de la durée de vie potentielle, tels que cela est représenté sur les graphiques ci-dessous pour un enduit de façade. (Flores-Cohen et al., 2010). Les auteurs proposent l'optimisation de la fréquence de maintenance sur la base d'une méthode systématique.

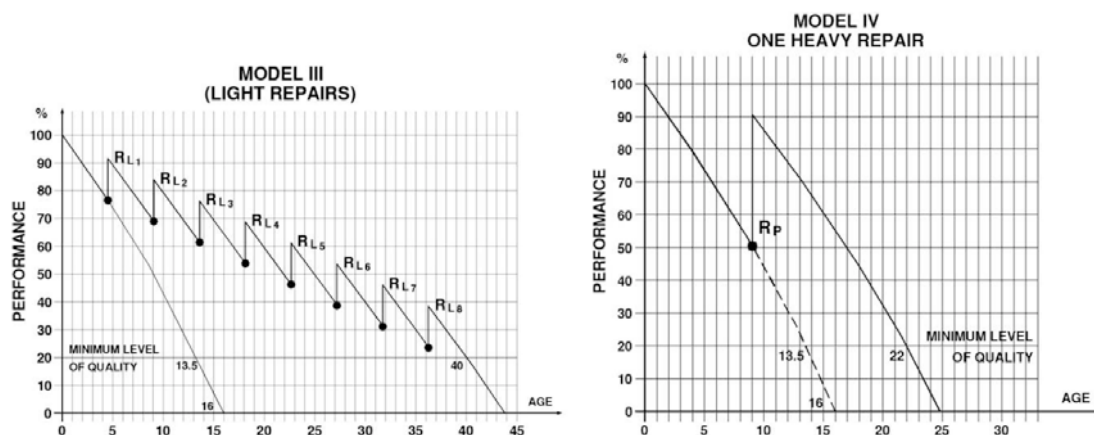


Figure 1 : Modèle de dégradation pour une façade d'enduit minéral.

¹ Sur la signification de ce principe voir Godard (1997)

La problématique consiste à prolonger la durée de vie à l'aide d'un entretien préventif et d'optimiser, économiquement, la durée de vie en rapport de l'entretien.

B. Les règles d'entretien et de maintenance

Les normes ou réglementation conseillant ou imposant l'entretien et la maintenance courante des éléments du bâtiment sont rares.

Le guide FD P 05-102 : 2003 aide à l'élaboration d'une notice de surveillance et d'entretien d'une maison individuelle ou d'une construction assimilable. Il énumère les différents ouvrages pouvant faire l'objet d'une surveillance et d'un entretien en préconisant une périodicité des opérations à effectuer. Ce document concerne tous les intervenants impliqués dans la construction de maisons individuelles,... en particulier les maîtres d'ouvrage.

Outre les équipements thermiques spécifiques, les ascenseurs, les conduits de cheminée et les VMC, les contraintes d'entretien ou de maintenance sont rares. Seuls les façades et les ouvrages à base de bois font l'objet de contraintes possibles ou de recommandations.

Les façades font l'objet d'une réglementation spécifique pouvant imposer un entretien. Il s'agit des l'articles 132-1 et suivants du code de la construction et de l'habitation du 31/12/2006 qui impose à Paris et dans les communes figurant sur une liste établie par décision de l'autorité administrative, sur proposition ou après avis conforme des Conseils Municipaux.

L'article précise : « *Les façades des immeubles doivent être constamment tenues en bon état de propreté. Les travaux nécessaires doivent être effectués au moins une fois tous les dix ans, sur l'injonction qui est faite au propriétaire par l'autorité municipale.* »

Les guides techniques d'entretien concernant les façades sont :

- DTU 42.1 - Réfection de façades en service par revêtements d'imperméabilité à base de polymère ;
- DTU 59.1 - Travaux de peinture des bâtiments ;

Par ailleurs, les ouvrages en bois doivent respecter les règles suivantes :

- DTU 36.1 - menuiserie en bois ;
- DTU 31.1 - Charpentes et escaliers en bois ;
- DTU 51.3 - Planchers en bois ou en panneaux dérivés du bois.

Ces documents comprennent les recommandations de traitement xylophage :

- de la charpente tous les 10 ans ;
- des bois extérieurs tous les 3 à 5 ans.

C. L'adaptabilité

A l'intersection de la capacité technique du bâtiment et de la réponse aux besoins fonctionnels apparaît la notion d'adaptabilité. L'adaptabilité est la capacité d'un bâtiment à s'adapter à l'évolution des besoins selon sa durée de vie². Un des critères de pérennité des bâtiments, se trouve dans la souplesse de fonctionnement qui permet l'adaptation aux évolutions des fonctions. *Exemples : les locaux des berges de la Garonne construits initialement comme lieux de stockage et de bureau au 18^{ème} siècle, devenus logements au 19^{ème} et 20^{ème} puis parfois bureaux et commerces et logements au 20^{ème} siècle.* Quelle est la performance de cette souplesse fonctionnelle en termes de développement soutenable ? Quels coûts économiques, environnementaux et sociaux, leurs mises au standard de confort et de sécurité, leur a permis de traverser les siècles ? Le gain en termes de développement soutenable, autorisé par la réutilisation de bâtiment, a été évalué (Langston et al., 2007). Comme le démontre C. Langston, le potentiel de gain de la réutilisation de bâtiment est loin d'être négligeable. Les gains sont multiples :

- économiques car en général la réhabilitation est d'un moindre coût que la démolition reconstruction ;
- temporels compte tenu du fait que le temps de rénovation est plus court que celui d'une démolition/reconstruction ;
- environnementaux grâce aux économies de ressources naturelles et réductions des impacts ;
- sociaux par la valeur d'héritage, fournie par le statut et l'image, liée à l'artisanat

Dans une démarche favorisant le développement soutenable, Kolher rappelle que les pays développés ne doivent plus construire de nouveaux bâtiments d'autant qu'en général ils se substituent à d'anciens, mais au contraire améliorer le parc existant (Kohler, 1999).

D. Le recyclage et la valorisation des produits

L'analyse en cycle de vie a induit que la fin de vie soit prise en compte. Ce paragraphe présente la question des déchets et du recyclage en chiffres. Il en détaille l'impact sur les évaluations.

D.1 Statistiques

En France, le secteur du bâtiment représente environ 15% de la production de déchets du BTP, soit 50 millions de tonnes par an (à titre de comparaison, chaque année, environ 30 millions de tonnes de déchets ménagers sont produits) (Source Ministère de l'écologie, du développement durable des transports et du logement - MEEDDM). 65% proviennent de la démolition, 28% de la réhabilitation et 7% de la construction neuve. Le secteur de la construction est l'un des principaux secteurs concerné par ces nuisances (Source MEEDDM).

Bien que l'activité de recyclage ne soit pas récente, la valorisation « matière » (recyclage) des déchets du bâtiment est estimée à moins de 50% (Source MEEDDM). La majeure partie de ce recyclage est davantage constituée par de la valorisation en remblai.

² Source : « REFERENTIEL POUR LA QUALITE ENVIRONNEMENTALE DES BATIMENTS »
12/2008 Certivéa

L'homme a depuis longtemps réalisé des actions de recyclage. De nombreux exemples antiques ont été analysés (Bernard et al., 2008). L'étude d'un exemple plus récent du programme de la construction de la Maison éclusière de Saint-Pierre à Toulouse rédigé en 1772, impose le réemploi de vieilles briques fournies par des ruines proches (source : Archive des Voies Navigables de France-Toulouse).

Concernant les pratiques en France, selon Laurence Tubiana, directrice de l'Institut du développement durable (Iddri), « *les secteurs du bâtiment et du logement sont à la traîne en matière de développement durable* ». Dans le secteur du bâtiment en France, le recyclage semble encore faible : B. Peuportier l'évalue à 60% pour le cuivre, 50% l'acier et entre 30 et 50% pour l'aluminium, le plomb et le zinc. (Peuportier, 2008). La connaissance des pratiques actuelles permet d'observer que les solutions techniques les plus utilisées ne permettent pas le recyclage, tout au plus une valorisation routière.

D.2. L'intérêt du recyclage

Au travers des modèles d'évaluation présentés par Hendriks (Hendricks et al., 2003), l'importance de la prise en compte du recyclage pour l'évaluation de la performance en termes de développement soutenable est clairement établie.

En 1995, seulement 50% des déchets étaient recyclés au Japon. Pourtant, l'économie d'énergie réalisée grâce au recyclage de l'aluminium peut être de 80%, 40% pour l'acier et en moyenne 22% pour les produits bois. Seule la réutilisation du béton engendrerait une augmentation de l'ordre de 5% d'énergie. Au travers d'une comparaison de trois exemples, la solution traditionnelle de bois massif a permis la réutilisation de 67% de matériaux en masse. (Emmanuel, R. 2004); (Arslan et al., 2008).

Pourtant, l'ossature bois est difficile à réutiliser car les connecteurs rendent difficiles la dépose sans détérioration. (Gao, 2001).

Compte tenu des modalités de l'analyse en cycle de vie, la part des matériaux réutilisés peut venir en déduction soit dans le bilan de la construction initiale soit dans celle pour laquelle les matériaux sont réutilisés. Il faudra cependant rajouter l'impact des éléments nécessaires à l'opération de dépose. Le recyclage peut poser la question des conséquences de la durée de vie des produits réutilisés sur la durée de vie du nouveau bâtiment qui pourrait être réduite. Le phénomène d'une durée amoindrie doit être pris en compte. Il est noté que la réutilisation de produits ne semble pas réduire excessivement la durée de vie du nouveau bâtiment. Par exemple, les fondations de la maison éclusière de Brienne à Toulouse, ne semblent pas avoir réduit, excessivement, la durée de vie de ce bâtiment vieux de près de 230 ans et non encore promis à la démolition.

Une observation rapide des solutions techniques utilisées en France, permet cependant de voir que le processus de recyclage est difficile.

D.3 Les conditions de la récupération

Da Rocha et Sattler ont étudié les avantages du changement de comportement dans l'industrie de la construction. L'objectif est de montrer la possibilité de créer un modèle de production plus soutenable (Da Rocha et al., 2009). L'étude porte sur les facteurs sociaux, économiques et juridiques, qui peuvent agir comme freins ou opportunités à la réutilisation des composants de bâtiment. Les résultats de l'étude de cas suggèrent que la réutilisation des composants de construction est principalement liée aux aspects économiques et sociaux tels

que le coût du travail de déconstruction et la demande pour les produits réutilisés. Bien que les mécanismes juridiques puissent jouer un rôle important dans la promotion de la réutilisation des composants de bâtiment, les facteurs influençant la récupération sont :

- les délais acceptés d'attente pour le démontage ;
- le coût de la déconstruction en regard de la demande des produits récupérés selon le pouvoir d'achat du demandeur ;
- le contrôle et les sanctions pour le non-respect de la réglementation ;
- la qualité des produits récupérés ;
- l'image des matériaux récupérés dans l'esprit de la population souvent associé à la pauvreté ;
- enfin, l'organisation de la chaîne logistique de récupération.

Par ailleurs, une très intéressante étude concernant la réutilisation de logements temporaires a nécessité le développement d'une évaluation en approche multicritères et permis de mettre en évidence les conditions de l'extension d'usage (Arslan, 2008). Il résulte la nécessité de prévoir les catastrophes et l'organisation du recyclage des éléments.

D.4 Un cadre juridique, des objectifs et des outils

La France dans le cadre européen et au travers de la directive-cadre du 19 novembre 2008 vise des objectifs à l'échéance de 2020. Elle veut atteindre un minimum de 70% de réemploi, recyclage et valorisation matière des déchets de construction et de démolition en poids. Les mesures prévues dans le cadre du Grenelle Environnement doivent permettre d'atteindre l'objectif défini par la directive.

En ce qui concerne les produits du bâtiment, la norme NF P01-010 - Qualité environnementale des produits de construction - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction (NF P01-010), s'appuyant sur les normes ISO 14041 : 1998 - Analyse en cycle de vie (ISO 14041 :1998) et ISO 14025 : 2006 - Marquages et déclarations environnementaux - Déclarations environnementales de Type III - Principes et modes opératoires (ISO 14025 : 2006), précise les conditions de prise en compte de la fin de vie des produits du bâtiment dans les Fiches déclaratives Environnementales et Sanitaires (FDES). En l'absence de filière bien établie de récupération des déchets de fabrication, les produits sont considérés mis en décharge et enfouis. Dans le cas contraire, les éléments recyclés viennent en déduction des évaluations en analyse de cycle de vie.

La performance du recyclage peut-être prise en compte dans le cadre d'une comparaison de différentes solutions techniques. Une étude réalisée par R. Emmanuel au Sri Lanka, établit le résultat d'un indice composé, basé sur l'énergie matière, le coût global et la réutilisation potentielle (Emmanuel et al., 2004). Plusieurs solutions techniques de mur sont évaluées et comparées. L'étude évalue la proportion d'éléments récupérables pour chacune des solutions techniques. Les réutilisations possibles s'échelonnent de 29 à 100% même si celles-ci ne sont pas toujours réalisées pour une même fonction (Emmanuel, 2004). Dans cet article, un indice de qualité environnemental est élaboré en fonction de trois paramètres : l'énergie grise, les coûts en cycle de vie et la réutilisation. L'étude montre que le torchis est le matériau environnementalement le plus performant et le ciment le moins performant. Néanmoins, l'article conclue sur la difficulté d'exploiter des résultats contradictoires. En effet, le torchis performant environnementalement n'est pas réutilisable. L'article conclue donc sur la relativité de la performance en termes de développement soutenable et l'impossibilité de donner un résultat global de performance.

En résumé, le recyclage est un facteur direct d'influence de la performance du développement soutenable. Néanmoins, sur la base des observations et compte tenu de réelles difficultés techniques, le secteur du bâtiment semble encore peu investi dans cette pratique tout au moins en France.

I.1.4 Les outils d'évaluation de la performance

Cette section analyse la prise en compte de la durée de vie dans les différents outils disponibles.

A. La prise en compte de la durée de vie au travers des normes

A.1 La Norme ISO 15686

Au sein de la norme ISO 15686 - Bâtiments et biens immobiliers construits - Prévission de la durée de vie, détaillée dans le §I.1.2, page 20, la durée de vie d'un produit de construction est évaluée, à partir de toutes les informations disponibles, en multipliant la « durée de vie de référence » du produit par différents facteurs correctifs. L'objectif est de prendre en compte les effets de la qualité du processus de construction, de la conception, de la fabrication et de la maintenance ainsi que des sollicitations intérieures et extérieures.

A.2 La Norme NF P01-010 - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction

Avec pour objectif de faciliter les choix des concepteurs en termes environnemental et sanitaire, la norme met en place les bases communes pour la délivrance d'informations objectives, qualitatives et quantitatives. Afin de faciliter les comparaisons de produits, la norme NF P01-010 instaure la notion d'Unité Fonctionnelle (UF). L'unité fonctionnelle est la fonction remplie par une unité de produit durant une année. Pour évaluer l'UF, la valeur des émissions comptabilisées sur le cycle de vie complet est ensuite divisée par la « durée de vie typique³ ». La norme précise que la durée de vie typique ne doit pas être confondue avec la durée de vie réelle ou théorique du produit. Elle est représentative de la durée de vie du produit dans l'ouvrage étudié pour un usage et un entretien normal.

Cette estimation est annoncée et justifiée par le fabricant sur la base des références d'usage des produits. Cette donnée ne peut pas être une garantie de la durée de vie du produit, une fois mis en œuvre, dans la mesure où le fabricant n'est pas maître de la réalisation de l'ouvrage considéré. Les « durées de vie typiques » relevées dans les FDES varient de 50 à 200 ans. Ces durées sont reprises dans le tableau ci-après.

³ La durée de vie typique n'est pas liée à la durée réelle ou théorique d'un bâtiment mais elle est représentative de celle du produit dans l'ouvrage étudié – Définition de la norme NF P01-010

Produits	Bureau d'étude/ fabricant	Date	Durée de vie typique (années)
Bloc de béton creux	CERIB/Fédération de l'Industrie du Béton	Septembre 2006	100
Monomur Terre Cuite 30 rectifié	Briques de France	Aout 2006	150 ⁴
Béton cellulaire 25 cm	BIO IS/Syndicat nationale des fabricants de béton cellulaire	Novembre 2007	100
Banché C25/30 CEM II avec complexe de doublage thermo-acoustique Ultra ThA	ECOBILAN/Syndicat National des Bétons prêt à l'emploi	Septembre 2007	100
Mur massif en pierre de Noyant	CTMNC/LERM	Juillet 2010	200
Laine de verre	ECOBILAN/ISOVER	Février 2007	50
Mortier d'enduit minéral	ECOBILAN/SNMI	Janvier 2007	50
Charpente bois traditionnelle (05-027 : 2009)		Juin 2009	100
Panneau de lamelles de bois OSB (Oriented Strand Board) N° 05-020 : 2009		Mars 2009	100

Tableau 5 : Exemples de durées de vie typiques mentionnées au sein des FDES

⁴ Entre le début de nos travaux courant 2008 et février 2010, la DDVT est passée de 100 à 150 ans suite à de longues négociations

A.3 L'EUROCODE 0

Bien que son objet ne soit pas d'établir la durée de vie, L'EUROCODE 0 - Base de calcul de structure, mis en application le 1^{er} mars 2010, définit les durées de vie à prendre en compte pour le calcul de dimensionnement des structures en fonction de la nature du bâtiment. Ces durées de vie à prendre en compte sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Catégorie de durée d'utilisation de projet	Durée indicative d'utilisation de projet (années)	Exemples
1	10	Structures provisoires
2	10 à 25	Eléments structuraux remplaçables
3	15 à 30	Structures agricoles
4	50	Structures de bâtiments et autres structures courantes
5	100	Structures monumentales et ouvrages de génie civil

Tableau 6 : Durées de vie pour le calcul du dimensionnement des ouvrages

La durée de vie « normale » au sens statistique pour le calcul du dimensionnement de la structure d'un bâtiment courant est donc de 50 ans.

B. La prise en compte de la durée de vie dans les outils d'évaluation d'impact

Les outils d'évaluation nécessitent des données. Afin d'obtenir des résultats avec un niveau correct de fiabilité, il est important de pouvoir évaluer la qualité des données. Dans une optique de capitalisation des données de durées de vie, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) tente de développer une base de données du nom de « EVAPerf » au format de la norme ISO 15686. L'objet est le développement d'une plateforme collaborative renseignant sur les pathologies et la durée de vie des produits exploités. La mise en place de cette base de données, peu renseignée à ce jour, sera probablement longue.

Une étude des différents référentiels (Annexe 1) et des outils d'évaluation d'impacts (Annexe 2) en termes de développement soutenable, a été développée. La méthode a consisté dans un premier temps à sélectionner les référentiels et les outils qui semblaient les plus fréquemment cités dans les articles ainsi que ceux les plus utilisés dans les laboratoires de recherche français. L'étude, présentée sous forme de tableau, comprend :

- une description succincte qui permet de mieux comprendre les contenus et les objectifs ;
- Les qualités et les défauts de chaque outil ;
- l'observation de la prise en compte de la durée de vie dans l'évaluation.

L'étude montre que la plupart des outils omettent la prise en compte de la durée de vie des projets ou bâtiments existants. Les rares, à évoquer ce paramètre, le limitent en général, à quelques dizaines d'années. Lorsqu'il en est tenu compte, les durées de vie du bâtiment sont fixées. Concernant la durée prise en compte, CASBEE et EQUER sont les outils le plus ambitieux avec une durée de 90 ans. EQUER permet sur cette durée maximum de faire varier

les durées des composants du bâtiment. A défaut d'être modifiées par l'utilisateur, elles sont fixées par le logiciel sur la base de durées « à dire d'expert ».

En résumé, les durées de vie mentionnées dans les normes restent un sujet de questionnement quant aux raisons qui justifient les valeurs retenues. Ces valeurs sont d'autant plus importantes que présentées comme des durées normalisées, elles pourraient rapidement devenir des objectifs pour les professionnels. Les outils d'évaluation ne permettent pas en l'état la véritable prise en compte du paramètre « durée de vie ».

I.1.5. L'analyse

L'exemple de la fenêtre

La durée de vie des bâtiments est bien évidemment liée à la qualité des produits utilisés, des matériaux constituant ces produits, de leur mise en œuvre et de leur entretien. En reprenant l'exemple de la fenêtre, les outils développés semblent scientifiquement indiscutables. La valeur calculée est un intervalle de 23 à 27 ans. Pourtant avec l'objectif d'une même fonction principale, soit celle de protéger les occupants des agressions climatiques et d'apporter la lumière, les fenêtres des vieux immeubles des centres de villes ont parfois plus de deux siècles. Le chercheur et l'industriel rétorqueront que le produit récent est autrement plus sophistiqué car il répond à davantage de fonctions. Il se peut aussi qu'il soit économiquement moins cher et que de nombreuses fenêtres de moindre qualité aient eu une durée de vie plus courte. Nous n'avons pas d'information statistique à ce sujet. Quoiqu'il en soit, un premier constat montre que ce n'est pas forcément la durée de vie technique qui engendre la durée de vie, mais d'autres critères de nature fonctionnelle. Un grand nombre de fenêtres s'est vu mis au rebut pour cause d'éloignement de la réponse à de nouvelles fonctions d'isolation thermique ou phonique par exemple. Il s'agit de causes d'obsolescence. **Il est aussi possible que dans certains cas, la cause de la fin du produit soit purement psychologique liée à la valeur « associée » au produit.** Dupuy J-M et Gérin F. décrivent le phénomène dans leur ouvrage « De la société du toujours plus à l'obsolescence psychologique des biens » (Dupuy, 1975). L'ambitieux programme EVAPerf⁵ aura de grande difficulté à intégrer ces facteurs pour mesurer la durée de vie des produits. Une autre question pourrait porter sur l'intérêt et la volonté qu'aurait le consommateur sur la possibilité de réparer les défaillances qui ont conduit à la mise au rebut. Quel serait le surcoût économique de fabrication d'une « réparabilité » imaginée lors de la conception ? Quel serait aussi le coût réel, environnemental et social de cette possibilité et de sa réalisation ? Quels seraient les impacts sur les filières industrielles et commerciales ?

Le recyclage et la valorisation

Le recyclage ou la valorisation des produits constituant le bâtiment sont des facteurs permettant d'une certaine manière le prolongement de la durée de vie même si la fonction en est modifiée.

L'EUROCODE 0

Concernant la durée de vie technique d'un bâtiment, il est observé que celle-ci est liée à la durée de vie des fondations et des murs porteurs. Appliqués à ces éléments structurels, quels résultats fourniraient les outils d'évaluations présentés dans le § I.1.2 page 20 ? Les bâtiments anciens sont nombreux. EN 2006, l'INSEE comptabilisait 12 millions de logement

⁵ EVAperf est un outil collaboratif de la connaissance pour le suivi des performances en œuvre des produits du bâtiment

ayant plus de 50 ans et 5,33 millions de logements de plus d'un siècle. Ces chiffres importants ne peuvent pas être le résultat d'un hasard. Quelle durée de vie ces nouveaux outils d'évaluation auraient-ils calculé pour ces structures ? Dans le cas d'un chiffre conséquent, comment l'EUROCODE 0 peut-il avoir déterminé une valeur de 50 ans pour le calcul des futures structures? Cette valeur reflète-t-elle la durée de vie admise et d'usage dans d'autres pays ? Est-elle le résultat d'une volonté collective de la société civile ? Cette valeur résulte-t-elle soit d'une optimisation des coûts économiques, environnementaux et sociaux soit d'une approche en termes de développement soutenable ? Cette norme, n'amènera-t-elle pas nos fabricants de produits et nos constructeurs à adapter leurs productions à cette durée ? Dans ce cas, celle-ci s'approchant de la durée des crédits, satisfera-t-elle les usagers ? Elle n'est probablement pas le résultat d'une analyse des besoins et de la volonté du maître d'ouvrage ou de l'utilisateur. Il est pourtant probable que cette durée « normalisée » devienne un objectif pour les professionnels.

Cette contradiction entre les probables besoins des utilisateurs de se loger, incontestablement inscrits dans de longues durées de temps, et la norme, qui fixe une durée de vie courte pour les bâtiments, est étonnante. Elle l'est particulièrement lorsqu'il est comparé à la problématique de la durée de vie dans le domaine du vivant. A. Zaoui écrivait « *Pourtant, entièrement maîtres de l'élaboration et de la conception, libres de surcroît de toute préoccupation bioéthique ou de tout soupçon d'eugénisme, le chercheur et l'ingénieur en matériaux ont, au contraire du biologiste ou du médecin, toute latitude pour modifier d'emblée les conditions et les rythmes du vieillissement et en utiliser les mécanismes pour améliorer leurs "espèces"* ». (Zaoui A, 2002). Nous devrions donc pouvoir agir sur la durée de vie des bâtiments.

Le rapport à l'entretien

Un facteur déterminant est l'entretien effectué. Il permet la conservation des caractéristiques fonctionnelles des produits et de l'ensemble du bâtiment. L'impact n'a pas encore été étudié en profondeur car les produits et les facteurs d'influences sont multiples. En effet, les préconisations d'entretien sont liées aux qualités originelles des produits et de leurs mises en œuvre. Elles sont par ailleurs liées aux conditions environnementales et enfin aux conditions d'utilisation du bâtiment. Les facteurs et les calculs d'optimisation de l'entretien en rapport de l'extension de la durée de la fonction remplie sont donc délicats à établir. De plus, la durée de vie du bâtiment n'est pas seulement la durée de vie des produits qui le compose. Sur le même principe que l'exemple de la fenêtre, l'analyse de la durée de vie du bâtiment montre que les facteurs d'impact peuvent être liés aux fonctions d'usage de l'ensemble.

L'adaptabilité

Par ailleurs, plus un bâtiment est souple dans son fonctionnement, plus il est apte à s'adapter à l'évolution des besoins. Ici, c'est la qualité de travail du concepteur qui permettra l'adaptation à l'évolution des besoins dans le temps et réduira le risque de démolition. Il s'agit d'un « recyclage » fonctionnel du bâtiment. Cependant il semble que peu d'outils méthodologiques de conception ou d'évaluation aient été développés pour ce critère.

L'optimisation

Qu'il s'agisse de durée de vie technique ou fonctionnelle, dans une optique d'optimisation, les décisions concernant la conception devraient faire appel à des outils telle que l'analyse de la valeur. Quels choix techniques permettront de fournir le service attendu sur une durée désirée au moindre coût global voire au moindre coût global étendu ? Ce qui implique la nécessaire connaissance du besoin attendu et une prévision de son évolution ou

encore de la gestion des phénomènes aléatoires. Lorsque les produits de construction ont une durée de vie supérieure à la fonction qu'ils sont censés remplir, l'analyse de la valeur, démontre le défaut d'optimisation. En effet, les moyens matériels, humains et économiques consommés sont supérieurs à ce qu'ils auraient pu être. A l'opposé, des moyens insuffisants ne vont pas dans le sens d'une optimisation. En effet, la reconstruction nécessaire, pour répondre à la fonction d'usage sur le reste du « temps à courir » ne peut rentrer dans le cadre d'une optimisation.

Le besoin

Outre ces aspects d'analyse, la question du besoin devrait être remise au centre de la problématique de la durée de vie. L'objectif des « bâtisseurs » du passé se plaçait dans une démarche patrimoniale de transmission aux générations suivantes. L'idée était ici de faciliter la vie des générations futures, leur permettant de consacrer leurs propres moyens à d'autres besoins. Les objectifs de maîtres d'ouvrages, gestionnaires d'entreprises de production de biens ou de services, sont de faire coïncider la durée de vie d'usage à la durée d'amortissement fiscal ou au mieux à celle du projet d'exploitation. Enfin, l'objectif pourrait être celui d'une optimisation de la durée de vie sur la base d'une approche de développement soutenable. Cet objectif prendrait en compte des facteurs transversaux sociaux, environnementaux et économiques. Par exemple, il est démontré que la démolition d'un immeuble a un coup social pour les occupants qui perdent les repères de leur vie passée (Rojas Arias R.C, 2007). Ce coût, certes difficile à évaluer, n'est pas intégré dans les études actuelles.

Conclusion

La durée de vie technique des produits et des bâtiments fait l'objet d'études qui permettent le développement de nombreux outils d'évaluation. La question de la durée de vie fonctionnelle des bâtiments est bien moins approfondie.

Concernant les causes « sociales » de fin de vie, une part de la responsabilité repose sur les concepteurs. En effet, ceux-ci sont responsables de l'adaptabilité des bâtiments à l'évolution des besoins ainsi que de leur « maintenabilité ». L'analyse approfondie des caractéristiques d'adaptabilité à l'évolution des besoins paraît nécessaire à la condition d'une pérennité. Le développement d'analyse des causes de vieillissement fonctionnel, associé au comportement humain, serait sans doute aussi plein d'enseignement. Les concepteurs ont, par ailleurs, la responsabilité de l'optimisation des coûts au sens large dans les choix techniques. Ils manquent néanmoins d'outils permettant les prises de décisions dans le cadre de cette optimisation.

Les propriétaires et les utilisateurs ont, eux aussi, leur part de responsabilité. Au travers de l'usage qu'ils font des bâtiments, de l'entretien qu'ils réalisent, de la perception de leurs valeurs et enfin de la mode à laquelle ils peuvent être sensibles, ils agissent sur la durée de vie.

Les exemples de bâtiment ayant plusieurs siècles sont nombreux et ils ne peuvent être le résultat du hasard. Il reste cependant à envisager qu'ils aient été en partie ou en totalité reconstruits. L'étude des archives des bâtiments des Voies Navigables de France (VNF), nous a permis d'évaluer la quasi totale conservation d'un parc immobilier conséquent datant du 18^{ème} siècle, au prix d'une surveillance vigilante et d'un entretien minimal. Ces archives permettent la constitution de carnet d'entretien. Sans en connaître la fin de vie, nous pourrions évaluer les performances en termes de développement soutenable de ces bâtiments.

En résumé, la durée de vie réelle d'un bâtiment est en général, la plus courte des durées de vie technique ou fonctionnelle du bâtiment. Elle est liée à la qualité des produits pour la durée de vie technique. La durée de vie fonctionnelle dépend de la conception et du comportement des propriétaires et des usagers. L'entretien est le paramètre commun susceptible de modifier les deux durées de vie. Enfin, d'autres facteurs exogènes sont susceptibles d'entraîner la démolition.

La durée de vie est donc une variable sur laquelle nous pouvons agir !

I.2. Le bâtiment et le développement soutenable

Ce sous-chapitre précise la notion de développement soutenable pour le bâtiment. La première section en énonce les généralités. La seconde section précise le rapport du bâtiment aux piliers du développement soutenable. La troisième section précise les indicateurs et les données associées qui permettent de mesurer les performances. La section suivante présente les différents outils d'évaluation ou guides qui aident l'amélioration des performances. Pour finir, la cinquième section présente et analyse la littérature scientifique.

I.2.1. Généralités

L'importance et l'impact des effets négatifs de la croissance des activités industrielles au niveau mondial ont conduit à développer le concept de « développement soutenable » qui tend progressivement à s'imposer comme perspective à long terme. Cependant les définitions données du développement soutenable sont nombreuses. Bien que non opposées et souvent complémentaires, ces définitions ont un caractère vague, notamment lorsque l'analyse porte sur les conséquences qu'elles impliquent, tant au niveau individuel que collectif.

A. Définitions

Une définition relativement précise permet d'aborder la question du développement soutenable dans son contenu. Il s'agit de la définition fournie suite aux travaux de la Commission Mondiale pour l'Environnement et le Développement :

« *Le développement durable vise à satisfaire les besoins de développement des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs* » (WCED, 1987). Cette définition paraît faire une relative unanimité auprès de la plupart des acteurs s'interrogeant sur la question.

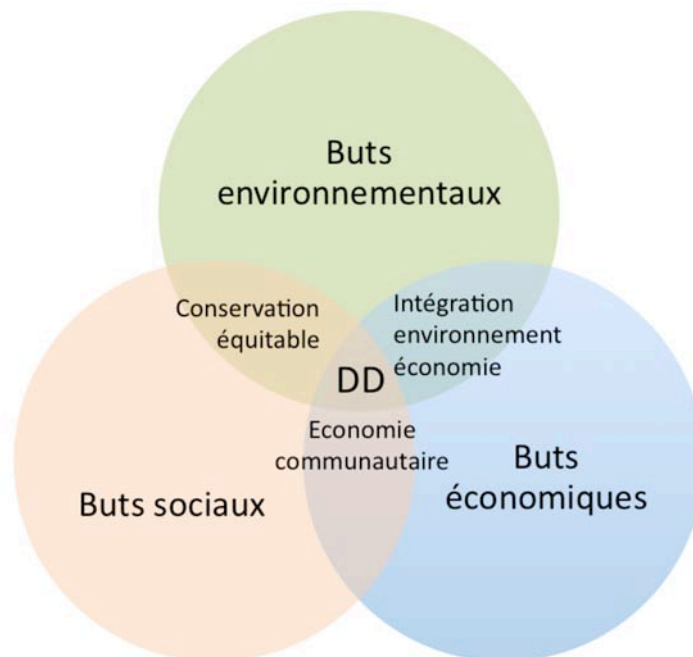


Figure 2 : Modèle de Jacobs et Sadler (Boothroyd, 1990)

Au sommet de Copenhague en 1995, il a été admis que le développement soutenable soit alors caractérisé par trois dimensions qui lui donnent un contour et un contenu plus précis. Il s'agit des dimensions sociale, économique et environnementale. Cette caractérisation est illustrée par le modèle ci-dessus de Jacobs et Sadler (Boothroyd, 1990).

L'originalité du développement durable réside dans la liaison systémique ou structurelle entre l'économie, l'environnement et le social. Il s'entend comme un développement qui répond aux besoins essentiels de l'humanité appartenant à une génération mais sans compromettre les besoins des autres générations.

L'approche économique traduit la recherche par le développement soutenable d'un objectif de croissance et d'efficacité économique. Cette approche doit répondre à la nécessité de développer les sociétés et leurs économies, notamment dans le cas des pays en voie de développement qui veulent aussi avoir accès à un niveau de vie satisfaisant ;

L'approche sociale exprime le fait que le développement soutenable doit partir des besoins humains et donc répondre à un objectif d'équité sociale. L'humain replacé au cœur de l'action permet de répondre à cette nécessité. En rappelant les liens intra-générationnels et intergénérationnels, le rapport Brundtland a positionné l'homme au centre des objectifs ; Les éléments de l'approche concerne aussi bien les aspects sanitaires, d'hygiène et culturels. Considérant l'aspect intergénérationnel, le rapport a aussi fixé l'objectif dans le rapport au temps.

L'approche environnementale signifie que l'action doit contribuer à préserver, améliorer et valoriser l'environnement nécessaire à la vie. L'action doit préserver les ressources pour le long terme et en permettre la régénération plutôt que l'épuisement. L'objectif comprend aussi la réduction des conséquences climatiques engendrées par les actions anthropiques.

Les composantes du concept sont donc :

- une articulation entre environnement, social et économie ;
- une approche transversale et systémique ;
- une harmonisation entre court terme et long terme, fondée sur le principe de précaution ;
- une forme de « penser global et d'agir local » ;
- une solidarité entre pays riches et pays pauvres, associée à une solidarité inter-générationnelle ;
- une nouvelle forme de gouvernance visant un renforcement de la démocratie.

La question de la place de la culture se pose au travers de la définition. Peut-on en ignorer l'approche pour les questions du bâti. Dans son avis N°2002-07 d'avril 2002, la Commission Française du développement durable s'interrogeait sur l'absence de référence à la culture dans les travaux relatifs au développement soutenable. Dans cet avis, la commission replace l'homme au centre du dispositif et rappelle la spécificité de l'espèce dans son rapport à la culture. Elle insiste « *sur la nécessité de compléter l'approche du développement durable en intégrant la dimension culturelle au même titre que les dimensions économique, sociale et environnementale.* ». Les actions réalisées dans le cadre d'une approche de développement soutenable doivent nécessairement intégrer les spécificités culturelles de chaque groupe

humain. Les diversités culturelles, tout comme le patrimoine naturel doivent être protégées et enrichies afin d'être transmis aux générations futures.

B. Un principe : l'analyse en cycle de vie

Selon les normes Série ISO 14040:2006: Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre, l'analyse en cycle de vie ou «écobilan» évalue l'impact environnemental d'un produit ou d'un système⁶ en considérant toutes les étapes de son cycle de vie.

L'objectif de ce principe permet d'une part d'identifier les points sur lesquels un système peut être amélioré et d'autre part d'obtenir un bilan complet indispensable dans le cadre d'une comparaison de performances de différentes solutions. Selon le schéma ci-joint extrait de la norme ISO 14040, la méthode comprend quatre phases principales selon le schéma suivant :

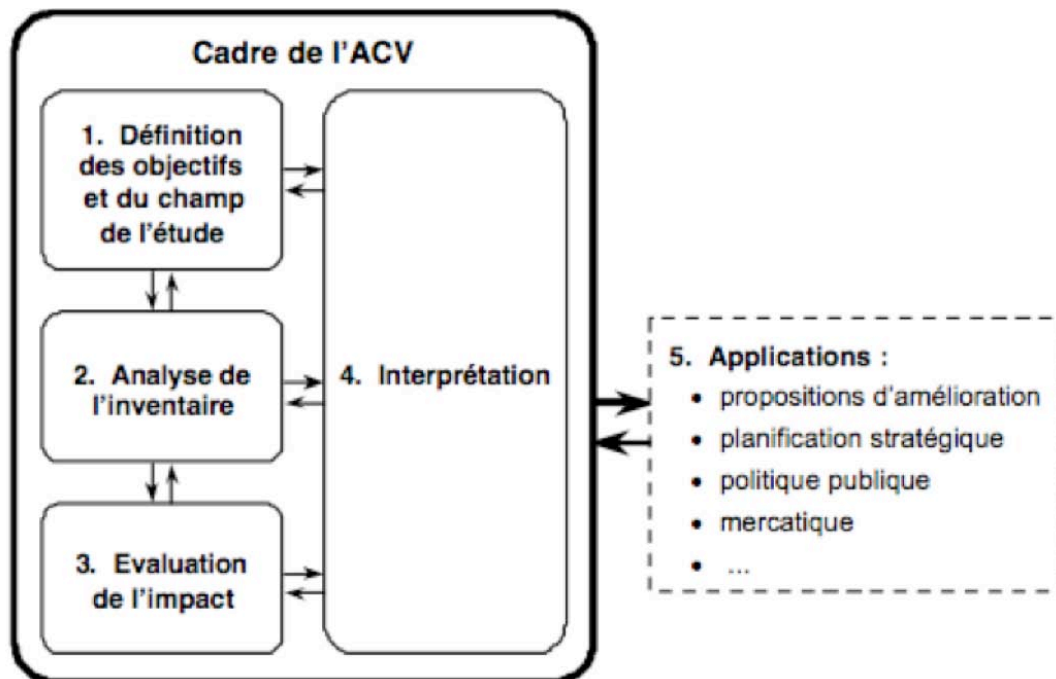


Figure 3 : Etapes d'une ACV – ISO 14040 - 2006

⁶ Ludwig Von Bertalanffy est l'un des premiers à avoir donné une définition et développé le concept de système. Il s'agit d'un ensemble d'éléments ayant des interrelations entre eux et avec l'environnement, organisé dans le but d'atteindre un objectif

Il s'agit de :

- définir les objectifs et délimiter le système ;
- réaliser l'inventaire des émissions. C'est la description quantitative des différents flux qui traversent les limites du système. L'inventaire doit prendre en compte les éléments recyclés ou réutilisés venant en déduction de la valeur globale ;
- réaliser l'interprétation ;
- analyser les impacts : ils peuvent relever de la toxicité pour l'homme, de bruit, de la création d'oxydant, de l'appauvrissement de la couche d'ozone, du réchauffement climatique, de l'acidification, d'eutrophisation, d'écotoxicité, de l'utilisation des terres et des pertes d'habitat, des espèces et organismes dispersés, de l'usage des ressources naturelles, de l'érosion des sols, de la salinisation des sols, ... (Curran, 2006)

En résumé, les produits ou les systèmes doivent être évalués en cycle de vie complet c'est-à-dire en tenant compte des phases de conception, de production, d'utilisation et de démolition. Seule l'analyse en cycle de vie des produits permet de comparer différentes solutions dans le cadre d'une évaluation d'impact environnemental, économique et social.

C. L'éco-conception et les éco-matériaux du bâtiment

Une architecture compatible avec le développement soutenable résulte donc d'un équilibre subtil entre des exigences liées à la société, à l'économie et à l'environnement.

Le bâtiment comprend différentes fonctions répondant à de nombreux besoins. La réponse fonctionnelle peut s'établir au travers de nombreuses solutions. Ces réponses s'établissent avec un niveau de qualité environnementale, sociale et économique. L'étude de la qualité environnementale est l'approche la plus approfondie. La qualité environnementale des bâtiments comprend la qualité des ambiances intérieures et la réduction des impacts sur l'environnement. L'éco-conception comprend le choix des matériaux et le système constitué par leur assemblage, en ce qui concerne l'impact qu'ils induisent sur l'environnement intérieur et extérieur. Cette analyse permet d'évaluer le degré de performance des choix des matériaux en tant qu'éco matériaux (Peuportier, 2008).

C.1 Les définitions

Les éco-matériaux sont les matériaux classés selon leur impact environnemental et sanitaire et selon leurs performances de confort et en fonction du coût global le plus faible. Il s'agit donc de matériaux classés par niveau de performance.

L'éco-conception d'un bâtiment comprend d'une part la prise en compte de l'impact environnemental et d'ambiance au travers de la morphologie générale et de l'organisation des espaces intérieurs pour un coût global le plus faible (Peuportier, 2008).

C.2 Les critères des éco-matériaux

Aux critères d'impacts évoqués au sein de la norme NF P01-010, le choix d'éco-matériaux implique que soient introduites les performances dans les termes suivants :

Caractéristiques	Unité	Définition (Sacadura, 1993),
Densité	-	Rapport entre la masse d'un matériau et la masse du même volume d'eau à la température de 3,98°C.
Conductivité thermique	W/m.K	Flux de chaleur en watt qui traverse une épaisseur de 1m de matériaux sur une surface de 1 m ² avec une température de 1°C ou K entre les deux faces
Capacité thermique	Wh/m ³ *K	Capacité du matériau a emmagasiné de la chaleur. Elle mesure la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C, 1m ³ de matériau.
Déphasage	h	Vitesse de l'onde de chaleur pour passer au travers d'un matériau
Effusivité thermique	J*K.m ⁻² .s ^{-1/2}	Coefficient qui caractérise la rapidité avec laquelle la température d'un matériau se réchauffe
Diffusivité thermique	m ² /s	Grandeur physique qui caractérise la capacité d'un matériau dans la pénétration et l'atténuation d'une onde thermique dans un milieu
Porosité	-	Rapport des volumes des vides sur le volume du matériaux
Propriétés hygroscopiques	%	Capacité à contenir de l'eau et à l'échanger avec l'environnement
Affaiblissement acoustique	dB	Capacité à absorber les ondes sonores

Tableau 7 : Propriétés des éco-matériaux

C.3. Les critères de l'éco-conception

Aux critères d'impact évoqués dans le paragraphe précédent, une éco-conception agrègera d'autres points d'analyse tels que :

- l'occupation des sols ;
- les masques environnants ;
- les vents ;
- les rayons solaires provoquant les surchauffes l'été et l'éblouissement ;
- l'éclairage qui modifiera l'éclairage et la consommation d'énergie, les sensations de confort ou d'inconfort ;
- la luminance d'une source lumineuse est le rapport de l'intensité de cette source sur une surface dans une direction sur la surface projetée de la source ;
- les couleurs et les états de surface ;
- l'acoustique ;
- l'air, son renouvellement, sa vitesse et son humidité relative ;
- les capteurs d'énergie ;
- les déperditions et les radiations

(Bernstein et al., 2006), (Liébard et al., 2006), (Déoux et al., 2004)

La réponse au programme du maître de l'ouvrage, doit correspondre à un consensus dans la prise en compte des différentes contraintes afin que l'impact sur l'environnement soit le plus faible possible et l'ambiance intérieure la plus appréciable. Cette réponse optimale doit résulter d'un équilibre comprenant un coût global minimal.

Enfin, comme le préconise la cible 2 de la version 2008 de la démarche HQE[®], Bruno Peuportier évoque la « durabilité » au sens de durée de vie dans sa grille générale d'analyse de bâtiments (Peuportier, 2008). Il présente des réhabilitations d'habitats anciens obtenant des performances très satisfaisantes sur le plan énergétique mais n'évalue pas les gains concernant les autres critères du développement soutenable ni ceux obtenus par l'extension de la durée de vie. La durée de vie des produits, des éléments construits à l'aide de ces produits et de la construction elle-même a un impact sur l'environnement et ses indices. Aucun des autres ouvrages consultés ne fait intervenir la question de la durée de vie des produits ou des bâtiments sur les performances.

I.2.2. Le bâtiment et les piliers du développement soutenable

Les éléments impliquant une étude dans le cadre de l'analyse du bâtiment confronté à une approche du développement soutenable sont énoncés dans le travail réalisé par le groupe d'étude LIFETIME 2001-2005 formé à la demande de la communauté européenne (Sarja et al., 2004). En résumé, dans le cadre d'une démarche de développement soutenable, les points à étudier sont les suivants :

- l'environnement au travers d'une analyse de l'ensemble des impacts ;
- l'économie avec les notions d'investissement initial, de coût à l'usage, des coûts de fin de vie et de coût global ;
- le social avec la question des fonctions d'usage, de la santé, de la sécurité et du confort ;
- la culture avec les notions de tradition, de style de vie, des savoir-faire technique et architectural.

Ces approches sont à réaliser dans le cadre d'un cycle de vie complet.

Le groupe LIFETIME reprend donc le principe des trois piliers constitutifs du développement soutenable et introduit la question de la culture sur laquelle nous reviendrons.

A. Le bâtiment et l'environnement

Le contexte environnemental comprend de nombreux facteurs. La mise en évidence des risques de changement climatique et d'épuisement des ressources naturelles, très médiatisés, n'est pas récente. Le risque de réchauffement climatique associé à l'effet de serre avait été identifié par Arrhénius en 1896 (Dufresne et al., 2006). La crainte de l'épuisement des ressources de charbon avait été évoquée par Jevons en 1866 (Jevons et al., 1866). Néanmoins, les consommations et leurs impacts, résultant d'une démographie galopante, ont imposé une prise de conscience. C'est donc lors du Sommet de la Terre de Rio de Janeiro, au Brésil (United Nations, 1992) que la communauté internationale a véritablement pris

conscience de l'enjeu planétaire en termes de réchauffement, de changements climatiques, d'épuisement des ressources, et d'atteinte de la flore et de la faune.

Bien qu'entaché de nombreuses incertitudes (Lorius, 2003) (Le Treut et al., 2008) et parfois même de contestations (Enghoff, 2008), un certain nombre d'effets climatiques sont admis par l'ensemble de la communauté scientifique. En 1999, Michel Petit listait comme phénomènes certains, l'évolution des températures, la concentration atmosphérique en gaz carbonique, l'influence de la vapeur d'eau et l'élévation du niveau de la mer (Petit, 1999).

Au niveau international, l'ONU a créé en 1988 le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) dont la mission est d'étudier la question du changement climatique. Alors que dans son premier rapport qui date de 1988, le GIEC hésitait encore quant à la responsabilité de l'homme sur le réchauffement climatique, le quatrième rapport publié en 2007 ne laisse aucun doute quant à cette responsabilité.

Au niveau national, le secteur du bâtiment est le plus gros consommateur d'énergie parmi tous les secteurs économiques, avec 65,35 millions de tonnes d'équivalent pétrole en 2009, soit 43,88 % de l'énergie finale totale (Source : statistiques énergétiques France, mars 2005 – Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement-Ensemble des régions métropolitaines).

Cette énergie consommée annuellement entraîne l'émission de 120 millions de tonnes de CO₂ (Source : inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France (février 2010) – CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique), représentant entre 23 % et 25% des émissions nationales (Source ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie). Il est encore le responsable de 466 millions de tonnes de minéraux extrait pour la construction ce qui représente près de 75% de la consommation en masse (« stats.environnement.developpement-soutenable.gouv.fr »). Concernant les déchets, le secteur du bâtiment représentait 343 millions de tonnes en 2004 (Source ADEME- les déchets en chiffres) soit le plus gros générateur devant les ordures ménagères avec 26 millions.

Le secteur de la construction des bâtiments est donc à l'origine de différents impacts importants sur l'environnement. Au travers de la littérature scientifique, un consensus concernant les causes d'impacts environnementaux est apparu. Les grands axes du domaine environnemental à évaluer sont énoncés au sein de La norme ISO 14044 : 2006 Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices-. Les polluants à évaluer concernent l'acidification, l'eutrophisation, pollution photochimique, les gaz à effet de serre, la contamination par les métaux lourds, la contamination par les polluants organiques persistants et encore les particules en suspension.

Le CITEPA (Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique) est chargé, en France, de la réalisation de l'inventaire des émissions.

Il résulte que les seuls secteurs résidentiel et tertiaire sont à l'origine d'émission dans l'air en 2008 dans les proportions suivantes (Source : CITEPA/CORALIE/ FORMAT SECTEN- Mise à Jour avril 2010) :

Substances provoquant l'acidification, l'eutrophisation, pollution photochimique				
9% du SO ₂	8% du NO _x	31% de COVNM	32% du CO ;	
Substances relatives à l'accroissement de l'effet de serre				
23 % du dioxyde de carbone (CO ₂)	3% de méthane (CH ₄)	2% du Protoxyde d'azote (N ₂ O)	52% des HydroFluoroCarbures (HFC)	1% de SF ₆ (Hexafluorure de Soufre);
Substances relatives à la contamination par les métaux lourds				
15% De l'arsenic (As)	6% de Cadmium (Cd)	25% du Chrome (Cr)	3% du cuivre (Cu)	5% de Mercure (Hg)
7% de Nickel (Ni)	15% du plomb (Pb)	9% de Sélénium (Se)	25% de Zinc (Zn)	
Substances relatives à la contamination par les polluants organiques persistants				
17% de dioxines et furanes (PCDD-F)	68% des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)	20% de Polychlorobiphényles (PCB)	6% hexachloroéthane (HCB)	
Particules en suspension				
10% des TSP.	60% de PM _{1,0}	34% de PM _{2,5}	22% de PM ₁₀	

Tableau 8 : Emissions des secteurs résidentiel et tertiaire en 2008

Il faut noter que pour un grand nombre d'émissions, les pourcentages importants s'appliquent souvent à des quantités en nette régression depuis les années 1990. Par exemple, les émissions de SO₂ ont diminué de 74%, les HAP de 63% ou encore les PCB de 28% pour l'ensemble des secteurs. Cependant, une grande partie des émissions sont générées par le secteur résidentiel. L'amélioration des technologies utilisant davantage la biomasse explique la réduction globale des émissions du secteur. Ces diminutions d'émissions sont d'autant plus importantes qu'elles s'appliquent à une production annuelle en augmentation de près de 45% du nombre de logements entre 1990 et 2007. Les logements ont une surface en augmentation de près de 6% sur la période (source INSEE). Ces variations « structurelles » du secteur, associées à l'augmentation de 7,3% de la population, expliquent en grande partie l'augmentation de 22 % des gaz à effet de serre évalués entre 1990 et 2004⁷.

A l'échelle du bâtiment lui-même et concernant les impacts décrits précédemment, les phases de cycle de vie n'ont pas toutes les mêmes importances dans l'évaluation de l'impact. Par exemple, les travaux de chercheurs tels que Liu et Pulselli, ont montré que tout au moins pour certains secteurs du bâtiment, en termes de consommation d'énergie et de conséquences environnementales, la phase d'utilisation du bâtiment était bien plus importante que celles de la construction, de l'entretien et de la démolition. Néanmoins, de grosses différences apparaissent d'un article à l'autre. M. Liu démontre que 70 à 80 % de l'énergie consommée et des impacts environnementaux sont attachés à la phase d'utilisation sur 50 ans (Liu et al, 2010) alors que Pulselli évalue à 49%, la phase de fabrication, 35% celle de maintenance et 15% l'utilisation (Pulselli et al., 2007). Les proportions d'impacts sur lesquelles ces affirmations sont établies voient probablement une part de leurs divergences des lieux d'études très différents, la ville de Chongqing en Chine pour le premier, l'Italie pour le second.

⁷ Chacune de ces émissions peut constituer une externalité. La question des externalités sera traitée dans le § B2 de ce sous-chapitre page 49.

Cette observation implique qu'il est nécessaire de distinguer les impacts des différentes phases, pour les comparaisons de solutions techniques considérant la question de la durée de vie.

A l'échelle des produits de construction, la Norme NF P01-010 (NF P01-010- 2004 Qualité environnementale des produits de construction - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction), établie à partir de la série de normes ISO 14040 (ISO 14040 – Management environnemental - Analyse en cycle de vie) s'appuyant sur le principe de l'analyse en cycle de vie, et reprenant la totalité de l'inventaire établi par la norme ISO 14025 (ISO 14025 - Marquages et déclarations environnementaux -- Déclarations environnementales de Type III) a permis l'établissement des fiches déclaratives environnementales et sanitaires (FDES). Cette norme vise la présentation de différents impacts des produits utilisés dans le bâtiment. Les différents impacts sont regroupés sous les intitulés d'indicateurs suivants dont les définitions sont fournies en Annexe 3 :

Energie primaire totale (MJ)	Energie renouvelable (MJ)	Energie non renouvel (MJ)
Energie primaire procédé (MJ)	GES (kg éq CO2)	Déchets valorisés (kg)
Déchets dangereux (kg)	Déchets non dangereux (kg)	Déchets inertes (kg)
Déchets radioactifs (kg)	Pollution de l'air m ³	Pollution de l'eau m ³
Acidification (kg éq SO2)	Epuisement des ressources (sb)	Eau (L)
Formation d'ozone photochimique (kg éq éthylène)		
Destruction de la couche d'ozone stratosphérique (kg éq		

Tableau 9 : Liste des groupes d'impacts environnementaux dans le bâtiment

Les travaux concernant l'impact environnemental des activités anthropiques traitent essentiellement de la question du changement climatique. Concernant l'épuisement des ressources naturelles, nous reprenons la méthode Life Cycle Impact Assessment (LCIA) qui développe un indicateur pour l'épuisement des ressources (Habert et al., 2009). Pour la mesure, le principe appliqué est celui de la pression sur les stocks en rapport de l'antimoine. Néanmoins, G Habert met en avant l'importance de l'échelle locale pour la prise en compte de l'épuisement des ressources naturelles. Sur la base d'une étude de la région parisienne, il montre comment l'accessibilité aux ressources peut être calculée et tente de mesurer l'erreur de prévision liée aux situations complexes sociales, économiques ou technologiques (Habert, 2010).

En résumé, les indicateurs du

Tableau 9 semblent faire un consensus pour l'évaluation et la mesure des impacts environnementaux d'origines anthropiques.

B. Le bâtiment et l'économie

B.1. Le contexte économique général

Le contexte économique dans une approche de développement soutenable du bâtiment est envisageable à différentes échelles. Le contexte peut se situer au niveau macroéconomique ou microéconomique.

Les économistes « s'affrontent » depuis longtemps sur l'impact de la consommation des ressources naturelles. Historiquement, deux groupes se distinguent. Le premier, comprenant les partisans de la durabilité faible (durabilité ici au sens de développement soutenable), s'appuie sur une constance des capitaux (Solow, 1993). Ils associent à la baisse des capitaux des « ressources naturelles », l'augmentation des capitaux de connaissances, de techniques et de technologies. Ils présentent par ce transfert un enrichissement global résultant, basé sur la constance des moyens globaux de capitaux. La démarche se fonde sur la règle de substituabilité des capitaux (Hotelling, 1931). Le niveau des capitaux naturels peut être différemment affecté par la consommation en fonction des paramètres suivants :

- le niveau de recyclabilité ;
- l'évolution des techniques, des technologies et des courbes d'expériences permettant de réduire la quantité de matière première et d'énergie consommés pour la fabrication, la mise en œuvre et l'entretien ;
- l'allongement de la durée de vie.

A l'opposé, les partisans d'une durabilité forte rejettent la possibilité de transfert de capitaux pour n'envisager que la disponibilité des matières naturelles en termes de stock et d'existence de seuil critique. (Rotillon, 2007), (Harribet, 2000). Ces derniers mettent en garde face aux probables disparitions de nombreuses ressources.

Si la durabilité faible préconise une « non-décroissance » du bien-être, de la consommation ou de l'utilité dans le temps, via une « non décroissance » du stock de capital, la durabilité forte part du principe que le capital naturel détermine le bien-être de l'homme et devient un facteur limitant de la croissance. Elle nécessite donc une non-décroissance dans le temps du stock de capital naturel et met en avant le caractère écologique de la durabilité.

Les indicateurs de la première catégorie se résument dans les mesures du PIB, des indicateurs de rareté et dans l'élasticité de substitution des capitaux. M. Solow indique qu'un niveau positif constant de consommation par tête ne peut être maintenu que si l'élasticité de substitution entre les ressources épuisables et les autres est supérieure ou égale à un. Considérant la somme des capitaux financier, technique et environnemental constants, le problème ne réside pas dans la sauvegarde d'un capital mais dans l'optimisation de la consommation des facteurs et dans l'élasticité de substitution entre les facteurs. Par exemple, concernant les gaz à effet de serre, Antoine de Ravignan a montré comment la technologie pouvait régler ce problème (Ravignan, 2010).

Les partisans d'une durabilité forte préfèrent utiliser les indices de stock, de seuil critique et de norme de sauvegarde (Rotillon, 2007). Lorsque la consommation dépasse les potentiels de renouvellement naturel d'une ressource, il y a épuisement. Lorsque certains seuils d'épuisement sont dépassés, l'épuisement devient irréversible.

Par ailleurs, le développement d'un pays a été longtemps associé à l'augmentation de son Produit Intérieur Brut (PIB) qui fournissait la seule donnée prise en compte pour évaluer l'état de l'économie. Cependant cette information est critiquée. En effet, les catastrophes naturelles, biologiques ou les guerres ont la particularité d'augmenter le montant de la richesse produite. Aux USA, il a été démontré que le PIB croissant ne pouvait plus être associé au niveau de santé sociale, soit la qualité de vie moyenne et l'état mental d'un groupe social⁸ ou encore de bien-être.

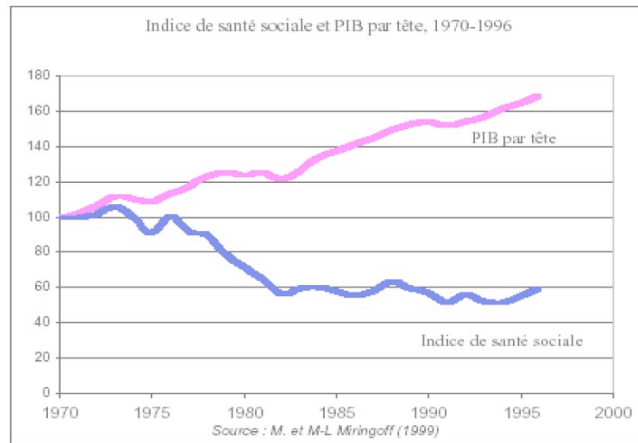


Figure 4 : Comparaison des indices de PIB et d'ISS moyen par tête aux Etats-Unis

Comme l'illustre la Figure 4, depuis les années 70, les courbes du PIB et du bien-être divergent pour les pays développés. Ces divergences s'accroissent depuis les années 1980 (Gadrey, 2005). Depuis, ce principe a évolué. Il a été mis en évidence que la seule création de richesse ne suffisait pas à rendre compte d'un développement soutenable d'un pays. Concernant l'épuisement des ressources naturelles non renouvelables, à l'échelle nationale et internationale, des travaux ont été réalisés (Guesnerie, 2002), (Lander, 2001). Cependant, entre les divergences de point de vue, de méthodes et la multitude des matières à évaluer, le sujet paraît inépuisable.

Concernant les modèles de prévisions, il s'agira de prendre en compte et de rappeler l'incertitude des prédictions dans ces modèles. (Lecocq et al., 2003). Pendant longtemps, la relative inertie des structures technologiques et des comportements permettaient l'anticipation et la prévision à plus ou moins long terme. Plus récemment, des phénomènes comme l'accélération des changements technologiques, la mutation rapide du système économique et social, hérité des trente glorieuses, la mondialisation et l'irruption des problèmes environnementaux au cœur des logiques de développement, imposent la multiplication des précautions (Levarlet, 2000).

S'il est difficile pour les chercheurs en sciences sociales, d'articuler temps économiques et temps écologiques, l'exercice peut être abordé, de manière concrète, par le biais du choix d'un taux d'actualisation⁹. Une décision d'investissement aujourd'hui produira des coûts et des bénéfices qu'il est nécessaire d'évaluer à la date de l'investissement initial. Dans une économie marchande, c'est le taux d'actualisation qui va jouer ce rôle. Si la notion de taux d'actualisation est relativement peu discutée en économie, le choix d'un taux

⁸ Un institut américain (Fordham Institute for Innovation in Social Policy) a élaboré un indice de santé sociale basé sur 16 indicateurs représentatifs de la bonne santé d'une nation : l'IHS. Voici les éléments pris en compte: mortalité infantile, suicide des jeunes, chômage, pauvreté des plus de 65ans, délits violents, maltraitance des enfants, usage de drogues, salaires hebdomadaires moyens, espérance de vie à 65 ans, accidents de la route mortels liés à l'alcool, pauvreté infantile, abandons d'études universitaires, couverture par l'assurance maladie, accès à un logement d'un prix abordable, enfants nés de mères adolescentes, inégalités de revenu familial.

⁹ Néanmoins, l'outil est commun aux échelles micro et macro-économiques. La valeur du taux peut être différente.

d'actualisation dans les analyses coûts / avantages est délicate. En effet, sa fixation privilégie soit le futur, soit le présent. Si le taux est faible ou nul, il favorise les générations futures. Si le taux est fort, il favorise le présent et contente mieux les partisans d'une durabilité faible (Levarlet, 2000). En fixant un taux, la société a la possibilité d'agir afin de modifier la répartition des ressources entre générations.

Les partisans de la « non-actualisation » disent que si les générations futures participaient, elles opéreraient pour plus d'investissements. Les partisans de l'actualisation disent que l'absence de préférence pour le présent, c'est-à-dire le sacrifice de la totalité du revenu actuel est humainement insupportable (Charron F, 1997).

En résumé, un principe de précaution qui cherche à ne pas sous-estimer les conséquences d'actes actuels pour les générations futures, amène à choisir un taux faible.

B.2. L'approche microéconomique

A l'échelle micro économique et en ce qui concerne le secteur du bâtiment, l'approche a été précisée par le groupe de travail européen « LIFETIME » dirigé par A. Sarja de 2002-2005.

L'avancée des travaux de ce groupe est d'avoir confirmé la nécessité d'une approche en coût global sur le cycle de vie complet (Mearig et al., 1999). Le calcul du coût global avait été présenté auparavant dans le manuel rédigé par Flanagan en 1989 (Flanagan, 1989). La notion de coûts ultérieurs à l'investissement, liée à la maintenance, était jusque là encore peu connue des investisseurs (Ellis, 2007). L'analyse des coûts a fait l'objet de nombreux approfondissements (Jones, 1994), (El-Haram et al., 2002),..., qui ont permis l'élaboration d'une méthode « Life Cycle Cost » (LCC) permettant d'établir les fondements de divers outils. Cette méthode LCC a été analysée et publiée au travers de rapports écrits (Clift et al., Bourke, 2000). Des études très complètes ont été réalisées sur des bâtiments de service comme par exemple celle de Junnila qui apporte un éclairage sur les impacts des différentes phases pour les immeubles de bureaux (Junnila et al., 2004). Il présente un logiciel de conception utilisé pour un immeuble de l'Université d'Helsinki dans lequel est calculé le coût global et les impacts environnementaux. Les coûts sont donc établis sur la base du cycle de vie complet, à partir du principe de la norme ISO 14040. Annette Osso avait en 1996 montré l'intérêt économique de constructions respectueuses de l'environnement aux USA à partir d'études de différents bâtiments de service (Osso, 1996). Plus récemment, Catarina Orlando du CSTB a réalisé l'étude économique d'un hôpital (Catarina, 2006). Les différents outils n'abordent pas la question de la durée de vie en dehors d'une donnée fixée *a priori*.

Il faudra attendre 2008 pour voir publier le chapitre 5 de la norme ISO 15686 concernant cet aspect. Celui-ci intègre la notion d'évaluation de la durée de vie et précise dans sa partie 5 le concept de coût global et coût global étendu. Ce guide amène l'utilisateur à prendre en compte les coûts de la construction, de l'exploitation, de la maintenance et de la fin de vie pour le calcul en coût global. Il est prévu l'établissement du coût global élargi aux intangibles tels que l'image, l'efficacité de l'organisation, la qualité d'usage et les externalités. C'est dans le domaine des externalités que réside une des difficultés majeures du calcul en coût global étendu.

Le secteur du bâtiment a donc adopté assez récemment la notion de coût en cycle complet de vie.

Le calcul du coût global agréant des sommes de périodes différentes peut imposer l'usage d'un outil financier homogénéisant les valeurs. L'outil utilisé dans les modèles de prévision économique est le taux d'actualisation présenté dans le paragraphe précédent.

Dans le cadre de comparaison de choix, il s'agit d'une véritable difficulté. Quel taux privilégier afin de réaliser un choix entre une solution plus coûteuse aujourd'hui mais réduisant les impacts environnementaux et les coûts futurs associés et une autre solution aux effets inverses ? Un taux d'actualisation élevé favorisera la seconde solution plus nuisible aux générations futures tandis qu'un taux faible pourrait amener à choisir la première.

Dans la pratique, la norme ISO 15686-5 précise que le taux d'actualisation peut être estimé à partir :

- du coût du financement contracté par l'investisseur ;
- du taux de rémunération de la trésorerie ;
- du taux de rentabilité du cœur de métier pour les entreprises.

La norme précise la notion d'actualisation. C'est le taux utilisé pour ramener une valeur future à sa valeur présente, sans tenir compte du taux de l'inflation. La norme suggère d'appliquer un taux réel d'actualisation compris entre 0 et 4%.

Concernant l'inflation, la norme préconise de raisonner en valeur constante pour éviter des hypothèses aléatoires sur le taux d'inflation « sauf s'il est prévisible que les coûts relatifs des différentes sources d'énergie vont augmenter ». Il est précisé aussi que « l'indexation des prix de l'énergie est un facteur important » du calcul en coût global. C'est pourquoi, elle admet un taux d'inflation spécifique pour les fluides énergétiques. Concernant les simulations d'évolution des prix de l'énergie, nous disposons des données fournies par le modèle ImacimR développé au CIRED (CIRED, 2006). L'analyse de ces scénarios révèle des profils d'évolution dans le temps très opposés. Ce constat s'explique. Pour les scénarios de tarif bas, le développement de produits de substitution remplacera l'énergie en secteur concurrentiel. Pour les scénarios de prix hauts, par ailleurs, les simulations se limitent à 100 ans.

Actuellement, les développements les plus approfondis d'analyse en coût global concernent les bâtiments tertiaires ou industriels. Ces secteurs maîtrisent parfaitement les objectifs fonctionnels de leurs infrastructures et leur durée d'exploitation. Les durées sont, par principe, courtes car elles correspondent souvent au temps de l'amortissement fiscal et l'obligation de résultats économiques.

Par ailleurs, il ne semble pas que les externalités soient évaluées dans le cadre du coût global. La difficulté de l'évaluation économique réside dans la prise en compte de temps relativement long. L'adaptation de la norme ISO 15686-5:2008 Bâtiments et biens immobiliers construits -- Prévision de la durée de vie -- Partie 5: Approche en coût global, à des durées longues et surtout son passage de la théorie à l'évaluation reste à réaliser. La norme préconise des durées allant jusqu'à 100 ans. Cette durée, courte à l'échelle environnementale mais longue à l'échelle économique, nécessite des précautions.

A cette échelle, il semble que les travaux étudiant l'impact de la durée de vie des choix de solutions techniques des bâtiments sur l'économie soient rares. Mats Oberg (Oberg, 2005) fournit l'approche la plus aboutie et la plus concrète liant durée de vie et impacts sur les coûts. Il pose les questions de l'impact de la durée de vie et de la qualité de la construction sur les coûts. Les questions des coûts cachés ou transférés sur la collectivité sont évoquées sans être développées. Les impacts environnementaux ne sont pas développés en ce qui concerne leurs

incidences sur les coûts futurs. Les conclusions intéressantes quant aux choix de matériaux et système constructif impliquant l'aspect énergétique, sont liées à la localisation suédoise des constructions. Ces conclusions ne sont donc pas transférables dans un autre pays. Enfin, l'étude prend pour base de référence le béton, seule solution qui fasse l'objet d'une analyse approfondie lors des comparaisons de choix constructif. En dehors de la solution technique du béton, l'étude ne réalise pas d'évaluation des autres matériaux en regard d'autres indices de développement soutenable.

B.3. Les externalités et le coût global étendu

Les considérations générales et définitions

Les effets externes font partie intégrante de la théorie économique depuis qu'Alfred Marshall les a présentés pour la première fois (Marshall, 1906), mais c'est seulement dans les années 1960 que cette expression s'est généralisée et a été utilisée beaucoup plus largement dans l'analyse économique.

Il y a externalité lorsqu'une action d'un agent influence le bien-être d'un autre agent, sans que cette action ne rentre dans un marché économique. Une externalité peut être positive ou négative. Cette lacune engendre un écart entre l'équilibre du marché et l'optimum d'utilisation des facteurs de production. Ce déséquilibre implique la recherche de l'optimisation, réalisée lorsque le coût marginal de dépollution atteint le coût marginal de pollution. En d'autres termes, les effets externes proviennent d'un écart entre coûts (ou avantages) privés et coûts (ou avantages) sociaux, dont la conséquence est l'inefficacité économique.

Ronald Coase a montré comment la théorie économique peut traiter les effets externes technologiques en précisant l'importance des coûts de transaction du règlement de l'externalité. Il a montré aussi que les effets de la prise en compte de l'externalité est bilatérale. En effet, une action d'un agent engendre l'inconfort d'un autre agent. Si une loi ou une taxe est votée pour réduire cet inconfort, alors c'est le second agent qui indirectement agit sur le premier (Coase, 1960).

Les effets et bien plus encore leur évaluation monétaire sont difficiles. La tentative d'évaluation se réduit essentiellement, pour le moment, aux impacts des émissions de gaz à effet de serre (GES). Cette valorisation en fait un impact très médiatisé. De nombreuses autres externalités font l'objet de timides évaluations et ces travaux sont sujets à la confrontation de nombreuses difficultés qui sont sources de nombreuses incertitudes. Ces incertitudes justifient souvent les absences d'évaluation et de prise en compte dans les calculs, les décisions et dans les actes.

A partir de la mise en évidence d'une externalité et de son évaluation, plusieurs stratégies peuvent être envisagées :

- l'interdiction de la cause de l'externalité par la réglementation ;
- une politique de régulation par l'instauration d'une taxe dont le montant doit approcher le coût marginal de sa suppression. La démarche visée est celle de la recherche de l'optimum au sens de Pareto (Dumas, 2004).

Les difficultés

L'évaluation des impacts environnementaux des activités humaines n'a pas obtenu son autonomie et la reconnaissance d'un champ scientifique mature. Bien qu'ayant fait l'objet de nombreux articles, ce vaste sujet souffre d'une trop récente volonté de prise en compte. (Frame et al., 2009). Pourtant le développement des méthodes de prise en compte des externalités s'accroît.

Le concept d'externalité est large et complexe. Il s'applique à toutes activités y compris celles déclarées propices à l'environnement. Par exemple, les externalités négatives peuvent subvenir lors de la mise en place d'éolienne dans le cadre d'une politique de développement des énergies renouvelables (Meyerhoff et al., 2010). Le cas de l'impact paysager en est une illustration. A l'opposé, des externalités positives peuvent se révéler. Par exemple, ce serait le cas pour des régions aux très basses températures qui subiraient des effets positifs d'un réchauffement climatique. Dans ce cas l'impact a un effet d'aubaine. (Faucheux et Nicolai, 2007)

Il semble que le secteur du bâtiment n'ait pas fait l'objet de développement précis et complet de l'ensemble des externalités. Des progrès ont été réalisés, notamment dans la mesure des sources d'impact au travers de la mise en place des FDES dans le bâtiment. Au contraire, par exemple, il peut être observé l'absence d'information concernant les nuisances sonores et visuelles du chantier, tout au moins en France. Il apparaît aussi difficile d'évaluer les résultats architecturaux et urbains immédiats et à venir des projets. Comment observer et analyser s'il s'agit d'externalités positives ou négatives... Dans le domaine social, il semble aussi que les études d'externalités soient très ponctuelles. De nombreuses difficultés se présentent lorsque l'on veut évaluer les impacts externes d'une action. Tout d'abord, les pressions pesant sur l'environnement résultent de facteurs multiples dont il paraît difficile d'isoler les sources afin d'en réaliser la part d'imputation. L'évaluation des effets d'une externalité suppose que soient connus à la fois tous les producteurs et tous les receveurs de l'externalité. Une autre difficulté réside dans la délimitation du système pris en compte. C'est une tâche qui peut être encore plus difficile lorsque les sources d'externalités sont diffuses. Par ailleurs, les victimes d'une pollution à la sensibilité variable sont souvent aussi difficiles à identifier (Patrice Dumas 2004-2005 ENS Paris). Les externalités ne sont pas linéaires. Ainsi, une pression peut s'exercer en continu sur une ressource ou une espèce sans qu'aucun effet ne se manifeste avant longtemps, mais lorsqu'un certain seuil ou durée de pression sont franchis, les effets négatifs peuvent se multiplier rapidement (Stevens, 2006). Lorsque les acteurs, les pollutions et les effets sont connus, les évaluations sont envisageables. Une régulation est possible. Lorsque des incertitudes existent, ce n'est plus le cas. Enfin, l'incertitude relève aussi de l'irréversibilité potentielle de l'impact à des seuils souvent difficiles à évaluer (Georgescu-Roegen, 1971).

De façon générale, pour connaître l'effet d'une externalité de type pollution, il faut déterminer les acteurs en jeu, les modes de dispersion des polluants, leurs transformations chimiques et leurs effets sur les écosystèmes naturels. Cette évaluation requiert donc des moyens scientifiques et techniques importants dont l'absence, même partielle, engendrent des incertitudes. En 2006, Candice Stevens écrivait : « un grand nombre de systèmes écologiques sont encore mal compris, d'où la nécessité de combler les lacunes scientifiques pour pouvoir élaborer des indicateurs de meilleure qualité » (OCDE, 2006).

Les risques

Concernant l'environnement, les risques résident dans l'irréversibilité des conséquences des choix : le fait que les décisions prises aujourd'hui modifient les conditions dans lesquelles seront prises les décisions de demain. Ceci fait appel à la notion de flexibilité, d'irréversibilité et d'incertitude (Ha Duong Minh, 1998). Ha Duong décrit et quantifie ces risques. Ils précisent que nous allons de mieux en mieux connaître le fonctionnement du climat et par conséquent, que les mesures que l'on prend aujourd'hui doivent être flexibles. Des modèles sophistiqués tentent de simuler et d'évaluer les risques et leurs conséquences mais dans ces modèles intégrés du changement climatique, il faudrait prendre en compte la valeur espérée de l'information future, qui mesure la flexibilité des choix. Cette valeur dépend des conditions d'ajustement des systèmes énergétiques et du progrès techniques. Parallèlement, le principe de précaution impose la prise en compte des simulations malgré l'incertitude (Levarlet, 2000).

Les évaluations

Bien que critiqués en raison d'hypothèses entachées d'incertitudes (Svensmark et al., 1999), (Enghoff, 2008) puisque pour ces chercheurs l'activité solaire est trop négligée dans les causes de l'augmentation des GES de l'atmosphère, les travaux de recherche environnementaux et économiques ont permis l'évaluation de certains impacts et le développement d'outils d'évaluation. La prise en compte des externalités nécessite une information précise et transparente. Dans un article de 2006 (Eshet et al, 2006), nous trouvons un état de l'art précis des études réalisées sur le sujet. Ses auteurs désirent permettre aux acteurs des prises de décisions sur les bases d'informations précises. Le second objectif de l'article est de présenter les différentes méthodes et d'en évaluer la performance. Il semble ne pas exister d'étude plus récente.

Par ailleurs, un premier outil d'évaluation complet des coûts, Eco-cost Value Ration (EVR), comprenant la possibilité d'introduire les coûts des externalités a été élaboré (Vogtlander et al., 2001). Cependant, à ce jour, cet outil n'a pas été véritablement exploité en raison de l'absence de précisions quant aux coûts des externalités.

C. Les contextes socioculturels

Les aspects social et culturel sont intimement liés. La plupart des éléments qui les comprennent sont entremêlés. A titre d'exemple, l'état sanitaire d'un logement est fortement lié aux moyens bien entendu, mais aussi au niveau culturel de ses occupants. La question du déterminisme en est un autre exemple, il peut être aussi bien abordé dans une approche sociale que culturelle. Les deux paragraphes suivants tentent de présenter chacune des deux approches sur la base d'une connotation forte de l'une puis de l'autre.

C.1 L'approche sociale

En ce qui concerne le développement soutenable, l'impact social a été récemment défini par la norme ISO 15392 développement durable dans la construction - Principes généraux (ISO 15392:2008). L'impact social est caractérisé par « *la modification de la société ou de la qualité de vie, négative ou bénéfique, résultant totalement ou partiellement des aspects sociaux* ».

A l'échelle de la ville, la Conférence de Rio a permis de proposer le cadre nécessaire à l'action politique territoriale dans une approche de développement soutenable. Cette conférence a permis l'élaboration des « Agenda 21 ». Ces travaux proposent un plan d'action comprenant une approche sociale. Les collectivités ont pu trouver dans ce plan, un guide permettant la mise en place d'une stratégie de l'approche sociale basée sur un groupe d'indicateurs. A l'échelle de l'habitat et de la construction, dans les faits, seuls quelques points spécifiques tels que le confort, la santé ou les superficies habitables, traitent de la question sociale pour l'approche du développement soutenable.

Pour la contribution sociale des logements au confort et à l'hygiène, ce sont les conditions de vie en fonction des dimensions des pièces et des conditions sanitaires, d'éclairage et de ventilation, qui doivent être retenues (Hetzel, 2009).

Pour l'aspect sanitaire, dans leur ouvrage « Le guide de l'habitat sain », Suzanne et Pierre Déoux, médecins spécialisés dans les conditions de vie des logements, développent la question des polluants nuisibles à la santé. Cet ouvrage permet de hiérarchiser les polluants à prendre en compte. Il est cependant nécessaire de noter que la difficulté réside davantage dans le niveau admissible d'exposition, lié en particulier à la proximité de la source et aux conditions de dispersion du polluant, plutôt qu'au niveau d'émission lui-même. Les critères d'évaluation d'un matériau sont repris dans le tableau suivant (Déoux, 2004).

Eléments	Critères	Niveau du critère
Sensibilité à l'humidité et aux micro-organismes	L'augmentation du taux humidité dans les bâtiments, la réponse des matériaux aux différentes conditions est importante afin de réduire les risques de contamination par les micro-organismes.	Classe F- : vulnérable à la croissance fongique Classe F : inerte à la croissance fongique Classe F+ : fongistatique B- : vulnérable à la croissance bactérienne B : inerte B+ : bactériostatique
Emission de fibres et de particules	L'inhalation importante et répétée de poussières contenant de la silice cristalline peut provoquer des fibroses et cancers pulmonaires. Les produits fibreux, d'origine naturelle ou artificielle et de nature minérale ou organique sont suspectés d'être pathogènes.	Pas de niveau
Composés organiques volatils (revêtement de murs et sols)	L'air intérieur voit l'élaboration d'un diagnostic obligatoire à court terme lors de la cession ou location d'un logement	Classe C- : Produit émissif Classe C : produit à faibles émissions Classe C+ : produit à très faible émission
Emissions radioactives	Tous les matériaux contiennent les éléments radioactifs Uranium ²³⁸ (Radium ²²⁶) Thorium ²³² Potassium ⁴⁰	La radioactivité naturelle peut être une référence : 40 Bq/kg de Ra ²²⁶ normal si < 100 40 Bq /kg de Th ²³² normal si <100 400 Bq/kg de K ⁴⁰ normal si < 1000 Donne lieu au calcul de I
Risques de cancer	L'importance cancérigène d'un matériau doit être apprécié et quantifié	Les groupes sont : 1 : cancérigène 2A : probablement cancérigène 2B : possible 3 : ne peut-être classé 4 : probablement pas cancérigène

Tableau 10 : Synthèse des indicateurs de « l'habitat sain » (Déoux, 2004)

En fin de vie, lors de la démolition, d'autres impacts se produisent. Lors des cycles construction/reconstruction, des déchets, des émissions de fibres, de particules et certains composés organiques volatils (COV) sont produits. **A chaque construction/déconstruction, ces émissions sont produites dans des proportions dont l'importance varie en fonction des produits utilisés. Ces pollutions sont donc quantitativement modifiées par la durée de vie des bâtiments.** Les FDES des différents produits réalisées par les industriels présentent les valeurs d'indices concernant ces éléments.

L'évaluation de l'impact des solutions sur la santé se traduit par le calcul en nombre d'années de vie perdues. Cet impact a son propre indicateur intitulé DALY (Disability

Ajusted Life loss) (Daly, 1995). Par exemple et de manière simplifiée, on additionne les jours perdus à la suite d'une bronchite aux années perdues résultant d'une mort prématurée due à la pollution de l'air pour obtenir les Dalys, c'est-à-dire le nombre total d'années de vie active perdues dans une région donnée en raison de la pollution. Cette méthodologie a été développée par l'OMS et la Banque mondiale, dans le but d'établir une mesure des impacts des pollutions de l'air et de l'eau sur la santé humaine.

Concernant l'impact social, l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) rappelle que l'identification positive de l'utilisateur à son lieu d'habitation lui permet l'appropriation de son environnement, avec pour corollaire, un plus grand respect de cet environnement et un sentiment de sécurité (Merz, 2000). Un patrimoine bâti de qualité contribue à la cohésion de la société, à son bien-être et à sa productivité. Ensuite, le bâtiment comprend les éléments participant à la mémoire des individus qui occupent et se succèdent.

Le bâtiment est aussi un élément composant l'îlot. Il participe à l'image collective de quartier. Il contribue à l'identification de l'individu à son habitat. Dans les quartiers difficiles, quels que soient les griefs des habitants à l'encontre de leur habitat avant la démolition, aucun autre logement ne pourra cristalliser les moments vécus participant à l'histoire de l'occupant.

L'acte de démolition du logement social présente un caractère violent de réponse urbaine, dont la justification trouve souvent son origine dans le mauvais fonctionnement des liens sociaux développés. Cette démolition n'apporte pas en général de réponse satisfaisante (Rojas Arias, 2007). La fin de vie d'un bâtiment et son remplacement ne garantissent pas la réussite du projet.

En conclusion, nous voyons l'importance de la qualité du bâtiment et du quartier qui, au travers des liens affectifs et sociaux qu'ils produisent, permettront de réduire les risques de démolition et de favoriser la pérennité.

Enfin, Jean Hetzel réalise une analyse fine des besoins d'évaluation de l'impact des bâtiments sur le développement soutenable au travers de la prise en compte des générations. Il rapproche les indicateurs de la question des générations et insiste sur les indicateurs d'éthique intergénérationnelle et interrégionale. Pour lui, la notion de cycle de vie implique de ne pas différer les impacts sur les générations futures... L'important est qu'ils aient les mêmes droits d'accès au logement, aux transports publics, travail et éducation (Hetzel, 2009).

En résumé, l'approche sociale comprend les questions de confort, d'hygiène, de santé et d'impact sur la sensibilité des usagers. Les nombreuses émissions de polluants peuvent être à l'origine de problème de santé allant jusqu'au décès lorsque les expositions sont importantes ou les utilisateurs fragiles.

Le rapport des impacts à la durée de vie du bâtiment sur cette question est tout aussi ardu. Une durée de vie réduite peut permettre d'assurer une reconstruction aux normes contemporaines de confort et d'hygiène. L'impact psychologique, sans avoir fait l'objet d'investigations approfondies, semble être « dévastateur » pour l'occupant. Enfin, le prix du bâtiment reconstruit, mécaniquement plus élevé que la valeur du bâtiment démolé, est un facteur de différenciation sociale voire de ségrégation.

Nous l'avons vu, la durée de vie d'un bâtiment, et par là, l'action de démolition/reconstruction, a un impact direct à l'échelle du bâtiment ou du quartier sur l'individu. Cependant, cet impact n'est pas à ce jour mesurable car il résulte de multiples facteurs, entre autres psychologiques, qui nécessiteraient des études spécifiques. Dans l'attente d'études complètes sur les quartiers et sur les avantages du cycle démolition/reconstruction au travers des améliorations résultantes, ces impacts ne peuvent être pris en compte.

C.2 L'approche culturelle

Le terme « culturel », bien que limité au cadre de notre recherche, recouvre un sens large et un contour flou. Afin d'analyser cet aspect du développement soutenable pour notre question, il est nécessaire d'en préciser le sens. A cette fin, nous reprenons les différents propos ci-dessous.

D'une manière générale, l'approche culturelle est réintroduite par la Commission Française du développement durable (Avis N°2002-07 d'avril 2002). La Commission regrette que la dimension sociale traite davantage de l'équité dans la redistribution des richesses que des relations qualitatives entre les humains. Le développement culturel est, à ses yeux, tout aussi essentiel pour notre avenir. La diversité culturelle serait « *gravement menacée par une mondialisation qui tend à uniformiser les imaginaires en répandant et valorisant un seul modèle culturel sur toute la planète. Autant la bio-diversité semble vitale pour la Terre, autant la diversité culturelle est une richesse de l'humanité qu'il est urgent de s'appliquer à maintenir* ».

Concernant le secteur du bâtiment et la notion de patrimoine culturel, nous reprenons la définition fournie par le Conseil des monuments et sites du Québec (Laberge, 1999).

« Les établissements humains hérités, produits des relations historiques entre les communautés, leurs activités et des lieux, constituent le patrimoine bâti.

Pour cet organisme, le patrimoine bâti contient plusieurs caractéristiques. C'est un bien « collectif » en ce sens qu'il contient des valeurs de savoir et d'art, il raconte l'histoire et encadre la vie des peuples. *« Il comprend un ensemble organisé d'éléments d'échelles diverses tels que l'architecture vernaculaire, les monuments, les monuments historiques, les tissus urbains, les villes et les villages, les structures territoriales et les sites qui entrent dans la composition des paysages culturels. Enfin, il est le reflet de l'évolution sociale et culturelle de la société. Le patrimoine bâti témoigne des institutions, des valeurs, de l'appropriation du territoire, de l'art d'habiter et des pratiques constructives qui se sont développées sur un territoire, des courants esthétiques qui ont suscité l'adhésion des ancêtres, de l'adaptation au milieu et de notre créativité. Le patrimoine bâti est un des éléments essentiels qui nous distinguent comme peuple » (CMQS, 1999).*

Sur cette question, le groupe de projet « LIFETIME » (2001-2005) liste les points suivants :

- les traditions de construction ;
- le style de vie ;
- les savoir-faire ;
- l'esthétique ;
- le style architectural

Séverine Duchemin démontre dans sa thèse que le bâti doit aussi prendre en compte des critères culturels tels que les problématiques de conservation du patrimoine et les traditions architecturales. (Duchemin S, 2010).

La question culturelle peut être abordée aussi selon deux approches. L'approche peut concerner les pratiques communes d'un groupe de personne à un moment donné ou la transmission des savoirs parfois cristallisés au sein d'objets tels que les bâtiments. Avec le temps, ces objets deviennent de véritables vecteurs véhiculant les connaissances d'un groupe. Néanmoins, si le facteur culturel paraît logiquement associé, l'analyse des liens entre le bâti et la culture est assez complexe. Patrick Perez dans son cours à l'ENSA de Toulouse évoque

l'idée que le bâtiment ou plus largement l'habitat peut être le produit de l'environnement. Le milieu en imposant son contexte physique et économique, modifierait l'évolution naturelle des systèmes culturels. Cette théorie fait référence à l'adaptation absolue des organismes à leur milieu. Pourtant, cette théorie déterministe de l'environnement ne se révèle pas toujours exacte. En effet, il existe des réponses différentes à des milieux aux caractéristiques proches. Dans la réalité, il existe des situations pour lesquelles les hommes modifient leur milieu de façon permanente pour l'adapter justement à leur habitat. A l'inverse, des sociétés s'étant déplacées n'en continuent pas moins de garder avec elles des mises en œuvre qui ne correspondent pas nécessairement à leur nouvel écosystème. Les raisons des choix conceptuels de l'habitat sont aussi affectives, religieuses, esthétiques... (Pérez P. Extrait de cours à l'ENSA de Toulouse).

Jean Dethier, questionné sur l'inscription des constructions en terre crue au Patrimoine de l'Unesco, insiste sur l'importance des traces d'habitats vernaculaires révélatrices de l'esprit d'une civilisation. (Dethier, 2008). Il lui paraît indispensable que les critères de choix de cet institut international s'articulent avec beaucoup plus d'évidence sur des problématiques essentielles relatives à l'avenir de l'humanité et de notre planète. Son argumentation pourrait servir de base à une réflexion d'une approche sociale et culturelle de l'ensemble des techniques. Pour lui, « *assurer la sélection et la valorisation des cultures constructives traditionnelles servirait de référence culturelle et éthique, écologique et technologique pour la conception actualisée et la construction moderne d'habitats* ». Il considère que la préservation des techniques du passé permettrait d'alimenter le renouvellement des techniques d'aujourd'hui. Par ailleurs, la conservation valoriserait la dignité et la fierté des groupes sociaux édifiant des habitats et y vivant. Il ajoute « *Notre époque s'est éloignée des compétences culturelles et technologiques des civilisations antérieures. Cet effacement de la mémoire culturelle a entraîné la perte des savoirs historiques et vernaculaires, la non transmission des savoir-faire ancestraux, la désagrégation de la mémoire collective et du tissu social* ». Le résultat serait la perte des identités culturelles régionales, de leurs diversités et de leur génie spécifique.

Sur le plan culturel, il est aussi difficile d'ignorer les liens qu'entretiennent le bâtiment et la ville dans le cadre d'une analyse d'impact. Le bâtiment, matérialisant la parcelle, est un élément structurant l'îlot, la rue et par conséquent la ville. L'interaction bâtiment / ville est cependant d'une grande complexité dans le fait qu'elle interpelle différentes échelles et de nombreuses disciplines. Chacun des bâtiments ainsi que l'ensemble formé par leur association ont des impacts fonctionnels, morphologiques, environnementaux et patrimoniaux sur la ville. Alors que A Rossi qualifie les espaces publics de « singulier » c'est à dire de noyau d'agrégation et pôle d'attraction autour desquels viennent s'organiser les zones de résidence (Rossi, 1984), le temps vient conférer cette fonction singulière à l'ensemble constitué par les bâtiments. L'ensemble génère une entité autonome et indépendante qui lui fait atteindre le statut de « quartier » et par là, de personnalité propre.

L'importance du temps sur la ville a été longuement et précisément décrit. Il est établi ainsi que la ville se transforme à tout moment. Le mouvement qui comprend les actions de déconstruction-reconstruction est incontournable dans l'analyse et la compréhension de la ville. Le bâtiment est le « sédiment » laissé par chaque vague du procès de production de la ville (Panerai Ph.). Les « objets » urbains en général et les bâtiments en particulier constituent un handicap du fait de leur inertie. Les changements de bâtiment sont décalés dans le temps par rapport aux changements sociaux et techniques qui les commandent. « *C'est de la*

dialectique entre le mouvement et l'inertie que naît la nécessité de la composition urbaine, seule garante de la cohérence de sa production » (Riboulet P, 1998).

Les impacts de la durée de vie d'un bâtiment sur son environnement et plus précisément sur la ville, peuvent s'analyser comme des externalités. Celles-ci peuvent être positives dans le cas d'une durée de vie longue d'un bâtiment à la participation culturelle enrichissante. Les gains peuvent être sociaux, économiques, environnementaux et culturels. A l'inverse, la durée de vie longue peut constituer une externalité négative lors d'un effet dommageable. Les effets devraient être exhaustivement décrits et évalués. A propos de la ville, Luc Adolphe énonce le concept suivant : *« Une nouvelle conception de la gestion patrimoniale de certains équipements ou aménagements, bref des biens publics urbains, dépassant la seule loi du marché (et ses critères de rentabilité ou de solvabilité), en tenant compte par exemple des externalités, notamment l'impact du projet sur l'environnement naturel, social ou culturel. Ce nouveau mode de gestion du patrimoine oblige à cesser de considérer le passé comme terminé, en essayant d'en analyser les possibilités encore inexploitées d'évolution sur le long terme : une vision tournée vers le présent plutôt que vers le passé. »* (Adolphe, 1995). C'est le concept de réversibilité qui peut être intégralement repris à l'échelle du bâtiment. Il pourrait être imaginé des solutions conceptuelles reconfigurables pour d'autres usages ou d'autres contraintes techniques ou économiques. Par là, l'impact du bâtiment sur l'environnement et la ville se trouve modifié. Il peut s'agir d'une réutilisation, d'un recyclage ou d'une valorisation.

Ces propos se placent dans une perspective cohérente de respect de l'approche en termes de développement soutenable. Les choix constructifs du passé étaient *« pragmatiques, efficaces, économes et s'insérant dans un cadre environnemental local. La proximité des matériaux induisait les solutions et les choix techniques. La rareté d'un matériau ou de l'énergie nécessaire à la fabrication d'un produit encourageait le recyclage »* (Deltier, 2005).

La culture peut donc aisément améliorer le respect de l'environnement naturel, social ou culturel. Elle permet d'améliorer l'image qu'ont les groupes d'eux-mêmes. Enfin, la culture peut être aussi ce qui permettra de distinguer les « objets » bâtis de l'ensemble des produits de grande consommation. Il ne faut pas cependant agréger la durée de vie de l'objet vecteur de culture et la culture. Néanmoins, le bâtiment en contient la trace.

Il n'existe aucun indice quantitatif de la performance culturelle d'un bâtiment. Seul des grilles d'analyse peuvent être constituées. Ces grilles prennent leur sens dans l'analyse patrimoniale des bâtiments.

L'approche culturelle implique d'aborder la notion de valeur patrimoniale d'un objet qui va permettre de le différencier d'autres objets de consommation courante. Le secteur du bâtiment, aux durées de vie longues des objets, favorise la patrimonialisation. Le bâtiment endosse un double statut. Il a un statut de bien de consommation courant répondant à un besoin mais possède aussi un statut patrimonial (Agueb, 2005). Dans des pays où les bâtiments, en particulier de logement, ont une durée de vie courte tout au plus de l'ordre de la génération, telle qu'en Amérique du nord, le patrimoine culturel s'établit au niveau de la tradition des techniques de construction. L'objet lui-même ne porte pas ou peu de valeur patrimoniale ou culturelle. Le bâtiment est perçu comme un produit de consommation courante. Dans les sociétés plus anciennes, la culture se « cristallise » parfois dans les bâtiments eux-mêmes aux techniques de construction variées.

La valeur de patrimoine culturel des bâtiments a fait l'objet de nombreuses études. Appuyée sur l'analyse patrimoniale des monuments, la valeur patrimoniale des bâtiments plus communs peut être analysée. Les américains du Nord ayant une histoire relativement récente, il est intéressant d'analyser leur approche de la question du bâtiment en tant que patrimoine. Martin Dubois, spécialiste du patrimoine culturel québécois, reconnu par son gouvernement, présente de manière structurée la valeur patrimoniale d'un bâtiment. Il appuie son propos en reprenant le modèle systémique proposé par Luc Noppen et Lucie K. Morisset (Turgeon et al., 1997). Il précise que la valeur patrimoniale, même si elle est naturelle au sein des monuments, n'est pas absente, sous certaines conditions, des bâtiments plus courants. Le système d'analyse comprend plusieurs valeurs.

La valeur d'âge et l'intérêt historique

L'âge est la première qualité. C'est l'âge qui a donné naissance au concept de monument historique. Pour Martin Dubois, cette valeur se lit au travers de l'âge réel (pérennité) et de l'âge apparent (ancienneté). Du point de vue de la valeur d'âge, le bâtiment ancien est par nature plus précieux que le bâtiment récent.

La valeur d'usage

Étroitement associée aux typologies fonctionnelles en architecture, la valeur d'usage est évocatrice lorsqu'elle est jugée représentative ou exemplaire d'un usage donné. Il existe donc un lien étroit entre la valeur d'usage et la valeur d'âge d'un bâtiment. En effet, il est possible de trouver des documents sur l'évolution des dispositions architecturales liées aux pratiques sociales et culturelles de chaque époque. On mesure alors la commodité du bâtiment. Cependant, pour statuer sur la valeur d'usage, il faut aussi juger de son utilité ou de son adaptabilité. L'édifice le plus performant au point de vue de la valeur d'usage devient donc celui qui, tout en conservant ses dispositions anciennes, continue d'être utilisé aujourd'hui.

La valeur d'architecture

Reflète d'un savoir faire, l'architecture traduit également les préoccupations esthétiques d'une époque. La valeur d'art peut être intentionnelle lorsque la fonction de l'objet est de symboliser, de manifester, ou que son concepteur ou constructeur en a fait le porte-étendard d'une idéologie.

Il résulte de cette analyse le lien étroit entre les qualités intrinsèques d'un bâtiment, son ancienneté et par là, sa durée de vie et sa valeur patrimoniale. Dans cette approche, nous pouvons analyser la démolition d'un bâtiment comme l'échec d'une « patrimonialisation » ou la possibilité d'une nouvelle chance au travers d'une reconstruction. Par ailleurs, cette approche permet, au travers de l'analyse des valeurs, une évaluation qualitative.

En résumé, la durée de vie d'un bâtiment est étroitement liée à l'aspect culturel. La qualité « patrimoniale » d'un bâtiment influencera sa pérennité et la durée de vie de celui-ci permettra la transmission de savoir faire et de valeurs attachées à une période. Cependant, nous observons l'absence d'un consensus sur les méthodes et les critères d'évaluation qui permettrait d'évaluer l'impact de la durée de vie au travers de la mesure de la valeur culturelle.

D. L'intersection des « piliers » économique, environnemental et social

Les développements précédents ont analysé l'approche en termes de développement soutenable à partir des piliers abordés séparément. Afin d'évaluer réellement les projets en termes de développement soutenable, il est important de situer le système d'analyse le plus à l'intersection des piliers économique, social et environnemental. Cette évaluation doit pouvoir prendre en compte l'évolution du projet dans le temps. L'objectif est donc ici d'étudier l'existence et les caractéristiques d'indicateurs situés aux intersections de l'économie, de l'environnement et du social.

D.1 L'économie et l'environnement

Le PIB ne tient pas compte des impacts environnementaux de la création de richesse (Rotillon, 2007). Depuis quelques décennies, des voix s'élèvent et dénoncent ce constat. Il est actuellement admis qu'il faille dépasser le simple critère PIB en associant entre autres des indices environnementaux (Stiglitz, 2009). Les risques et les opportunités d'un réchauffement climatique ont été analysés (Faucheux et Al, 2007). Certains travaux ont établi le coût du réchauffement climatique l'évaluant à 5% du PIB (Stern et al., 2006). Néanmoins l'attention porte essentiellement sur le facteur des gaz à effet de serre. Sur le plan politique, aucun des autres impacts de l'activité humaine sur l'environnement n'est le centre de préoccupations immédiates.

Pour les émissions de GES, certains économistes pionniers dans cette aventure, tels que Ambrosi et Hourcade (Ambrosi et al., 2003), ont tenté l'exercice de marchandisation des droits à émission de carbone. Les résultats de leurs calculs établissent la nécessité d'un consentement à payer de 30€ en 2002 la tonne de carbone soit 33,78€ en 2008 (Criqui et al., 2003) sur la base d'une analyse coût-efficacité en fonction des objectifs qui ont été négociés par les Etats. Les récentes volontés d'application d'une taxe carbone pourraient néanmoins entraîner mécaniquement l'étude et l'établissement de liens entre économie et environnement étendu à d'autres fonctions. Dans l'immédiat, ce lien ne s'établit, semble-t-il, que sur la base de l'effet de gaz carbonique. Notons que le principe n'a pas été mis en application.

Néanmoins, dans le cadre d'un choix de solutions techniques, le bilan coûts-avantage de lutte contre les pollutions et en particulier des GES, peut-il être négatif ? Concrètement, ce serait le cas d'une solution moins polluante et moins coûteuse.

En résumé, nous voyons qu'il existe des méthodes de calculs de coût global voire de coût global élargi au sens de la norme ISO 15686-5 qui permettent l'établissement de calculs homogènes et la comparaison de projets. Cependant, la question des externalités n'a pas encore abouti dans les faits.

D.2 L'économie et le social

A l'échelle générale, les évaluations économiques s'étaient trop souvent arrêtées à la stricte création de richesse. A. Sen est le premier économiste à avoir réellement voulu introduire la notion de bien-être qui a permis de faire évoluer la notion de développement soutenable (Sen, 2000). Le 15 septembre 2009, le rapport Stiglitz a encore précisé les défauts des indices traditionnels. Sans abandonner les facteurs économiques, Il préconise de tenir compte de l'évolution du patrimoine, ainsi que de la soutenabilité des activités, l'évaluation du capital naturel, physique, humain, social transmis aux générations à venir paraît

indispensable (Stiglitz, 2009). L'ensemble des travaux traitant du développement soutenable tente de replacer l'homme au cœur de l'approche du développement soutenable. Les indices sont très nombreux. Nous allons tenter de lister les différents éléments de l'approche sociale du bâtiment.

A l'échelle du bâtiment, l'indice économique comprend un aspect social au travers du coût global qui a bien un impact sur le propriétaire et l'occupant. Le facteur économique lié au service rendu par la solution technique retenue, peut générer des moindres coûts qui vont accroître la liberté ou des surcoûts qui la diminueront. La durée de vie a un impact direct sur le facteur économique au travers de l'amortissement des dépenses d'investissement, de fonctionnement, de maintenance et de démolition. Le coût global modifié par la durée de vie et les prises en compte des externalités peuvent modifier le potentiel de liberté économique de l'individu. La mise en place d'écotaxe et le respect du principe de pollueur payeur peut avoir aussi un impact direct sur l'individu.

A l'échelle de l'individu, l'impact est tout autant difficile à appréhender si l'on considère les facteurs psychologiques relatifs à chacun des individus. Néanmoins, certains impacts peuvent être évalués. La notion de bien-être des individus semble être le critère s'imposant au travers du développement soutenable à l'intersection économique et social. (Gadrey, 2007). Cependant, cette notion très développée à l'échelle macroscopique ne l'est pas à cette échelle. La question qui se pose concerne donc la construction d'une économie soutenable dans le temps, respectueuse du bien-être, de l'individu et aussi de l'environnement.

Pour résumer la question sociale et économique de cette approche, le terme de bien-être peut reposer à la fois sur la capacité d'agir et sur la satisfaction ressentie (Sen, 2000).

D.3 L'environnement et le social

Comme nous l'avons vu, l'impact des émissions nuisant à la santé fait l'objet d'une évaluation qualitative et quantitative (Hetzl, 2009). Les travaux les plus avancés à l'intersection des piliers social et environnemental sont ceux de S. Moffatt et N. Kohler (Moffatt et al., 2008). Ils démontrent l'intérêt d'une approche systémique et introduisent la notion de d'objet bâti comme un complexe socio-écologique d'un système. Ils distinguent la nature de l'environnement bâti en considérant ce dernier comme un attribut culturel qui change avec le contexte historique. Ils rappellent aussi la nécessité de délimiter l'objet évalué dans le temps et l'espace. Les auteurs insistent sur la faiblesse des travaux dans les champs situés à l'intersection des piliers et proposent un cadre méthodologique d'interrogation.

D.4 A l'intersection des trois piliers

Le principe de l'approche du développement soutenable implique que les trois piliers soient simultanément pris en compte. Les interactions concernant les piliers deux à deux laissent quelques possibilités. Les domaines n'étant pas homogènes que ce soit en termes d'approche, de maturité ou de consensus, la comparaison d'impacts à l'intersection commune des trois piliers semble difficile. Les travaux actuels permettent des investigations à l'intersection de l'économie et de l'environnement, dans une moindre mesure à l'intersection de l'environnement et du social et enfin, de manière encore moins établie entre le social et l'économie.

Conclusion

Il semble admis qu'une évaluation de performance dans le cadre du développement soutenable doit comprendre simultanément les critères environnementaux, économiques, et sociaux. Elle doit être réalisée sur la base d'une approche et d'une analyse systémique du bâtiment. De plus, Jean Deltier a montré à quel point la culture des constructions, pouvait relever de la problématique du développement soutenable et tout particulièrement dans son rapport à l'environnement. Les différents critères ont été largement explicités mais leur agrégation semble difficile. L'objectif se heurte à deux écueils. Le premier est lié à la rareté relative des travaux sur les rapports des approches sociale et culturelle. De manière générale, ces approches n'ont pas réussi à élaborer des indices homogènes et tangibles permettant une évaluation fiable et une comparaison facilitée. Le second tient dans la difficulté d'agrèger des indices, y compris ceux explicites des domaines environnementaux et économiques. Les rares agrégations de ces deux domaines semblent restreintes à la difficile question de l'externalité qui concerne l'environnement et l'économie.

Il est établi que toutes les réponses à une interrogation concernant le développement soutenable doivent prendre appui sur le cycle complet de vie d'un produit ou d'un ensemble constitué de produits. Il est aussi admis aussi que les études, les évaluations et les analyses sont contraintes à un temps long. Ce temps long est imposé par l'échelle de temps associé à l'environnement et ses affectations par les activités d'origine anthropique. Les ordres de grandeur se situent entre quelques décennies et le millénaire. Or les évaluations économiques par exemple souffrent d'une échelle relativement courte. L'ordre de grandeur parfaitement assumée atteint difficilement celui des amortissements comptables les plus longs, soit 30 ans. L'échelle de temps, de 100 ans, proposée par la norme ISO 15686 est courageuse. Pour être assumée par les économistes, il sera nécessaire de prendre de grandes précautions. L'exercice est difficile mais ne pas l'affronter serait irresponsable. Le développement soutenable s'inscrit dans la durée car il interpelle la solidarité intergénérationnelle et perçoit le risque de conséquence des actes contemporains et passés comme irréversibles.

I.2.3. Les indicateurs et les données du développement soutenable

Les interactions des piliers du développement soutenable ayant été développées précédemment, l'objet de cette section en est l'étude des indicateurs et des données.

A Les indicateurs et les indices

Dans ce paragraphe, les indicateurs et indices sont définis au sens de J-M. Boulanger (J-M. Boulanger, 2004). Ainsi, un indicateur est une variable observable utilisée pour rendre compte de l'état d'une réalité non observable. Par exemple, il peut s'agir de la quantité de gaz à effet de serre émis par la fabrication d'un produit, l'unité sera le kg de CO₂. Un indice désigne un indicateur synthétique construit en agrégeant des indicateurs dits de base. Par exemple, il s'agit de l'agrégation de différents indicateurs d'un pays tels que le taux de scolarisation, d'assurés sociaux, d'espérance, ..., qui permet de réaliser des comparaisons ou de surveiller l'évolution. Cette agrégation d'indicateurs non homogènes nécessite que soit

réalisé une approche multicritères permettant d'établir des conversions en unités homogènes sur la base d'importances relatives choisies.

A.1 Les indicateurs environnementaux

La liste des émissions polluantes des produits du secteur du bâtiment est précisée Cf

Tableau 11 ci-après. Elle a permis la mise en place d'évaluation des émissions des produits s'appuyant sur la norme : NF P01-010, elle même appuyée sur les normes ISO de la série 14040 d'analyse en cycle de vie (Life Cycle Impact Assessment). L'objectif est donc l'évaluation en cycle de vie complet, des émissions des produits du secteur du bâtiment.

La liste des émissions à évaluer est présentée dans le tableau ci-dessous :

Consommation de ressources naturelles non énergétiques
Antimoine (Sb), Argent (Ag), Argile, Arsenic (As), Bauxite (Al ₂ O ₃), Bentonite, Bismuth (Bi), Bore (B), Cadmium (Cd), Calcaire, Carbonate de Sodium(Na ₂ CO ₃), Chlorure de Potassium(KCl), Chlorure de Sodium(NaCl), Chrome (Cr), Cobalt (Co), Cuivre (Cu), Dolomie, Etain (Sn), Feldspath, Fer (Fe), Fluorite (CaF ₂), Gravier, Lithium (Li) Kaolin (Al ₂ O ₃ , 2SiO ₂ , 2H ₂ O), Magnésium (Mg), Manganèse (Mn), Mercure (Hg) Molybdène (Mo), Nickel (Ni), Or (Au), Palladium (Pd), Platine (Pt), Plomb (Pb), Rhodium (Rh), Rutile (TiO ₂), Sable, Silice (SiO ₂), Soufre (S), Sulfate de Baryum (BaSO ₄), Titane (Ti), Tungstène (W), Vanadium (V), Zinc (Zn), Zirconium (Zr),
Emissions dans l'air
Gaz à effet de serre et d'acidification : Oxydes d'Azote (NO _x en NO ₂) Gaz à effet de serre : Dioxyde de Carbone(CO ₂), Méthane (CH ₄) , , Hydrofluorocarbures – HFC, Perfluorocarbures (PFC), Hexafluorure de soufre – SF ₆ Gaz à effet d'acidification : Dioxyde de soufre Gaz à effet d'eutrophisation : Ammoniaque (NH ₃) Hydrocarbures, Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), Composés organiques volatils (COV), , Monoxyde de Carbone (CO), Protoxyde d'Azote (N ₂ O), , Oxydes de Soufre, Hydrogène Sulfureux, Acide Cyanhydrique, Composés chlorés organiques, Composés chlorés inorganiques, Composés chlorés non spécifiés, Composés fluorés organiques , Composés fluorés inorganiques, Composés halogénés, Composés fluorés non spécifiés , Cadmium et ses composés , Chrome et ses composés, Cobalt et ses composés, Cuivre, Etain et ses composés, Manganèse, Mercure, Nickel et ses composés, Plomb et ses composés, Sélénium, Tellure Zinc , Vanadium Silicium.
Emissions dans l'eau
DCO (Demande Chimique en Oxygène), DBO ₅ (Demande Biochimique en Oxygène à 5 jours), Matière en Suspension (MES) AOX (Halogènes des composés organiques adsorbables) , Hydrocarbures, Composés phosphorés

Tableau 11 : Liste des émissions polluantes

A ces émissions, il faut ajouter l'évaluation de consommation en eau et l'inventaire des matières recyclées.

Concernant l'**épuiement des ressources naturelles**, l'indice utilisé est le Abiotic Depletion Potential (ADP). Cet indicateur tient compte des consommations de ressources énergétiques et non énergétiques (excepté l'eau) en pondérant chaque ressource par un coefficient correspondant à un indice de rareté (l'antimoine a une valeur de 1 par convention) (Clift, 2003). Dans les FDES, une valeur supérieure à 1 pour l'UF d'un produit, indique que l'on consomme une ressource plus rare que l'antimoine. Les ressources dont la valeur de l'indicateur est très faible (inférieure à 0,001) sont considérées comme non épuisables à l'échelle humaine. Ce principe est énoncé dans la norme NF P01-010.

La formule de calcul de l'épuiement des ressources naturelle est la suivante (G. Habert et al, 2010):

$$ADP_i = \frac{DR_i}{(R_i)^2} \times \frac{(R_{Sb})^2}{DR_{Sb}}$$

Avec DR_i taux d'extraction (kg/année) de la ressource i
 DR_{sb} le taux d'extraction de l'antimoine égale à $6.06 \cdot 10^7$ kg/année
 et R_i stock de la ressource i en kg
 R_{Sb} égal à $4,63 \cdot 10^{15}$ stock ressources naturelles d'antimoine (Sb) (Guinée, 2002).

Par exemple : Stock maximum de ciment en France $R_{ciment} = 2,49 \cdot 10^{12}$ kg
 $DR_{ciment} = 2,48 \cdot 10^{10}$ kg/an

$$ADP_{ciment} = (2,48 \cdot 10^{10} / ((2,49 \cdot 10^{12})^2)) * ((4,63 \cdot 10^{15})^2) / 6,06 \cdot 10^7 = 1,41 \cdot 10^9 \text{ kg eq Sb}$$

En conclusion de cet exemple, Le calcul réalisé pour une UF, est bien inférieur à 1. Ces résultats présente le ciment comme très faiblement épuisable. Néanmoins, des discussions et des oppositions peuvent apparaître sur les ressources disponibles dans la mesure où les taux d'extraction et les ressources sont localisées.

La recherche d'un indice qui intègre les différents indicateurs environnementaux

Concernant la constitution d'un indice globalisant les impacts environnementaux, des travaux ont été réalisés. La logique en est schématisée dans la figure ci-après fournie par M. Oberg (Oberg, 2005).

Eléments Catégories d'impacts Evaluation

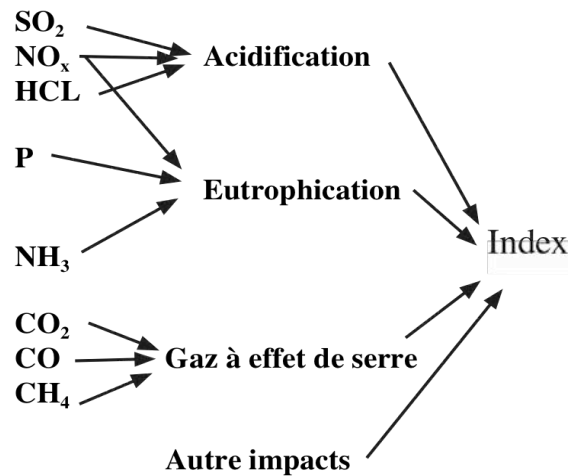


Figure 5 : Schéma de constitution d'un indice d'impact environnemental (Oberger, 2005)

La difficulté ensuite réside dans le choix des impacts relatifs. Sur la base du schéma précédent, des propositions de constitution d'indices ont été réalisées comme illustré dans le tableau suivant :

Système	Unité	Emission dans l'air			Energie utilisée	
		CO ₂	NO _x	SO ₂	Fossile	Electricité
SIKA ¹⁰	Euro	0,088	6,8	2,3		
EPS ¹¹	ELU	0,108	2,1	3,3	0,0094	0,0009
ET ¹²	-	36,5	3970	3770	2,94	2,78

Tableau 12 : Propositions de clés de répartition d'impacts (Oberger, 2005)

L'analyse rapide des propositions de répartitions des impacts laisse appréhender la difficulté d'un consensus. Par exemple, des oppositions apparaissent clairement dans les proportions des composés azotés et le dioxyde de soufre dans les systèmes SIKA et EPS. De plus seuls certains impacts sont pris en compte, il s'agit de l'impact dans l'air et des énergies utilisées. Par exemple, des impacts tels que les émissions dans l'eau ou l'épuisement des ressources sont omis. Une intégration de l'ensemble des impacts, nécessiterait un consensus sur ces facteurs d'impacts, leurs conséquences et l'importance de leur impact relatif.

En résumé, concernant les indicateurs environnementaux, il n'y a pas de consensus sur la constitution d'un indice. L'absence de consensus ne porte pas sur les indicateurs d'impacts à prendre en compte mais sur la relativité des impacts entre eux. L'agrégation des indicateurs n'a pas abouti et, de fait, la production d'un indice consensuel n'est pas réalisée.

¹⁰ SIKA (2002)
¹¹ EPS 2000 (Stenn,1999)
¹² Baumann et Tillmann, 2004)

A.2. Les indicateurs économiques

Les statistiques économiques générales du secteur sont disponibles auprès de l'INSEE. On y trouve le PIB, son évolution, le PIB par région. L'organisme statistique fournit la série d'évolution des prix de la construction.

A l'échelle du bâtiment, le coût global et coût global étendu sont le résultat d'une démarche pertinente rentrant pleinement dans le cadre des analyses « Coûts-Avantages ». Ils font l'objet d'une méthode de développement résultant d'un travail long et précis (Cf. LIFETIME). La méthode établie et décrite se nomme Life Cycle Cost (LCC). Néanmoins, la difficulté résulte de la comparaison de sommes attachées à des périodes différentes qui imposent l'intégration de la notion d'actualisation. L'actualisation est l'opération par laquelle on substitue la valeur actuelle équivalente d'une somme d'argent à une valeur future.

On a

$$V_0 = V_n / (1+r)^n$$

Avec V_0 , la valeur actuelle de la somme V_n
 r , le taux d'actualisation,
 n , le nombre de périodes séparant 0 de n

Par exemple : si $V_n = 100000\text{€}$, $r = 4\%$, $n = 30$ ans, on a $V_0 = 30832\text{€}$

La démarche patrimoniale économique

Parallèlement à la démarche des coûts et coût global, une autre approche peut-être envisagée dans l'optique de la comparaison économique des choix de solutions techniques. Il s'agit de la démarche patrimoniale. Celle-ci permet de fixer la valeur d'un bien à une date à partir de sa valeur à une date donnée. La théorie financière expose que la valeur d'un actif à une date t est la valeur actualisée des recettes ultérieures :

$$P_t = \sum_{n=0}^{n=N} X_{t+n} / (1+r)^n + P_{t+N} / (1+r)^N$$

P_t est le prix de l'actif à la date t ,
 X_{t+n} , le revenu escompté pour la période $t + n$,
 r , le taux d'actualisation,
 N , l'horizon retenu,
 P_{t+N} , le prix de revente escompté à la date $t + N$.

Si N est infini, on a :

$$P_t = \sum_{n=0}^{n=N} X_{t+n} / (1+r)^n$$

Ce prix est ce qu'on appelle la valeur fondamentale d'un actif.

Application numérique : si nous avons un bien qui rapporte de rapporte 10000 par an pendant 30 ans et que ces revenus sont actualisés à 4%, la valeur du bien est égale à $V_0 = 324339\text{€}$

Comparaison financière de différentes solutions

La différence économique de deux solutions techniques sur une durée revient à comparer les résultats de la fonction

$$D = \sum_{t=0}^{t=N} \left(\frac{(Bénéfices_{i,t} - Coûts_{i,t}) - (Bénéfices_{j,t} - Coûts_{j,t})}{(1+r)^t} \right)$$

Avec D, la différence en euro du coût entre les solutions i et j,
 i et j les solutions,
 r le taux d'actualisation,
 t la période
 et N, l'horizon retenu,

Les externalités :

Concernant les externalités, un ensemble d'indicateurs représentatifs des dommages est analysé. Il s'agit des émissions provoquant l'acidification, l'eutrophisation, pollution photochimique, l'accroissement de l'effet de serre. Les indices des métaux lourds et des polluants organiques persistant ne semblent pas avoir fait l'objet d'étude. Eshet réalise en 2006 la synthèse des travaux et établit une moyenne des coûts déterminés dans la littérature (Eshet, 2006). Ces impacts pour la collectivité sont aussi évalués par Vogtländer (Vogtländer et al, 2000).

	Vogtländer (2000)	Eshet (2003)
SO _x équivalent pour acidification	6.40 Euro/kg	5,383 \$ US /kg
PO ₄ équivalent pour eutrophication	3.05 Euro/kg	-
VOC équivalent pour le brouillard d'été(revised in 2002)	3.00 Euro/kg	1,262 \$ US /kg
PM10 pour le brouillard d'hiver	12.3 Euro/kg	36,156 US\$/kg
Zn équivalent pour les métaux lourds	680 Euro/kg	-
CO ₂ équivalent pour GES.	114 Euro/1000 kg	238 \$ US /1000kg

Tableau 13 : évaluation des coûts d'impacts environnementaux

En résumé, les indicateurs économiques sont :

- l'investissement
- le coût global au sens de la norme ISO 15686 ;
- la décomposition des coûts matières, de l'énergie, des matériels, des structures, des charges sociales et des marges ;

- la valeur patrimoniale ;
- la différence Bénéfices/Coûts ou Economies/coût ;
- les externalités lorsqu'elles sont valorisées.

A.3. Les indicateurs socio-culturels

Les indicateurs d'évaluation de l'approche sociale semblent variés et non homogènes en comparaison des approches économiques et environnementales. En dehors de quelques évaluations quantitatives, lié au confort ou à la santé, un nombre important d'analyse sont qualitatives. La variété des aspects de l'approche sociale explique la difficulté d'une approche globale.

Au niveau national et à l'échelle de la ville, en 2001, l'Institut Français de l'Environnement (IFEN) a proposé un certain nombre d'indicateurs pour l'évaluation du développement soutenable dans le projet urbain (IFEN, 2001). Ce travail a été suivi en 2002, dans le prolongement du Sommet de Rio, d'un travail de fond visant à proposer un ensemble d'indicateurs. Certains indicateurs concernent le bâtiment.

L'IFEN propose donc une série d'indicateurs concernant la gestion patrimoniale dont des indicateurs évaluant le patrimoine bâti et le patrimoine culturel. *« Il s'agira d'évaluer le patrimoine immobilier de la société, à la fois les logements, les infrastructures et les bâtiments industriels, mais aussi les éléments du patrimoine culturel. Outre l'état général de ce patrimoine, les dépenses engagées pour sa conservation doivent être présentées. « Il s'agit notamment des dépenses de réhabilitation, d'amélioration et d'entretien des logements, ... »*

Concernant les bâtiments de logements, les indicateurs retenus par l'IFEN sont :

- âge moyen du parc de logement ;
- dépenses de réhabilitation et d'entretien des logements ;
- nombre de logements insalubres / variation du parc en volume;
- estimation de la valeur du parc de logement ;
- âge moyen des bâtiments publics (hôpitaux, écoles, prisons,...) ;
- dépenses de réhabilitation et d'entretien des bâtiments publics

A ces propositions, il est possible d'ajouter les propositions du programme d'étude HQE²R (HQE²R, 2000). En réhabilitation, sur la base de la démarche HQE, ce programme propose :

- la prise en compte du point de vue des habitants, avec la nécessité d'une plus grande concertation ;
- le croisement des points de vue des techniciens (architecte, entreprise,...) des gestionnaires (bailleurs) et des habitants ;
- l'intervention des collectivités locales pour l'intégration du quartier dans la ville ;
- le rôle important de la première cible du programme HQE, voire son élargissement : la relation harmonieuse des bâtiments avec leur voisinage ou dans le quartier ;
- le maintien des autres cibles avec un poids accru pour les cibles de gestion et de maintenance.
- la surface moyenne des habitations associées à la densité humaine ;
- les catégories de logements en fonction de leurs équipements sanitaires ;
- l'isolation thermique ;
- une évaluation statistique des bâtiments attaqués par les xylophages, présentant des équipements ou peintures contenant du plomb ou encore de l'amiante.

Aucun indicateur ou analyse reproductible ne paraît permettre d'évaluer l'impact de la démolition sur l'aspect social.

La fin de vie d'un bâtiment est inéluctable et son impact doit être pris en compte. Nous allons ici lister les impacts directs potentiels et tout particulièrement ceux liés à la fréquence de démolition. Il s'agit de :

- impacts sociaux d'une déconstruction/reconstruction urbaine ou réhabilitation ;
- perte d'usage temporaire ;
- gêne de circulation piétonne et automobile ;
- impact des déchets de déconstruction et de chantier ;
- poussières, pollution de l'air, pollution de l'eau, nuisances sonores ;
- dégradation esthétique temporaire ;
- décomposition urbaine momentanée ;
- plus ou moins value à la reconstruction.

La norme ISO 21929 – développement durable dans la construction, en cours d'élaboration (proposée à la publication en juin 2012), donne une définition des indicateurs sociaux dans le bâtiment. Pour cette norme, se rapportent aux aspects sociaux, les indicateurs permettant l'évaluation des valeurs culturelles, la satisfaction, l'équité et la santé. Au niveau du bâtiment, l'aspect social comprend donc la qualité, la sécurité, les conditions intérieures, l'aptitude à l'usage, l'accessibilité, l'accès aux services essentiels, la qualité esthétique et la protection du patrimoine culturel. Néanmoins, aucun des indicateurs proposés n'est sensible à la durée de vie.

Dans une approche culturelle, les indicateurs existants se réduisent à des grilles d'analyse. Bien qu'ils détaillent les aspects qualitatifs des bâtiments avec beaucoup de précisions et d'intérêts, leurs manipulations nécessitent de grandes précautions si l'on désire les utiliser dans le cadre de comparaison en termes de développement soutenable. A ces difficultés, il faut ajouter les difficultés d'évaluation des impacts sur la durée de vie.

A.4 Les indicateurs et indices à l'intersection des piliers

Les indices du développement soutenable se limitent souvent à un pilier. L'économique, le social et l'environnemental sont considérés comme des « domaines » séparés. Par ailleurs, la notion de développement n'y est, en général, pas analysée.

La volonté d'établir des indices de développement humain fait parfois l'objet de critique : « Il était vain, prétentieux et légèrement ridicule de vouloir résumer en un seul chiffre le développement humain dans toute la complexité de ses multiples dimensions... » (Baneth, 1998, p23).

A l'échelle nationale, de nouveaux indicateurs sont proposés afin de mieux prendre en compte les effets de l'économie sur l'individu et tout particulièrement sur son bien-être. (Boulanger, 2004). Jean Gadrey a longuement développé la difficulté d'établir des indicateurs ou des indices fiables. Néanmoins, demandé par le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) et publiés par l'OCDE, la liste d'indicateurs est longue et ne saurait être exhaustive. Il s'agit des IDH, ISEW, GPI, MDP, IBEED,... Les définitions, intérêts et limites des principaux indicateurs sont explicités en Annexe 4.

Ces indicateurs ont pour qualité de dépasser le simple PIB mais tous font l'objet de critiques ouvertes. P-M Boulanger rappelle qu'ils sont restés relativement confidentiels et n'ont pas trouvé la légitimité indispensable à une éventuelle institutionnalisation. La mésentente se situe au niveau des indicateurs synthétiques toujours très contestés par les scientifiques. (P-M Boulanger, 2004).

Enfin d'autres indicateurs permettent l'évaluation de l'opposition entre croissance et progrès technique tel que :

- **CO₂/PIB** : permet d'évaluer l'impact gaz à effet de serre rapporté à la création de richesse. Cet indicateur est utilisable à différentes échelles, il permet les comparaisons et permet de mesurer l'évolution.

- **Energie consommée/PIB** : permet d'évaluer la consommation d'énergie nécessaire à la création de richesse. Cet indicateur est utilisable à différentes échelles, il permet les comparaisons et permet de mesurer l'évolution.

A l'échelle du bâtiment, les indicateurs suivant peuvent être utilisés :

- **Investissement initial/GES**

Cette étude envisagée sur la base de l'étude de la corrélation permettrait d'établir la présence ou l'absence de prix dissuasifs de solutions dommageables. Cet objectif nécessiterait qu'il soit envisagé l'existence de prix psychologiques au sens de la mercatique.

- **Coût global¹³/GES**

Une corrélation positive présenterait l'existence du « double dividende ». C'est à dire qu'une solution technique moins onéreuse aurait un impact sur le climat plus faible. Une corrélation négative impliquerait qu'il soit étudié le surcoût d'une moindre pollution.

- **Coût global et Coût global partagé¹⁴**

Les nuisances des produits ayant été quantifiées et les évaluations économiques ayant été proposées, il peut être envisagé d'évaluer ces externalités. Néanmoins, rappelons que ces valeurs économiques semblent manquer de précisions et font l'objet de critiques. L'évaluation des coûts des GES, impact le plus étudié, n'a pas emporté de consensus.

- **Coût des produits/épuisement des ressources**

L'existence d'une corrélation mettrait en évidence la présence ou l'absence d'un lien entre prix et disponibilité.

¹³ Le coût global et coût global partagé sont ceux tels que définis par la norme IOS 15686-5. Le coût global élémentaire, qui fait référence à l'ensemble des coûts/bénéfices immobiliers portés par le propriétaire et l'utilisateur,

¹⁴ Le coût global partagé se situe à l'échelle sociétale. Il tient compte des externalités et de l'impact d'un bâtiment sur son environnement.

Les indices généraux

A l'échelle du bâtiment, seul le coût global partagé, associant coûts individuels et impact sur la société, constitue un indice au sens de Boulanger (Boulanger, 2004). Cependant, il est rarement obtenu de résultat car les difficultés, développées auparavant, sont nombreuses. Pour les autres domaines, il n'existe pas de véritable indice agrégeant des indicateurs dans une approche globale de développement soutenable.

Conclusion

Les indicateurs et les évaluations réalisées au travers de ces indicateurs n'ont pas le même degré de maturité selon qu'il s'agit des domaines économique, environnemental social ou culturel. Dans le cadre de comparaison de solutions techniques en termes de développement soutenable, les indicateurs permettant les évaluations sont essentiellement monovalents et au mieux bivalents. Il n'existe aucun indice intégrateur évaluant les performances dans les trois piliers du développement soutenable simultanément. La question de l'évaluation dans le temps est de fait inexistante.

B. Les caractéristiques des données et les sources de données

Evaluer des performances et simuler des comportements, impliquent l'utilisation de données.

B.1 Les données concernant l'environnement

Concernant les indices environnementaux des produits utilisés dans le bâtiment, quelques organismes ont entrepris la constitution de bases. Les plus sérieuses et connues publient les protocoles précis de leur élaboration. Ces bases sont répertoriées et succinctement analysées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 14 : Base de données de développement soutenable

	Secteurs	Nature et Spécialités	Qualités	Défauts
<p>ECOINVENT-KBOB Suisse www.ecoinvent.org</p>	Tous	<p>Base de données co-gérée par organismes publics</p> <p>Base de données environnementale de matériaux et systèmes pour le Bâtiment</p>	<p>- Outil d'information très complet d'inventaire en cycle de vie, données de réchauffement climatique, acidification, énergie primaire, renouvelable, non renouvelable, eutrophisation</p> <p>- Facilite les déclarations environnementales des produits, les analyses en cycle de vie, la gestion en cycle de vie et la conception pour le respect de l'environnement</p> <p>Très souvent utilisée dans les outils d'évaluation.</p>	Coût de la licence élevée
<p>KBOB Suisse www.bbl.admin.ch</p>	Bâtiment	<p>Conférence de coordination des services de la construction et des immeubles des maîtres d'ouvrage publics KBOB Impacts environnementaux</p>	<p>Base de données qui établit pour les éléments constituant le bâtiment les consommations d'énergie primaire et les émissions de GES des solutions retenues.</p> <p>Evaluation basée sur les données ECOINVENT</p> <p>Gratuite</p>	- Ne fournit pas des informations que pour l'énergie primaire et GES
<p>« Baubook » Autriche www.baubook.at/zenitrale</p>	Matériaux et système de bâtiment	Energie		- Source de données et protocole difficile à obtenir
<p>« ELCD Database » EU http://lct.jrc.ec.europa.eu</p>	Tous	<p>Base de données co-gérée par organismes publics et professionnels</p> <p>Impacts environnementaux</p>	<p>- Volonté d'harmoniser les valeurs d'indices des impacts environnementaux des produits à l'échelle de l'Europe</p> <p>- Base gratuite</p>	<p>- Base en cours d'élaboration très peu documentée</p> <p>- Les données proviennent des associations professionnelles dont le contrôle semble difficile à mettre en place</p> <p>- Va être confrontée à l'opposition d'approche sur les matériaux à base de bois</p>

	Secteurs	Nature et Spécialités	Qualités	Défauts
<p>INIES France www.inies.fr</p>	Bâtiment	<p>Base de données co-gérée par organismes publics et professionnels</p> <p>Impacts environnementaux et sanitaires</p>	<p>S'appuie sur des produits industriels disponibles</p> <p>Information gratuite</p> <p>Basée sur les normes NF P01-010 elle-même établie sur la série ISO 14040 pour des évaluation des inventaires en cycle de vie et ISO 14020 pour l'étiquetage environnementale des produits.</p> <p>Fournit les données de réchauffement climatique, acidification, énergie primaire, renouvelable, non renouvelable, eutrophisation</p> <p>Fonctionnement sur la base d'un protocole précis entre des organismes publics et professionnels sous la coupe du ministère</p>	<p>La participation de l'industriel producteur laisse un doute sur l'objectivité des informations.</p>
<p>ICE-UK www.bath.ac.uk/mec/h-eng/sert/embodied/</p>	Bâtiment	Energie procédé et GES	<p>Compile les informations à l'échelle internationale d'un grand nombre de sources tels que celles des organismes publics ou d'entreprises privées</p> <p>Réalisée au sein de l'Université of Bath</p>	<p>Difficulté d'analyse du contrôle et de l'objectivité des données</p>
<p>IBO Autriche www.ibo.at</p>	Bâtiment	<p>Société à but non lucratif</p> <p>Impacts environnementaux</p>	<p>- Fournit les données de réchauffement climatique, acidification, énergie primaire, renouvelable, non renouvelable, eutrophisation, Index écologiques</p>	<p>Données basées sur la déclaration des constructeurs avec test de vérification</p>

Pour les données environnementales, il est admis par toutes les bases, la nécessité de fournir des valeurs établies sur le cycle complet de vie au sens de la norme ISO 14040. Il est aussi important de posséder les valeurs d'émissions pour chacune des phases du cycle de vie.

B.2 Les données économiques

Les bases de données fournissant des valeurs de prix sont rares. Les raisons en sont que d'une part les prix des produits sont librement fixés, d'autre part, les valeurs des données économiques sont souvent attachées au marché local et à un instant donné. Il est donc relativement difficile de mettre en place une organisation susceptible de fournir une information fiable. Pour cette raison et afin de pouvoir tirer des conclusions, il est préférable d'exploiter des valeurs moyennes et statistiques.

La publication de données économiques de coût des travaux, basées sur une valeur moyenne du marché français est fournie dans « *Batiprix - Le coût des travaux de bâtiment* » Ed Le Moniteur. Il n'existe pas à ce jour d'autres bases de données. Les indications fournies sont de plusieurs ordres. Elles comprennent, entre autres, des durées indicatives de prestations. Ces durées sont établies grâce à un consensus obtenu lors d'échange entre conducteurs de travaux recrutés par l'organisme et des bureaux d'études partenaires. Les prix des fournitures sont retenus sur la base d'une moyenne de tarifs contenus dans les catalogues de fournisseurs. Enfin, il est mentionné la nécessité d'y ajouter les charges de structures et les marges bénéficiaires. Il est bien précisé la nécessité d'adapter ces informations statistiques à chaque spécificité des situations de chantier et d'entreprise.

Concernant la valorisation des externalités, et considérant le caractère difficile de l'approche, les sources de données sont peu nombreuses. En dehors d'un prix du carbone officiellement établi, mais très variable dans le temps, peu d'informations sont disponibles. Les études les plus complètes sont celles de T. Eshet (Eshet et al, 2006) et Vogtländer (Vogtländer et al, 2000). Ces travaux ont permis la production du

Tableau 13 p 63. Les écarts importants des valorisations des impacts engendrent des incertitudes sur la fiabilité des données.

B.3 Les données sociales et culturelles

L'absence d'indicateurs définis, précis et consensuels, tels qu'établis au sein des deux autres piliers environnemental et social, empêche la production de base de données. Les données, lorsqu'elles existent ne sont pas homogènes.

Ces deux domaines aux informations hétérogènes et éparses ne font donc l'objet d'aucune constitution de bases de données consensuelles.

Conclusion

Les domaines environnementaux et économiques sont documentés de manière précise. Les informations sont disponibles et accessibles. Les sources multiples pour les indices environnementaux impliquent la nécessité d'une analyse qualitative approfondie sur la base de critères établis. L'unique base de données concernant les coûts, *Batiprix - Le coût des travaux de bâtiment* » Ed Le Moniteur, est très précise. Bien que nationale, elle est reconnue par la plupart des experts.

Pour les aspects social et culturel, l'équivalent en termes de source de données n'existe pas. L'absence de consensus et la complexité de l'évaluation de domaines hétérogènes, aux limites qui s'entremêlent, n'ont pas permis la mise en place de bases de données universellement admises. L'analyse de la question de notre thèse imposera un traitement particulier pour cette approche.

I.2.4. Les outils de la performance de développement soutenable

A. Les normes et les guides

Suite à la prise de conscience de l'impact des activités anthropiques sur l'environnement et de manière plus générale sur le développement soutenable, le besoin d'outils d'aides à la décision s'est révélé. Ce paragraphe fait la synthèse des outils existants

A.1 Les normes

Les normes ISO, de la série 14040 - Management environnemental - Analyse en cycle de vie (ISO 14040, 1997) sont apparues à partir de 1997. Elles définissent les principes fondateurs des normes et des outils dont les objectifs visent les mesures d'impacts. Cette série de normes repose sur deux principes fondamentaux. Le premier est basé sur le fait qu'une évaluation n'a de sens que si elle prend en compte le cycle de vie entier. Ce principe, admis par tous les acteurs, a permis une avancée récente et certaine pour le développement des autres normes et outils d'évaluation. Le cycle de vie s'entend du « berceau au tombeau » pour tous les impacts liés à la production, à l'usage et à la déconstruction. Le second principe est celui du nécessaire inventaire des éléments d'impacts basé sur la notion de délimitation du système. Ce principe garantit l'exhaustivité des impacts.

A l'échelle du cadre méthodologique et général, la norme ISO 15392:2008 - développement durable dans la construction -- Principes généraux - précise l'application du concept d'état du développement soutenable dans les bâtiments. Il en reprend les trois principaux aspects, à savoir, l'environnement, l'économie et le social. Toujours à cette échelle, avec un objectif méthodologique, la norme ISO/TS 21929-1- développement durable dans la construction, fournit un cadre de référence commun qui doit permettre une meilleure prise en considération des performances des bâtiments en ce qui concerne le développement soutenable. Elle donne des recommandations et des lignes directrices pour la mise au point et la sélection d'indicateurs de développement soutenable appropriés pour le bâtiment. La norme ISO 21929-2 - Développement durable dans la construction - Indicateurs de développement durable - Partie 2: Cadre pour le développement d'indicateurs pour le génie civil est en cours d'élaboration ne sera publiée qu'en 2013.

A l'échelle du bâtiment, la norme ISO 21931-1 - Développement durable dans la construction -- Cadre méthodologique de l'évaluation de la performance environnementale des ouvrages de construction - Partie 1: Bâtiments, fournit un ensemble de critères et de principes de référence. Elle propose donc un cadre aux maîtres d'ouvrage et aux concepteurs qui doit leur permettre d'évaluer les performances de leurs projets.

La norme EN 15643-1, 2 :2010 - Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la contribution au développement durable des bâtiments - présente les principes généraux et les exigences pour l'évaluation des bâtiments

en termes de performances environnementales, sociales et économiques. Cette évaluation vise à quantifier la contribution au développement soutenable des ouvrages de construction. Elle précise à nouveau les définitions des éléments du principe notamment la très intéressante notion d'équivalent fonctionnel. Il est précisé que « *les comparaisons entre les résultats des évaluations des bâtiments ou systèmes assemblés (partie d'ouvrage), lors de la conception ou chaque fois que les résultats sont utilisés, doivent uniquement être effectuées en référence à l'équivalent fonctionnel du bâtiment. Cela nécessite que les principales exigences fonctionnelles soient décrites avec l'utilisation prévue et les exigences techniques spécifiques pertinentes. Cette description permet de déterminer l'équivalence fonctionnelle de différentes options et types de construction et sert de base à une comparaison transparente et raisonnable.* » Pour chacune des phases, les conditions d'une démarche de développement soutenable sont précisées. La norme EN 15643-3 - Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Evaluation des bâtiments - Partie 3 : cadre pour l'évaluation de la performance sociale est en cours de validation. Elle sera publiée en mars 2012.

Enfin, la norme NF P01-010 : 2004 Qualité environnementale des produits de construction - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction (NF P01-010, 2004) fixe la méthode à l'échelle des produits de construction. Elle établit un cadre précis d'indicateurs à quantifier concernant la production, mise en œuvre, usage et démolition des produits du bâtiment. Ce cadre a permis la mise en place des fiches déclaratives environnementales et sanitaires sur la base de l'inventaire des impacts, considérés sur l'entier cycle de vie, cette norme permet l'établissement de véritable carte d'identité environnementale et sanitaire des produits du bâtiment. Les principes d'établissement sont précisément décrits en Annexe 5. La norme ISO 21930 : 2007- Bâtiments et ouvrages construits - développement durable dans la construction - Déclaration environnementale des produits de construction reprend les principes de la norme NF P01-010 pour les produits de construction à l'échelle internationale.

A.2 Les référentiels

En France, la démarche de certification HQE a fait l'objet d'analyse détaillée (Hetzel, 2009). L'objectif des référentiels est de fixer un ensemble de règles communes permettant de guider les concepteurs et les maîtres d'ouvrage. La finalité peut être une certification. Les référentiels sont aussi des outils d'évaluation de performance et de diagnostic.

Les référentiels dans le domaine du bâtiment sont nombreux. Nous pouvons citer les principaux tels que HQE, LEED, BREEAM, CASBEE, ... L'analyse détaillée des principaux référentiels est présentée au sein de l'Annexe 1. La synthèse de cette analyse permet de montrer la superficialité de la prise en compte de la dimension économique, probablement liée à la difficulté de son établissement. Par ailleurs, la prise en compte de la durée de vie est rare. C'est récemment, dans sa version 2008, que le référentiel HQE pour la qualité environnementale des bâtiments, incite la prise en compte de l'adaptabilité sur les courtes, moyennes et longues durées de vie jusqu'à 100 ans. Pour les autres référentiels, lorsque cette dernière est prise en compte, elle varie de 30 à 90 ans.

B. L'analyse des outils d'évaluation de la performance

Les outils d'évaluation de la performance sont ceux qui participent à la catégorie des outils d'aide à la décision. Ils sont utilisables dans les phases avancées des projets de conception ou en phase de diagnostic dans l'existant. Ils permettent de quantifier des phénomènes et donc d'indiquer et comparer des performances de solutions. Les outils d'évaluation sont très nombreux. L'analyse exhaustive n'a pas été possible. Les outils les plus connus font l'objet d'une description précise en Annexe 2.

En 2002, un état de l'art réalisé par le groupe HQE₂R mentionnait l'extrême diversité des indicateurs au travers des outils existants. La conclusion est que la sélection d'indicateurs communs à l'ensemble de la communauté européenne n'est pas envisageable et qu'il faut une adaptation systématique des outils.

En 2006, suite à l'analyse précise des outils existant, B Ness conclut que les outils d'évaluation focalisent sur l'environnement (Ness, 2006). Il n'existe pas d'outils traitant l'aspect social ou économique en dehors de ceux qui traitent des coûts. Les indicateurs sont non intégrés et les évaluations concernent les échelles locales ou nationales. Par ailleurs, il ressort de leur analyse l'extrême simplification dans la prise en compte des durées de vie des produits ou des bâtiments évalués. Outre des durées de vie envisagées relativement courtes puisque la plus importante est de 80 ans, aucun de ces outils ne permet réellement d'évaluer l'impact de la durée de vie. Une autre observation permet d'insister sur la rareté de la prise en compte des indicateurs économiques.

Concernant l'état de l'art des outils d'évaluation des performances en termes de développement soutenable, Haapio en décrit précisément les conditions (Haapio et al., 2008). En résumé, le chercheur précise que la comparaison des outils est difficile voire impossible. Les outils concernent essentiellement l'évaluation environnementale. L'évaluation globale de la performance en termes de développement soutenable lui paraît inaccessible.

Concernant les outils d'aide à la gestion de patrimoine immobilier, seuls les modèles ASCOTT et APOGEE-PERIGEE, traitent des coûts globaux et de l'aspect économique dans le détail. L'outil d'aide à la décision BEES et le référentiel BREEAM évoquent sommairement l'actualisation. Il semble que pour ce dernier, aucun développement ne soit introduit quant aux causes et conséquences des choix de taux, ce qui laisse l'utilisateur à sa seule expertise. Les autres outils ne comprennent aucun module économique.

La synthèse de l'analyse de ces outils, permet deux conclusions. Tout d'abord, il n'existe pas d'outil d'évaluation intégré. Les évaluations sont essentiellement environnementales et, excepté la question des coûts, aucun outil ne traite des aspects sociaux et économiques. Ensuite, les échelles d'évaluation sont nationales ou locales. A l'échelle du bâtiment, les outils d'évaluation traitent des aspects thermiques ou environnementaux.

C. Les modèles proposés

En 2001, Voglander propose l' Eco-cost Value Ratio (EVR). Il s'agit d'un modèle dont l'objectif est l'optimisation de la conception sur la base de l'efficacité (Voglander, 2001). L'évaluation des coûts écologiques et la lutte contre ces coûts dans le cadre d'une réponse à un besoin fournissent, selon l'auteur, la démarche la plus efficace de l'approche en termes de développement soutenable. Il s'agit là d'une démarche liant économie et impacts environnementaux. Il a la particularité d'introduire la notion de coûts complets par la prise en compte des coûts des externalités. Ce modèle exploitable dans tous les secteurs propose donc d'établir un ratio $EVR = \text{Ecocosts}/\text{Value}$. L'Ecocost est la somme des coûts des émissions toxiques, de l'énergie, de la consommation de ressources, de la dépréciation des équipements et du travail humain. La valeur est celle du bien produit. Il s'agit d'un modèle d'efficacité. L'objectif est la prise en compte et la réduction des impacts environnementaux. La durée de vie est indirectement intégrée au travers de la valeur du bien.

Zhang a développé un modèle d'évaluation de la performance environnementale des bâtiments, BEPAS (Zhang, 2005). Après avoir listé et pondéré l'ensemble des impacts environnementaux d'un bâtiment, le modèle consiste à agréger ses impacts relatifs pour afficher un score. Ici aussi, la durée de vie pour l'évaluation est fixée *a priori*. Elle est de 50 ans.

Alwaer approfondit la prise en compte multicritères au travers de l'étude de répartition d'indices clés dans une approche d'évaluation de performances de développement soutenable. (Alwaer et al, 2009). Il n'est pas fait référence à une prise en compte de durée de vie dans la pertinence du choix des indicateurs.

N. Banaitiene présente une méthode d'évaluation multicritère en cycle de vie complet du bâtiment (Banaitiene et al, 2008). La méthode ne fait à aucun moment référence à l'impact que pourrait avoir la durée de vie du bâtiment, ni dans le choix des critères, ni dans les conséquences sur ces derniers.

I.2.5. L'analyse des travaux de recherche.

Les études des impacts environnementaux liées à la phase de production du logement, prenant en compte la durée de vie des bâtiments, semblent rares et toujours très partiels. Nous pouvons expliciter et analyser les travaux suivants.

C. Thormark a étudié l'impact énergétique associé aux choix de différents produits pour des maisons en bande sur une durée de 50 ans (Thormark, 2006). Elle a montré comment dans les bâtiments « basse énergie », l'« énergie procédée » prenait de l'importance. La part de l'énergie consommée à l'usage passe de 85-90% à 40-60% du total de l'énergie consommée. Le choix des produits et leur potentiel de recyclage deviennent prédominants en termes de performance. Pour le chercheur, l'énergie totale consommée dans les bâtiments « basse consommation » peut-être plus élevée que dans ceux ayant une consommation élevée. Le chercheur conclut sur la nécessité qu'a le concepteur de ne pas seulement travailler la performance à l'usage mais de choisir des produits facilement recyclables.

En 2007, F. Werner conclut sur la supériorité de performance de produits à base de bois comparés à d'autres produits, dans la mesure où ils sont utilisés de manière appropriée (Werner et al., 2007). Ces produits participent à la lutte contre les émissions de gaz à effet de

serre et produisent moins de déchets. Néanmoins, l'auteur met en garde sur les imprégnations qui peuvent engendrer des contre-performances. Il insiste particulièrement sur la nocivité des produits contenant des colles, des résines et des vernis. Concernant les durées de vie sur lesquelles sont réalisées les simulations, elles vont de 30 ans à 60 ans.

L. Gustavsson et R. Sathre ont comparé uniquement les solutions de bois et de béton pour estimer les émissions de CO₂ (Gustavsson et al., 2006). Ils concluent à l'intérêt réel des produits à base de bois. Notons que les durées de vie du bâtiment pour l'étude est fixe. Elle est de 100 ans.

B. Peuportier a réalisé une comparaison environnementale de trois maisons individuelles sur une durée de 80 ans tandis que les différences de consommation d'énergie à l'usage et durant les autres phases ne sont pas distinguées dans la comparaison (Peuportier, 2001). Les trois bâtiments comparés ne sont pas équivalents en termes de consommation d'énergie à l'usage. Les trois bâtiments n'ont pas non plus d'équivalence en termes de superficie.

T. Häkkinen a étudié les impacts environnementaux évalués sur le cycle complet d'une façade réalisée en bois en fonction du traitement. L'évaluation est réalisée sur une durée de 100 ans (Häkkinen, 1999).

Dans ces études, les durées de vie sont introduites comme une donnée fixe. Qu'il s'agisse d'études énergétiques, de gaz à effet de serre ou d'évaluation plus large d'impacts environnementaux, les durées de vie sont toujours inférieures à 100 ans et sont fixes. C'est la performance des solutions qui est évaluée. L'impact de la durée de vie n'a donc jamais été réellement approfondi en ce qui concerne ses impacts.

Concernant l'évaluation des performances en fonction de la durée de vie, les travaux sont rares. En 2005, P. Mora s'interroge sur l'importance de la durée de vie et des conséquences sur les performances en termes de développement soutenable des matériaux nouveaux pour lesquels nous manquons de recul. Il évoque les risques actuels de présenter une image dégradée de notre génération aux les générations futures en ce qui concerne la culture et la technique (Mora, 2005). P. Mora évoque sommairement l'impact de la durée de vie des bâtiments sur le développement soutenable. Il précise ainsi, schématiquement, qu'en faisant « *passer de 50 à 500 ans la durée de vie des bâtiments, réduit d'un facteur 10 les impacts environnementaux* ». Aussi, la rareté des matériaux recyclés est mentionnée. Enfin l'article distingue la durée des travaux et la durabilité des matériaux. Ces questions sont sommairement évoquées sans qu'il y ait de réponse approfondie. Enfin, il évoque la possibilité de bâtiments éphémères construits avec des matériaux permanents tandis que des bâtiments construits avec des matériaux plus éphémères peuvent être permanents si la maintenance et la réparation ont été prévues. Ici aussi, les propos ne sont pas argumentés. Cet article évoque des pistes intéressantes de principes. Cependant il ne fait état d'aucune démonstration quantitative ni même de grandeur d'échelle quant à l'impact de la durée de vie.

Les travaux les plus approfondis sont ceux de Haapio (Haapio et Al, 2008). Ces travaux montrent les impacts de différentes solutions techniques au cours du cycle de vie d'un bâtiment de logement selon qu'elles se situent à 60, 80, 100, 120 ou 160 ans. Les auteurs font varier successivement la durée de vie de différents isolants, éléments de mur, fenêtres et couvertures. Les évaluations sont réalisées pour différents impacts : énergie primaire, déchets, pollution de l'air, pollution de l'eau, changements climatiques, ressources naturelles. La

structure est conservée, seules les composants sont différents lors des comparaisons pour des durées différentes. Les évaluations de l'énergie « procédé » des différentes solutions techniques sont réalisées mais les différences de performances thermiques n'ont pas été prises en compte et neutralisées. Les différences de consommation de chauffage sont donc incluses dans les résultats. L'étude porte sur l'évolution des impacts lors de l'évolution du cycle de vie. L'étude ne porte donc pas sur l'impact de la durée de vie du bâtiment en réponse à un besoin fonctionnel. Les comparaisons sont réalisées sur la simple modification de durée de vie et non sur la réponse à un besoin d'une durée fixée. L'impact de la durée de vie n'est pris en compte que partiellement.

Conclusion

Il est admis la prise en compte nécessaire du cycle de vie complet des produits ou du bâtiment quel que soit le domaine évalué.

Il n'existe pas d'outil d'évaluation permettant de situer simultanément une solution technique en termes de développement soutenable. En effet, aucun indice n'intègre à la fois la performance économique environnementale et sociale. Les sources de données sont assez complètes en ce qui concerne les impacts environnementaux des produits du bâtiment. L'unique source des coûts et des prix est reconnue par l'ensemble des experts. Elle est précise et complète. La prise en compte de valeurs économiques sur des temps longs, sans être impossible, doit faire l'objet de grandes précautions. Si l'outil « d'homogénéisation » temporelle, à savoir l'actualisation, existe, son exploitation sur des temps longs est délicate. Quel que soit le taux choisi, il est critiquable. L'approche sociale et l'approche culturelle ne font pas l'objet d'outils d'analyse établis stables et exploitables dans le cadre de comparaison de solutions techniques évaluées sur une durée longue de vie. Les indicateurs exploitables sont donc les différents indicateurs environnementaux des produits et l'indicateur de coût global.

Concernant les liens et les facteurs d'impacts de la durée de vie du bâtiment ou de ces composants sur les performances de développement soutenable, aucune étude ne cherche à en mesurer précisément l'importance. Les durées d'évaluation sont toujours courtes, se situant à 50 ans et parfois jusqu'à 100 ans. Ces durées sont retenues comme paramètres fixes. De fait, l'impact de la valeur de la durée de vie n'est ni quantifiée ni analysée.

I.3. La gestion du projet architectural et le cycle de vie du « bâtiment ».

Afin de pouvoir exploiter les connaissances développées, il paraît nécessaire d'analyser les différentes phases qui composent le développement du projet. L'objectif est de préciser les étapes qui déterminent la durée de vie du projet, les étapes durant lesquelles la performance en termes de développement soutenable se réalise et enfin les acteurs potentiellement intéressés par l'information.

I.3.1. La gestion du projet architectural

A. Les traditionnelles étapes du projet

La gestion du projet architectural est assez proche de la démarche de projet de service. Le projet de service est lui même proche de la démarche des projets industriels importants.

Dans l'industrie, les bases de cette démarche avaient été explicitées dès les années 1960 et didactisées en 1992 (Rak, 1992). Le processus de gestion a été synthétisé et schématisé dans l'industrie (schéma ci-dessous).

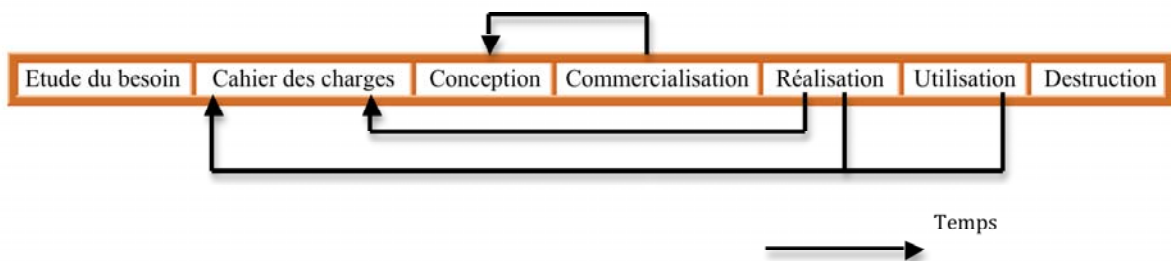


Figure 6 : Etapes du projet

Très souvent développés dans le cadre d'une approche de management de la qualité, les outils développés sur la base de ce découpage sont nombreux. Chacune des étapes a une fonction bien particulière.

L'étude des besoins : longtemps négligée, cette étape est primordiale dans une démarche de qualité. Le besoin est incontournable pour justifier l'existence du produit. C'est l'analyse du besoin qui permettra d'établir le contenu du cahier des charges. Ces dernières décennies, de manière croissante, quel que soit le besoin, il comprend la notion de maîtrise des impacts liés au cycle de vie complet de la réponse qui lui est faite.

La rédaction du cahier des charges : l'objectif est l'analyse fonctionnelle du besoin. L'outil utilisé est le F.A.S.T (Function Analysis System Technic) soit une technique d'analyse fonctionnelle et systématique (Wixson et al., 1999). Une fois identifiées, ces fonctions devront être caractérisées et hiérarchisées. Pour finir, l'ingénieur rédige la synthèse de la démarche soit le cahier des charges (NF X50-150).

La conception : cette étape consiste à trouver des solutions à chacune des fonctions établies à l'étape précédente. Le procédé consiste à réaliser dans un premier temps une pensée divergente. L'idée est d'analyser le maximum de solution. Dans un deuxième temps, la pensée devient convergente. Il s'agit, à l'aide d'outil d'aide à la décision, de choisir la solution la plus performante c'est-à-dire la plus adaptée et la moins coûteuse.

Une fois validées, les solutions sont « définies », c'est à dire précisées dans les moindres détails afin de pouvoir être réalisées.

La commercialisation : le développement de gros projets a amené l'industrie à chercher à le vendre avant de le réaliser. Cette chronologie permet de réduire les coûts aux coûts de conception que l'entreprise tentera de se faire indemniser si le projet n'est pas réalisé.

La réalisation : la production est organisée à l'aide des outils de gestion de production et réalisée sur la base d'un planning établi. Les fonctions de l'organisation sont l'ordonnancement, la gestion des stocks, le contrôle.

L'utilisation : pour permettre au client de se servir du produit, le fabricant met à sa disposition une notice d'utilisation qui comprend les spécifications d'usages et d'entretien aussi bien en termes d'entretien préventif que curatif. L'entreprise assure le suivi du produit au travers de son service après vente.

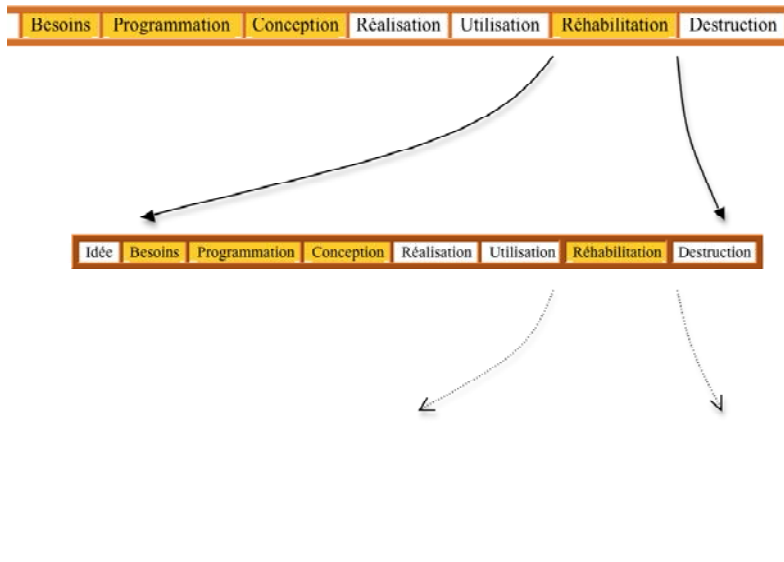
Déconstruction : cette phase inévitable doit faire l'objet d'une attention particulière lors des phases de rédaction du cahier des charges, de la phase de conception et bien entendu durant la phase elle-même.

Le projet architectural voit sa spécificité dans le fait que le concepteur s'apparente à l'entreprise de service, bureau d'études, dont la mission peut-être variable. Considérant une mission complète, les quatre étapes principales sont : PROGRAMMATION - CONCEPTION - REALISATION – UTILISATION. La démarche de projet architectural a été précisément décrite (Fernandez, 2007).

B. Les étapes de décisions stratégiques affectant la durée de vie et les performances de développement soutenable

Concernant les caractéristiques de performance en termes de durée de vie et de développement soutenable, les caractéristiques essentielles sont fixées dans les premières étapes du projet. C'est dans ces premières étapes que le concepteur a besoin d'informations et des outils d'aide à la décision (Adolphe, 1991).

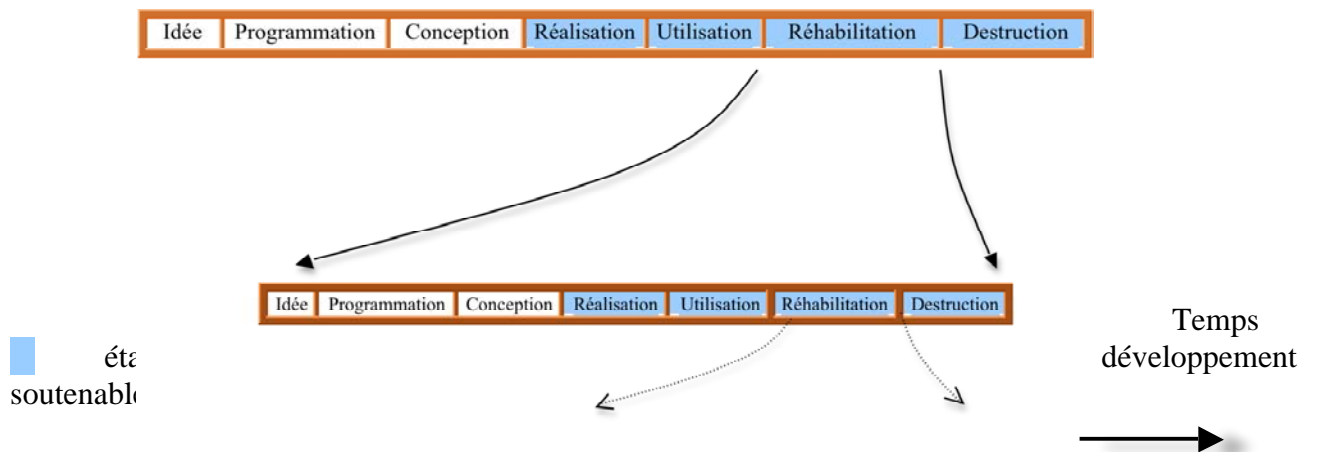
Le projet architectural voit une autre spécificité dans sa durée de vie longue parfois de plusieurs siècles. C'est dans les choix des étapes repérées ci-dessous que la durée de vie peut être envisagée.



■ étape de décision concernant la durée de vie et les performances de développement soutenable
Figure 7 : Schématisation de la démarche du projet

C. Les étapes impliquées dans la performance de développement soutenable

Bien qu'une grande part des performances en termes de développement soutenable soit inscrite dans les phases de programmation et de conception, les impacts environnementaux, sociaux et économiques se produisent dans les phases de réalisation, utilisation, réhabilitations éventuelles et destruction.



Conclusion

Pour la prise en compte de la durée de vie du bâtiment, avec pour objectif l'efficacité en termes de développement soutenable, les décisions se prennent dans les phases de PROGRAMMATION et CONCEPTION. La décision éventuelle de REHABILITATION permet, elle aussi, d'allonger la durée de vie. Les étapes concernées par la production des impacts sont celles de la REALISATION, de l'UTILISATION et la DESTRUCTION. Les cibles concernées par la production des impacts sont les entreprises du bâtiment et les usagers et les tierces personnes.

Les informations intéressent donc les maîtres d'ouvrage, concepteurs et pouvoirs politiques.

I.3.2. La nature et les caractéristiques du projet architectural

A. Le type de production

Lorsque le « bâtiment » se rapproche d'une production de type industriel, les outils disponibles de fabrication, de contrôle, d'évaluation et d'optimisation de l'industrie peuvent être mis en œuvre.

Lorsque le bâtiment est une production adaptée à son environnement, à son propriétaire et/ou usager, fabriqué par des petites entreprises, il s'apparentera à une production de type artisanal et mobilise davantage les outils de ce type de production.

B. La durée du cycle de vie complet du produit

Une comparaison de la production des bâtiments et des produits industriels et commerciaux en général, met en évidence une durée de vie très différente des produits. Les durées de vie du bâtiment, de quelques dizaines d'années au plus court à plusieurs centaines d'années, caractérisent ce produit comme l'un des plus durables parmi les objets fabriqués. Ce constat révèle un cycle long de vie et une courbe d'expérience¹⁵ de ce dernier à faible croissance. Plus la durée de vie d'un produit est longue, plus la mesure de son comportement et de son impact réel, évalué sur le cycle complet de vie, est difficile. Lors d'une décision dans les phases de conception, production ou maintenance, l'évaluation de son impact est difficile car les effets produits par celle-ci se situent dans des temps toujours longs. Les interférences d'autres décisions ou de phénomènes extérieurs engendrent aussi des incertitudes. Les résultats de l'impact sont donc longs à obtenir et les conclusions difficiles à réaliser.

La norme ISO 9001:2008_ Systèmes de management de la qualité -- Exigences, ne peuvent que difficilement nous venir en aide pour la prise en compte de la durée de vie des bâtiments dans un processus de qualité. En effet, abordé en termes de processus complet, Cf. la figure ci-dessous, constitué des phases PDCA (Plan-Do-Check-Acte) et de l'amélioration continue (Deming, 1986), il apparaît que le tour de roue, censé permettre l'augmentation permanente de la qualité par effet « cliqué » sera long. La fréquence faible de reconstruction engendre longueur et rareté des boucles de régulation du schéma du cycle. Ces boucles de

¹⁵ Ici, il faut entendre par courbe d'expérience non pas celle de la fabrication du produit et de l'organisation de sa production mais celle des connaissances produites sur le cycle complet de vie du produit.

régulation sont pourtant, au travers des connaissances actuelles, à la base du processus d'amélioration continue de la qualité.

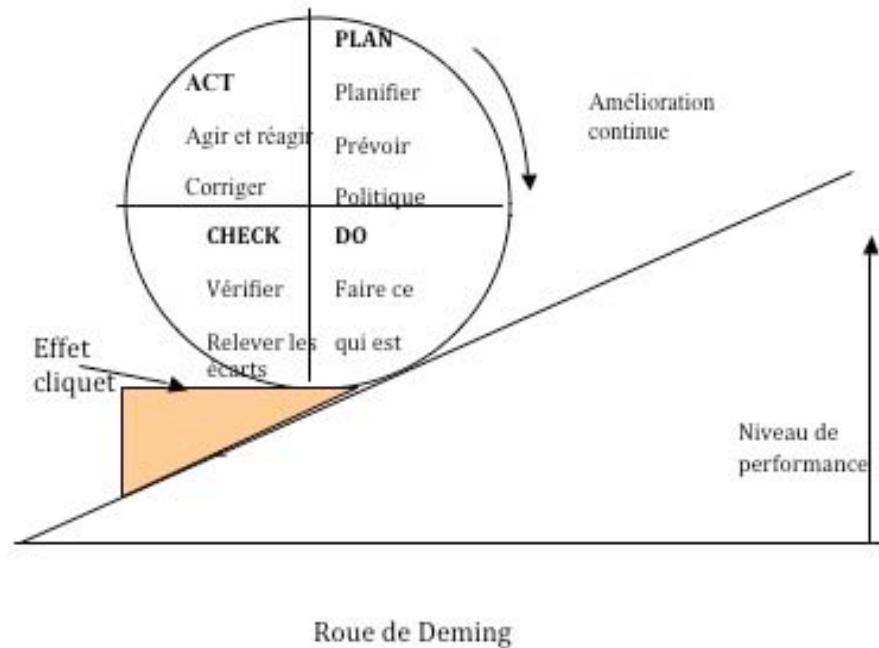


Figure 8 : Roue de Deming – 1986

I.3.3. Le « produit » bâtiment

Appréhender le bâtiment tel un produit, soit la réponse à un besoin, résultat d'un processus industriel et commercial, nécessite l'identification des caractéristiques communes et des spécificités.

A. Les caractéristiques communes et les caractéristiques spécifiques

Au travers d'une analyse fonctionnelle aux outils bien rodés et répondant à des besoins primaires et secondaires au sens de Maslow (Maslow, 1954), le bâtiment est bien un produit comme un autre. Il peut être le résultat d'une démarche de production industrielle, optimisant la réponse au mieux des stricts besoins du consommateur en utilisant un minimum de moyens. La production de masse et la production préfabriquée exploitent les outils et les process de l'industrie. Cependant, le bâtiment peut et doit endosser des fonctions qui dépassent ces fonctions utilitaristes. Le « produit » bâtiment peut comprendre des fonctions spécifiques telles que la fonction patrimoniale au sens économique et familial. C'est aussi au travers du message qu'il est censé contenir et porter, et des dimensions culturelles associées, assumées ou implicites, que le bâtiment se distingue des autres produits plus courants. Comme cela a été décrit dans le paragraphe B3 du sous-chapitre 1.2.1, la durée de vie joue aussi un rôle sur cette dernière fonction. Les autres fonctions et leurs impacts en termes de développement soutenable peuvent être évalués de la même manière que pour les produits de consommation courante.

B. L'adaptation des outils d'optimisation aux spécificités

Des outils spécifiques permettent une plus grande efficacité dans la réponse à un besoin. Il s'agit de l'analyse de la valeur et de l'efficacité.

B.1 L'analyse de la valeur

L'analyse de la valeur est une méthode d'optimisation économique mobilisée lors de la phase de conception qui vise à utiliser un minimum de moyens pour remplir les fonctions, en proportion de l'importance de celles-ci. L'importance de chacune des fonctions est mesurée lors de la phase d'élaboration du cahier des charges. Dans le cadre de l'optimisation, l'importance des fonctions du « produit » bâtiment peut être évaluée lors de la rédaction du programme et l'exercice de l'analyse de la valeur réalisé y compris pour la fonction patrimoniale économique. Seule la fonction « culturelle », variant avec le temps qui passe, n'est pas évaluable avec les outils de l'analyse de la valeur. Néanmoins, notons que l'analyse de la valeur utilisée pour les produits de consommation courante ne prend pas en compte la durée de vie. Ce paramètre, lorsqu'il est maîtrisé, est de la responsabilité autonome de l'entreprise

B.2 La recherche de l'amélioration : l'efficacité

Dans le bâtiment, la contribution au développement soutenable équivaut à l'amélioration de l'efficacité. L'efficacité est la recherche d'un compromis entre l'avantage tiré du produit répondant aux besoins et les inconvénients résultant de sa réalisation, de son utilisation et de sa destruction.

De manière générale, l'objectif est d'améliorer le rapport « Valeurs d'usage/Impacts » de toutes les fonctions et sous fonctions.

La recherche de l'efficacité s'applique à l'ensemble des caractéristiques du projet de construction. Néanmoins, ces efficacités s'apprécient à l'instant de la conception or il est nécessaire de les replacer dans une perspective temporelle, de les évaluer dans la durée et d'en analyser les dégradations et les coûts de maîtrise.

Conclusion

L'objectif de ce chapitre a été d'analyser quelles étapes et quels acteurs étaient concernés par les questions de durée de vie et par les performances en termes de développement soutenable. A quel moment la gestion du projet, la durée de vie du bâtiment et ses conséquences sur le développement soutenable doivent être pris en compte ? Il ressort de cette étude l'impérative nécessité d'une prise en compte en amont du projet. Les étapes de programmation et de conception sont les moments privilégiés pour ces considérations. L'analyse présente donc la nécessité de rédiger un cahier des charges permettant le développement d'un outil ou d'un module d'outil utilisable dans la phase de conception.

I.4 Synthèse et problématique retenue

I.4.1 Synthèse

La synthèse de ce premier chapitre permet de recadrer la problématique générale du départ.

Dans le domaine du bâtiment, il est aujourd'hui admis que toutes évaluations et toutes analyses doivent prendre en compte le cycle de vie complet des produits. Les normes et les outils d'évaluation d'impacts actuels visent une plus grande efficacité en termes de développement soutenable dans la réponse d'un besoin de bâtiment. Ils précisent une durée de vie à partir desquels les études peuvent être réalisées, les résultats déduits et les décisions prises. Cependant, la durée de vie d'un bâtiment n'est pas une donnée physique figée. Il s'agit d'une variable sur laquelle on peut agir. La plupart des travaux de recherche ayant évalué des comportements des bâtiments, sur un critère environnemental ou économique, a fixé la durée de vie d'évaluation. Par précaution, par volonté de maîtriser les résultats, de réduire les risques d'erreur et les critiques, les durées sont souvent limitées à quelques dizaines d'années. Il est vrai que dans des pays, le bâtiment, consommé comme un bien de consommation courante, est détruit rapidement. Les rares travaux réalisant des évaluations sur une durée variable s'attachent aux résultats mais n'analysent pas vraiment l'impact de la durée de vie sur les résultats. Ils comprennent les impacts de l'usage.

Dans son rapport au développement soutenable et dans le cadre d'une recherche d'efficacité, le bâtiment ne fait pas l'objet d'un ensemble de critères d'évaluation défini. Victime d'une trop récente prise de conscience, les facteurs à prendre en compte sont très nombreux. Il manque une hiérarchisation des critères à évaluer qui permettrait le développement d'études et la production de résultats quant aux performances. L'absence de maturité de la problématique de développement soutenable entraîne des études spécialisées en général réalisée sur un seul indicateur. Les résultats obtenus ne garantissent pas un comportement homogène de la réponse sur la notion globale ni même sur d'autres critères du développement soutenable. Les domaines de l'environnement et de l'économie sont cependant plus étudiés quelle que soit l'échelle envisagée. Les approches sociales ou culturelles n'ont pas l'homogénéité des précédents et non pas la même maturité de développement. Quel que soit le domaine d'approche, l'impact de la durée de vie n'est pas réellement abordé dans les outils d'évaluation ni mêmes dans les articles scientifiques.

Les bâtiments les plus étudiés sont les bâtiments de services tels que les bureaux et les bâtiments industriels. Probablement servis par une maîtrise de la durée de vie courte, une maîtrise de l'entretien et du comportement des usagers, de l'existence de documents comptables contraints par une administration fiscale, les études de ces bâtiments sont plus nombreuses.

Les études d'impacts des bâtiments de logement, qu'ils soient collectifs ou individuels, sont moins disponibles. Seules les études du comportement thermique des bâtiments de logements sont nombreuses. Sur ce point précis les travaux ne lient pas la performance du bâtiment à sa durée de vie.

I.4.2 Problématique retenue

L'étude des différents champs attenants à notre thématique de recherche, nous a permis de mettre en place les orientations scientifiques. De fait, nous avons progressivement obtenu les éléments permettant de mettre en place notre problématique de recherche.

La problématique que nous développons dans cette thèse est donc sous tendue par la question suivante :

« Quel est l'impact de la durée de vie des solutions techniques de bâtiment dédié au logement sur les performances de développement soutenable »

Cette problématique comprend les questions suivantes :

A. À quelles fonctions les solutions techniques dont nous désirons étudier le comportement doivent-elles répondre et pour quelle durée ?

L'échelle de temps dans le secteur du bâtiment est longue. Les pays, selon leurs cultures et leur histoire envisagent des durées plus ou moins longues mais qui se situent essentiellement entre 50 et 100 ans. Les normes précisent une durée de vie courte tout au moins pour les bâtiments de logement. Enfin, les outils d'évaluation considèrent les durées de vie comme des données fixes et relativement courtes. Nous chercherons à analyser le comportement de bâtiments de type logement, plus pérennes que les bâtiments de service, peu évalués sur ce facteur considéré ici comme une variable. La fonction de logement, répondant au besoin primaire de protection au sens de Maslow, est dans le secteur du bâtiment, l'une des moins « variables ». Son comportement doit donc être étudié sur de longues périodes de temps.

B. Quels facteurs faut-il étudier dans le cadre d'une approche de développement soutenable ?

Il apparaît qu'aucun indice et aucun outil d'évaluation ne tiennent compte simultanément des trois piliers admis du développement soutenable. Concernant le pilier environnemental, les indicateurs évaluables sont nombreux. L'absence de hiérarchisation rend l'exercice difficile et nécessite une analyse initiale. Concernant le pilier économique, nous étudions le comportement du coût global. Enfin, nous tentons d'analyser le comportement du produit répondant à la fonction se loger dans ses conséquences pour une approche sociale.

C. Comment intégrer ces nouvelles connaissances dans le processus de conception architectural ?

Puisque ce facteur est négligé, sa prise en compte doit être introduite. La production de connaissance n'a de sens que si elle est mise à disposition des acteurs potentiellement concernés. Il est donc nécessaire d'analyser la démarche de projet et de fixer les éléments à leur place. L'objet de notre travail finit donc par l'élaboration d'un cahier des charges fixant les contraintes de l'outil ou du module d'outil permettant d'exploiter l'information.

Le développement des réponses à ces questions forme la structure sur laquelle s'appuie notre démonstration.

CHAPITRE II : CONSTRUCTION DU CADRE THEORIQUE ET METHODOLOGIQUE

Dans ce chapitre, le cadre, la méthode et les éléments de l'étude sont définis. Le premier sous-chapitre délimite précisément l'objet dont on désire étudier le comportement en termes de développement soutenable au travers de la durée de vie. Le deuxième sous-chapitre fixe les modalités des simulations en précisant les échelles de l'évaluation ainsi que les différents indicateurs dont l'évolution est observée. Les sources de données exploitées sont présentées et analysées. Enfin le dernier sous-chapitre expose la méthode visant la réalisation de nos objectifs.

II.1 La définition de l'objet étudié

Pour que le comportement de l'objet puisse être évalué et analysé, il doit être délimité et caractérisé. La première section comprend la description de l'objet en tant que système. Celui-ci est décrit au travers de sa fonction, sa structure et les liens qu'il entretient avec son environnement. La section suivante précise les échelles de l'évaluation.

II.1.1 La délimitation du système

Nous allons ici définir et caractériser le système.

A. La définition du système

Le système est défini au travers de sa fonction et de sa structure. Nous allons décrire les systèmes fonctionnel et structurel de notre étude

Le système fonctionnel

La question posée implique que soit définie précisément la fonction du bâtiment étudié. Afin de pouvoir réaliser une étude sur un temps long, nous retenons le bâtiment de logement. Le bâtiment de logement répond à la fonction principale « se loger » et primaire « s'abriter des agressions extérieures ». Outre le fait que cette fonction d'usage n'ait pas été à ce jour approfondie pour la question posée de notre sujet, la durée longue de la fonction permet d'envisager les simulations. Ce logement est de type individuel afin d'écartier les difficultés de l'imputation des impacts collectifs. La prise en compte de composants collectifs imposerait l'introduction de clés de répartition qui induirait des complications et par là des risques d'incertitude dans les résultats et les conclusions. De plus, cette complication n'apporterait rien à la démonstration.

Le système structurel

Sur la base des sous-ensembles constitutifs d'un logement, analysé en tant que système, nous pouvons établir le schéma simplifié

Figure 9 : Analyse fonctionnelle – Élément du bâtiment de logement. Nous cherchons à évaluer l'impact de la durée de vie du logement et des solutions techniques sur le développement soutenable. Les éléments, avec un astérisque, du système schématisé ci-dessous sont les réponses du deuxième niveau de l'analyse fonctionnelle descendante (F.A.S.T et norme NF X50-150). Ces solutions sont toujours des réponses à un cahier des

charges fonctionnel précis. La démarche systémique favorise la performance des réponses aux fonctions imposées par le besoin fonctionnel.

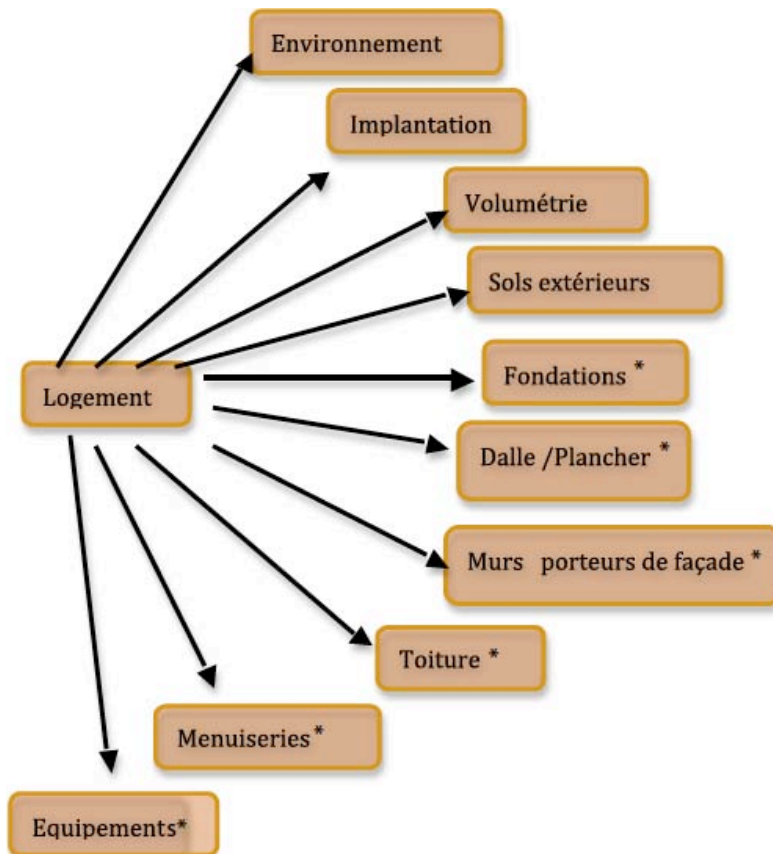


Figure 9 : Analyse fonctionnelle – Composants du bâtiment de logement

B. Les autres caractéristiques du système

Le choix et la délimitation du système dans le temps

Afin de répondre à notre question, nous définissons la durée de vie de la fonction à laquelle les solutions techniques évaluées doivent répondre. Cette durée de la fonction « se loger » est une hypothèse. L'observation de logements existants nous amène à proposer une durée de la fonction longue de 300 ans. Cette durée peu paraître très importante en regard des nombreux risques, dont nous pourrions dresser la liste exhaustive (Talon, 2006), susceptible de réduire la durée de vie et de modifier les résultats des simulations. Néanmoins, c'est la durée actuelle d'un grand nombre de bâtiments existants et dont l'existence ne semble pas remise en question à ce jour. Ils répondent toujours à leur fonction d'usage y compris au sens de la norme ISO 15686-1 : 2005 Bâtiments et biens immobiliers construits - Conception prenant en compte la durée de vie - Partie 1: Principes généraux et cadre, qui définit la durée de vie comme « le laps de temps après mise en œuvre pendant lequel un bâtiment ou des composants de bâtiment atteint ou dépasse les exigences de performance ». Une durée de 300 ans pour la réponse à la fonction de logement n'est pas extravagante. Qualitativement, les besoins auxquels la fonction répond évoluent mais les logements anciens se sont adaptés. Par

ailleurs, la fonction ne paraît pas devoir disparaître ni même se réduire dans des proportions importantes à moyen terme ni même à long terme.

La situation climatique du système

La situation retenue est standard, c'est-à-dire que l'intensité des agents environnementaux est « normale » qu'il s'agisse de la température, de l'humidité, du vent ou encore des agents corrosifs. Ce logement est toujours placé dans le même environnement quelle que soit la solution technique envisagée. En effet, un environnement différent pour les solutions techniques, qui modifierait les besoins d'entretien et les résultats de la phase d'usage, ne permettrait pas de conclure avec certitude sur les seuls impacts de la durée de vie. Identique pour toutes les solutions techniques, ce paramètre peut être négligé.

La situation du système dans l'espace

La situation dans l'espace est aussi toujours la même quelle que soit la solution technique envisagée. Ce choix permet de neutraliser les impacts liés à la situation géographique induisant les impacts lors des déplacements des usagers, par exemple. Identique pour toutes les solutions techniques, ce paramètre peut être négligé.

II.1. 2. Les échelles d'évaluation

L'objet étudié dans notre thèse est le bâtiment dédié au logement. L'objet entraîne la fixation des échelles des aspects environnementaux, économiques et sociaux. Les impacts de la durée de vie du bâtiment de logement sur l'environnement sont évalués et analysés au travers des conséquences de la durée de vie des choix de solutions techniques. Concernant l'aspect économique, l'échelle de l'étude est micro-économique, c'est-à-dire qu'elle se préoccupe des coûts associés à l'objet lui-même. Le domaine social souffre de l'absence d'un consensus sur sa prise en considération. L'analyse réalisée dans le chapitre I de notre thèse a montré l'hétérogénéité des indicateurs et la faible maturité de l'approche sociale et culturelle tout particulièrement à l'échelle du bâtiment. Puisqu'il n'existe pas d'indicateurs social et culturel homogènes, tels que fournis pour les aspects environnemental ou économique, ces approches pour notre question portent sur un inventaire et une analyse davantage qualitative des impacts de la durée de vie de l'objet sur la société.

II.1.3. Synthèse

L'objet étudié est donc un bâtiment répondant à des fonctions de logement individuel pour une durée de 300 ans. La situation géographique est toujours identique quelle que soit la solution technique proposée. Les contraintes de l'environnement local sont dites « normales ». Le logement est la réponse à un ensemble de besoins répondant au programme. La réponse est constituée d'un ensemble d'éléments répondant à des besoins fonctionnels résultant d'une démarche systémique conforme à la démarche FAST et à la norme X50-150.

II.2. Le choix des indicateurs et des moyens mobilisés

L'objet et les échelles étant définis, les évaluations nécessitent d'en préciser les principes, les indicateurs valorisés ainsi que les sources de données utilisées.

II.2.1. Les principes généraux d'évaluation

Pour réaliser nos évaluations, trois principes sont retenus. Il s'agit du service rendu identique quelle que soit la solution retenue, de la prise en compte du cycle de vie complet et de la prise en compte des dépendances entre certains éléments du bâtiment.

A. Les comparaisons « ceteris paribus »

L'objectif étant la mise en évidence de l'impact de la durée de vie sur le développement soutenable, les solutions comparées doivent répondre aux mêmes spécifications d'usage. Les comparaisons doivent se faire « ceteris paribus » concernant la réponse à la fonction d'usage. Par exemple, les capacités thermiques des différentes solutions techniques doivent être identiques afin de neutraliser l'impact des consommations de chauffage. Le service rendu à l'usage doit être en tout points identiques. Pour cette raison, les cahiers des charges des objets étudiés sont édités.

B. L'évaluation en cycle de vie

Les évaluations des indicateurs doivent prendre en compte d'une part les impacts de l'entier cycle de vie des produits au sens de la norme ISO 14040 et, d'autre part, le nombre de cycles nécessaires à la réponse au besoin, en rapport de la durée de vie des produits, pour la durée fixée de la fonction d'usage de l'objet, soit 300 ans.

C. Les dépendances des éléments du bâtiment pour la prise en compte de la durée de vie

Considérant les liens entre les différents éléments constituant le bâtiment et pour la prise en compte de la durée de vie de ceux-ci, il est admis le schéma de dépendance ci-dessous. Un élément inclus dans un autre élément, induit que la fin de vie de ce dernier entraîne la fin de vie du premier. Par convention, nous dirons que la fin de vie de l'élément hiérarchiquement supérieur entraîne la fin de vie de l'élément hiérarchiquement inférieur. La réciproque n'est pas vraie. La fin de vie d'un élément inférieur n'entraîne pas la fin de vie de l'élément dominant.

Par exemple, la fin de vie du mur extérieur, élément supérieur, entraîne la fin de vie de l'isolant, élément inférieur, tandis que la fin de vie de l'isolant n'entraîne pas la fin de vie du mur. La fin de vie de l'isolation du mur, implique la fin de vie de l'élément inclus soit le support du revêtement intérieur tel que la plaque de plâtre.

Lorsqu'il existe une dépendance et toujours par souci de simplification, il est admis que la durée de vie de l'élément « inférieur » soit un sous multiple de la durée de vie de l'élément supérieur.

Remarque : bien qu'éléments inférieurs, les murs porteurs sont considérés « associés » aux fondations. En effet, la fin de vie des fondations implique la fin de vie des éléments porteurs. La réciprocité est admise. Il paraît peu probable qu'un bâtiment soit déconstruit pour une reconstruction au plan identique.

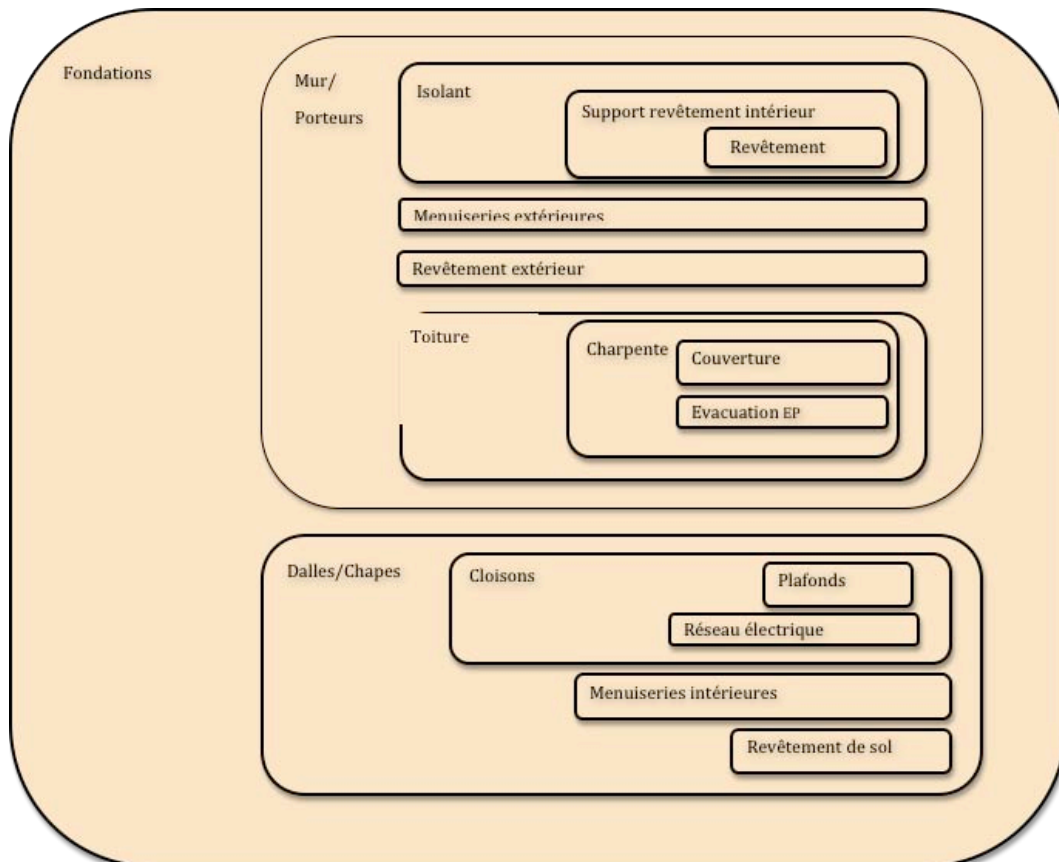


Figure 10 : Schéma de dépendance des éléments pour la durée de vie.

II.2.2. Le choix des indicateurs

A. La mesure de l'impact environnemental

L'impact de durée de vie des solutions techniques envisageables sur le facteur environnemental dépend d'un grand nombre d'indicateurs. Pour mesurer le degré d'impact de ces indicateurs, une analyse de sensibilité s'avère nécessaire. Cette analyse permettra un affinement considérable du nombre d'indicateurs sans perdre l'exactitude et la pertinence des résultats qui en découlent. L'analyse factorielle de données ou encore l'analyse en composantes principales sont des outils statistiques basés sur des règles mathématiques capables de réduire significativement le degré de liberté d'un système d'indicateurs (Bougeard, 2007).

Dans ce travail, nous avons choisi l'analyse en composantes principales (ACP) pour mener cette étude de sensibilité.

Une fois l'indicateur précisé, l'évaluation de l'impact environnemental comprend l'entier cycle de vie des solutions ainsi que les conséquences de la durée de vie qui induit l'obligation de reconstruire sur la durée de la fonction d'usage soit 300 ans.

B. La mesure de l'impact économique

Dans le cadre d'une approche économique, on admet généralement qu'il est nécessaire de mener une analyse en termes de cycle de vie complet. L'impact économique comprend donc d'une part, l'entier cycle de vie des solutions mais aussi, d'autre part, les conséquences de la durée de vie qui implique à terme l'obligation de reconstruire à l'identique pour la durée de la fonction d'usage.

Les observations des comportements des différentes solutions techniques se basent sur l'évolution de l'indicateur « coût global » dans le temps (hors coût d'usage dans la limite des coûts identiques). Conformément à la norme ISO 15685-5, nous retenons l'hypothèse d'une inflation nulle¹⁶. L'Annexe 6 montre que depuis 1954, le coût de la construction évolue sensiblement comme celui des prix à la consommation auquel il participe. Sur cette base, nous allons poser l'hypothèse réductrice que l'évolution des prix de la construction impacte le budget des familles dans la même mesure que les « autres biens et services ». Cette constatation justifie la préconisation de la norme ISO 15686-5 qui propose de négliger l'inflation tout au moins pour des produits peu énergivores. En ce qui concerne ces derniers produits et la restriction émise par la norme ISO 15686-5 et qui touche l'absence de prise en compte de l'inflation, nous mettons en évidence la sensibilité des prix à ce facteur énergétique dans le § B2 pages 134 et 139.

Nous étendons cette préconisation suggérée pour une durée de 100 ans à la durée de la fonction soit 300 ans. Cette liberté résulte de notre objectif est de mettre en évidence l'impact du facteur « durée de vie » sur la performance économique, sans pour autant évaluer les coûts réels.

Les résultats des valeurs ne font à aucun moment l'objet d'actualisation financière ; ceci écarte donc la problématique du choix d'un taux d'actualisation et de la position « politique » associée.

Dans un deuxième temps, avec l'objectif de mesurer l'intérêt économique de l'investissement d'un logement type en fonction de la durée de vie, les hypothèses de calcul sont les suivantes¹⁷ :

- la comparaison est faite sur la base d'un apport de la totalité du montant de l'investissement. Cette position permet d'écarter les interférences engendrées par le taux de crédit qui n'apporterait rien à la démonstration.
- le taux de rentabilité retenu des capitaux investis est de 4% (Taux médian des rendements des obligations des assurances vie - source Banque de France – Bulletin N°177 3^{ème} trimestre 2009) ;
- le loyer retenu est le montant fournis par l'ADHIL (Habitat privé référence guide officiel habitat 2010- Banlieue toulousaine) calculé au prorata du coût du foncier en banlieue toulousaine et du coût de la construction (source Batiprix).

¹⁶ La norme préconise de raisonner en valeur constante pour éviter des hypothèses aléatoires sur le taux d'inflation. Ceci suppose donc un raisonnement soumis à la clause "ceteris paribus".

¹⁷ Conformément à la préconisation de la norme ISO 15686-8, une attention particulière sera portée à la période des 100 premières années.

- Le taux d'évolution des loyers en rapport du revenu disponible est de 1,14% par an (source CREDOC à partir des séries longues de l'INSEE)

C. La mesure de l'impact social

La mesure de l'impact social de la durée de vie des bâtiments ne peut être réalisée sur les bases méthodologiques des autres piliers environnemental et économique. En effet, en l'état actuel des connaissances, il n'existe pas d'indicateur social ou culturel caractérisé, résultant d'un consensus, sensible à la durée de vie. L'analyse de l'impact de la durée de vie dans cette approche est réalisée sur la base d'un inventaire qualitatif des différents impacts.

II.2.3. La disponibilité et le choix des sources de données

Plusieurs bases de données fournissent des informations sur les matériaux ou sur les produits du bâtiment en ce qui concerne les impacts environnementaux. Concernant les coûts, une seule base est disponible tandis que l'approche sociale ne fournit pas de données structurées et homogènes. L'objectif de cette section est d'analyser les données disponibles, de les choisir et de justifier les choix.

A. Les sources de données

A.1. Les données environnementales et l'analyse critique

Les analyses de l'impact de la durée de vie doivent se fonder sur des simulations qui nécessitent des données. La difficulté réside dans l'évaluation de la qualité des informations disponibles des différentes sources.

Nous avons listé et analysé les bases de données disponibles dans le chapitre 1. L'analyse laisse ressortir deux bases principales adaptées pour la réalisation de nos simulations. Il s'agit des bases INIES et ECOINVENT-KBOB. Dans les deux bases, les évaluations des indicateurs sont réalisées en analyse de cycle de vie complet au sens de la norme ISO 14040.

La base de données française INIES publie les Fiches Déclaratives Environnementales et Sanitaires (FDES) établies selon la norme NF P01-010. Elle fournit des informations précises sur des produits.

Le rapport complet présente un résumé des performances sous la forme d'une carte d'identité environnementale et sanitaire dont un exemple est repris ci-après :

		Valeur total cycle de vie/UF par annuité	Valeur total cycle de vie/UF pour toute la DVT
1	Consommation de ressources énergétiques		
	Energie primaire totale (MJ)	5,493E0	8,240E2
	Energie renouvelable (MJ)	7,667E-1	1,150E2
	Energie non renouvelable (MJ)	4,727E0	7,090E2
	Energie primaire procédé (MJ)	Non renseignée	Non renseignée
2	Epuisement de ressources (ADP) (kg eq. Antimoine)	1,580E-3	2,370E-1
3	Consommation d'eau totale (L)	4,513E-1	6,770E1
4	Déchets solides		
	Déchets valorisés (total) (kg)	1,760E-2	2,640E0
	Déchets éliminés		
	Déchets dangereux (kg)	1,740E-4	2,610E-2
	Déchets non dangereux (kg)	9,000E-4	1,350E-1
	Déchets inertes (kg)	1,747E0	2,620E2
	Déchets radioactifs (kg)	2,020E-5	3,030E-3
5	Changement climatique (kg eq. CO2)	2,753E-1	4,130E1
6	Acidification atmosphérique (kg eq. SO2)	6,307E-4	9,460E-2
7	Pollution de l'air (m³ d'air)	1,923E1	2,884E3
8	Pollution de l'eau (m³ d'eau)	7,467E-2	1,120E1
9	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique (kg eq. CFC)	0,000E0	0,000E0
10	Formation d'ozone photochimique (kg eq. éthylène)	8,933E-5	1,340E-2

Figure 11 : Exemple de résumé d'une FDES de brique multi alvéoles

Les informations sont claires, gratuites et disponibles sur le site Internet <http://www.inies.fr>.

La base ECOINVENT-KBOB présente des résultats généraux par type de produits. Elle fournit donc des informations moins précises mais plus complètes en ce sens qu'elle introduit différents équipements tels que ceux de chauffage...

La présentation des informations est réalisée grâce à un tableau dont un extrait est présenté ci-dessous.

UBP			Primärenergie Energie primaire						Treibhausgasemissionen Emissions de gaz à effet de serre			Référence	MATÉRIAUX [Bibliographie EMPA, version 2.2]
UBP			gesamt globale			nicht erneuerbar non renouvelable			Total			Dimension	
Total total	Herstellung Fabrication	Entsorgung Elimination	Total total	Herstellung Fabrication	Entsorgung Elimination	Total total	Herstellung Fabrication	Entsorgung Elimination	Total total	Herstellung Fabrication	Entsorgung Elimination		
-	-	-	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	kg	kg	kg		
Béton (sans armature)													
87,3	63,5	23,8	0,544	0,366	0,178	0,517	0,345	0,172	0,0646	0,0557	0,00890	Masse	Béton C 8/10 (béton maigre)
96,0	70,2	25,8	0,721	0,519	0,202	0,680	0,484	0,196	0,0775	0,0670	0,0105	Masse	Béton C 25/30 spécialement pour fondations / dalles
116	90,6	25,8	0,811	0,609	0,202	0,771	0,575	0,196	0,120	0,110	0,0105	Masse	Béton C 30/37
129	103	25,8	0,933	0,730	0,202	0,887	0,691	0,196	0,144	0,133	0,0105	Masse	Béton C 50/60 (pour charge élevée)
Pierres de taille													
178	154	24,2	3,02	2,83	0,189	2,76	2,57	0,183	0,248	0,239	0,00907	Masse	Brique en terre cuite
134	111	23,7	1,58	1,40	0,180	1,45	1,28	0,174	0,139	0,130	0,00873	Masse	Grès
289	265	24,2	3,64	3,45	0,189	3,43	3,25	0,183	0,421	0,412	0,00907	Masse	Béton cellulaire
134	110	23,8	1,01	0,831	0,178	0,930	0,758	0,172	0,130	0,121	0,00890	Masse	Plat de ciment
387	362	24,2	5,61	5,42	0,189	5,44	5,26	0,183	0,409	0,400	0,00907	Masse	Pierre en béton léger: argile expansée
182	158	24,2	1,64	1,45	0,189	1,54	1,36	0,183	0,224	0,215	0,00907	Masse	Pierre en béton léger: pierre ponce naturelle
224	200	24,2	5,67	5,49	0,189	2,83	2,64	0,183	0,170	0,161	0,00907	Masse	Brique en argile léger
Autres matériaux massifs													
205	181	24,2	2,00	1,81	0,189	1,89	1,70	0,183	0,218	0,209	0,00907	Masse	Tuiles en béton
254	230	24,2	4,10	3,91	0,189	4,01	3,83	0,183	0,367	0,358	0,00907	Masse	Tuile en terre cuite

Figure 12 : Extrait de la base ECOINVENT-KBOB

La possibilité du choix de produits de la base INIES, nous paraît fournir une plus grande précision. Les informations sont nombreuses et peuvent permettre l'application de la méthode à d'autres indicateurs. Les informations sont facilement accessibles et gratuites. Le protocole d'établissement des FDES est précis (Annexe 5). La tutelle du ministère, des organismes publics ou semi-publics, les évaluations des produits dont certaines sont réalisées par des organismes indépendants et le contrôle mis en place permet de croire en la qualité des données.

La volonté naturelle des entreprises d'agir sur l'information afin « d'enjoliver » la présentation des résultats des impacts nous contraint néanmoins à une analyse critique des données. Nous avons confronté les valeurs de produit de la base INIES aux valeurs « type » de la base ECOINVENT-KBOB. La base ECOINVENT-KBOB est établie par l'Office Fédéral des constructions et de la logistique (OFCL). Il s'agit d'un organisme d'Etat. La comparaison des données concernant les émissions de GES des deux bases, établie sur des produits sélectionnés participant au bâtiment est restituée dans le tableau suivant :

	INIES	KBOB	Différence relative
Isolant laine de verre	30,90	35,28	12,41%
Enduit minéral	5,13	5,41	5,09%
Brique multialvéole 30Cm	92	74	20,04%
Brique pleine	85	57	33,22%
Bloc de béton creux	16	24	33,77%
Béton banché	65	58	11,53%
Béton cellulaire	40	41	2,10%
bois (ossature)	-10,76	3,89	136,16%
Pierre	51	42	18,55%

Tableau 15 : Comparaison des valeurs des indicateurs GES (kg éq CO₂) des bases INIES et KBOB-ECOINVENT

	INIES	KBOB	Différence relative
Isolant laine de verre	30,90	35,28	12,41%
Enduit minéral	5,13	5,41	5,09%
Brique multialvéole 30Cm	279	336	16,88%
Brique pleine	170	161	5,59%
Bloc de béton creux	163	131	20,07%
Béton banché	173	149	13,72%
Béton cellulaire	206	194	6,00%
bois (ossature)	-10,76	3,89	136,16%
Pierre	54	48	11,23%

Tableau 16 : Ecart sur 300 ans des bases INIES et ECOINVENT-KBOB

Il ressort de cette confrontation des écarts sur certains produits à base de bois. Il s'agit là d'une quasi-opposition méthodologique de prise en compte sur laquelle nous revenons dans la section suivante. Les écarts des autres produits ne dépassent guère 20%. Ces écarts peuvent paraître importants, mais la prise en compte de certains facteurs permet de relativiser ces écarts. Tout d'abord, la base ECOINVENT-KBOB évalue l'impact de produits types et non de produits spécifiques. Les données sont donc des moyennes. Par ailleurs, la base INIES prend en compte le produit en œuvre c'est à dire que dans ces exemples, les joints liants ont été comptabilisés. L'unité de la base ECOINVENT-KBOB est la masse de produit type or, les

densités des produits ayant la même fonction d'usage peuvent varier d'un produit à l'autre. Par ailleurs, des divergences peuvent survenir lors de la prise en compte des énergies utilisées. Le type d'énergie et le mode de production de celles-ci, variables d'un pays à l'autre, modifient aussi les résultats des émissions.

La méthode proposée est indépendante de la source de données utilisées. Néanmoins, il est admis que les résultats sont liés à la source et présenteraient des divergences d'une source à l'autre.

A.2. Les données économiques et l'analyse critique

La rareté des bases complètes de données sur les coûts des travaux du bâtiment nous contraint à choisir les bordereaux de prix « Bâtiprix- Ed du Moniteur ». Un exemple de présentation des données est fourni ci-dessous.

Calcul des prix avec votre prix de main d'œuvre et votre % de frais généraux.													
22	Code	Unité	Désignation des ouvrages	Votre main d'œuvre		Vos fournitures				Déboursé sec Total de la Colonne 5 + la Colonne 9	Votre Prix de revient Colonne 10 x votre coefficient de frais généraux de 1,310	Prix de vente indicatif Fourniture et mise en œuvre avec hypothèse de 10 % de bénéfice	en € H.T Mise en œuvre seule
				Temps de pose en millièmes d'heures	Main d'œuvre + charges salariales Colonne 4 x 23,68 Euros	Unité	Quantité	Prix unitaires	Total fournitures principales et annexes Colonne 7 x Colonne 8				
24	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
25	32 00 00 00 003	H	Taux horaire moyen de votre entreprise à 11,00 €	1,000	23,68				0,00	23,68	31,02	34,46	
26													
27	32 03 03 03 003	Unité	Fourniture et pose d'une chaudière fonte fioul chauffage seul. De Dietrich GTU 123 RS, puissance de 21 kW , à haut rendement optimisé, dans votre local Cellier . Evacuation par cheminée compris brûleur, tubes, raccords et robinets pour raccordement sur réseau de distribution.										
28													
29													
30			Détail de la mise en œuvre	12,000	284,16								
31			Détail des Fournitures										
32			Chaudière			U	1,00	2 100,00	2 100,00				
33			Tube noir 33x42			Mi	4,20	8,28	34,78				
34			Raccord union vanne 33x42			Ens	2,00	20,14	40,28				
35			Robinet boisseau			U	1,00	6,27	6,27				
36			Total des fournitures						2 181,33	2 465,49	3 229,79	3 588,65	

Figure 13 : Extrait de la présentation des données fournies par la base de prix Batiprix- Ed Le Moniteur

Cette base de données, très précise et complète, est une référence dans le secteur. Elle procure l'avantage de distinguer les temps de main-d'œuvre, les frais de structure, les prix des matériaux et des produits. La critique se situe dans l'absence de prise en compte du contexte et de la localisation. Un extrait de la notice d'utilisation est fourni en Annexe 7.

Nous savons que les prix sont différents d'une région à l'autre, différents s'il s'agit de travaux à l'accès facile ou en milieux dense et enfin qu'il existe des variations selon les conditions du marché. Néanmoins, cette relative insensibilité de l'information du contexte a de faibles conséquences pour nos travaux dans la mesure où l'objet est toujours situé dans le même cadre. Les résultats sont relatifs et indicatifs

A.3. Les données sociales

Compte-tenu des spécificités longuement évoquées au sein du premier chapitre, les données de ce domaine n'existent pas dans l'esprit des champs environnemental et économique. Relevant donc d'une analyse davantage qualitative, cet aspect de l'étude reprend des données générales.

B. Les données contradictoires des bases de données environnementales

La confrontation des données laisse apparaître une opposition pour les produits à base de bois. La comparaison de ces bases de données présente une grande divergence en ce qui concerne la valeur de l'indice de l'impact des gaz à effet de serre en kg éq CO₂ des produits dérivés du bois. Par exemple, la base ECOINVENT-KBOB présente, pour ces produits, des valeurs d'émissions des gaz à effet de serre positives. A l'opposé, les bases ECOSOFT (Autriche) et INIES (France) affichent des valeurs négatives. Si le paragraphe précédent tend à justifier le choix de la base INIES, les indices « changement climatique » des produits bois, imposent une analyse spécifique et une prise de position.

Les spécificités et difficultés concernant les GES

Les quantités stockées de CO₂ résultent du cycle de croissance et du phénomène de photosynthèse dont le mécanisme présente à lui seul une grande complexité. En effet, sur la base d'un mécanisme diurne et saisonnier, les bilans, les délais et les durées seront différents selon les espèces, les sols, l'environnement,... Néanmoins il est certain que lors de la croissance, le bilan CO₂ est négatif, c'est-à-dire que l'arbre dans cette phase stocke davantage de CO₂ qu'il n'en rejette. En début de pousse, le stockage est faible, pour s'accroître ensuite lors de la phase de pleine croissance. La phase de maturité (stade climax de la forêt) laisse un bilan absorption/rejet relativement équilibré. La fonction active de stockage est moindre.

La fin du cycle amène deux questions. La première concerne la replantation des parcelles dont les arbres sont exploités. L'ONF garantit cette replantation. Qu'en est-il du secteur privé ? Cette étape est importante si l'on veut pouvoir compter dans un avenir plus ou moins proche un stockage proche de celui obtenu grâce à l'arbre adulte. La seconde concerne la fin de vie du produit. En l'absence d'information, la norme NF P01-010 considère la mise en décharge. En cas d'incinération, comment comptabiliser les rejets ? Quelles précautions sont prises concernant les traitements subis, les colles ou les finitions appliquées ?

Le bilan nécessite la prise en compte des rejets liés à l'énergie consommée pour l'entretien des forêts, l'abattage, le transport et la mise en œuvre du bois.

Une autre difficulté intervient au moment de comptabiliser la valorisation des déchets d'élagage et de production. Ces déchets sont-ils valorisés ? De quelles manières sont-ils utilisés ? Sont-ils transformés et donc stockés ou brûlés ?

L'évaluation des émissions des gaz à effet de serre, en cycle de vie complet, des produits bois, nécessite donc des précautions (Cornillier et Vial, 2008). Ces précautions concernent :

- la modélisation de l'étape de sylviculture, permettant de rendre compte des spécificités de la biologie végétale et du bilan des relations entre les différents compartiments eau, air, sol et végétaux ;
- la modélisation des flux liés au carbone biomasse dans les inventaires de cycle de vie, de la sylviculture à fin de vie et prise en compte dans les calculs d'indicateurs d'impacts en particulier celui du changement climatique. Leur absence peut induire des effets contreproductifs pour la lutte contre les émissions de GES ;
- la modélisation du stockage temporaire de carbone durant la phase d'utilisation du bois et prise en compte du bénéfice de cette séquestration dans l'évaluation de l'impact sur la contribution au changement climatique du système étudié ;
- la comptabilisation des énergies matières et procédés, définitions et choix d'indicateurs énergétiques ;
- le choix d'allocation entre produits étudiés, co-produits et sous-produits issus de la transformation du bois.

Pour finir, le stockage du CO₂ est une fonction proportionnelle du volume de bois utilisé mais conservé. Elle est constante à volume de bois identique et varie en fonction de la variation du volume de bois utilisé.

Le résultat de l'approche omettant la fonction de stockage

Basée sur le cycle de vie complet, la position de certains analystes concernant la prise en compte des flux biomasse, est la neutralité du rapport absorption/rejet global. Le carbone fixé est relâché au cours du cycle de vie et en particulier en fin de vie soit par incinération soit par dégradation biochimique. Le bilan résultant de GES est donc faible mais la valeur de l'indicateur est positive (ECOINVENT, 2004).

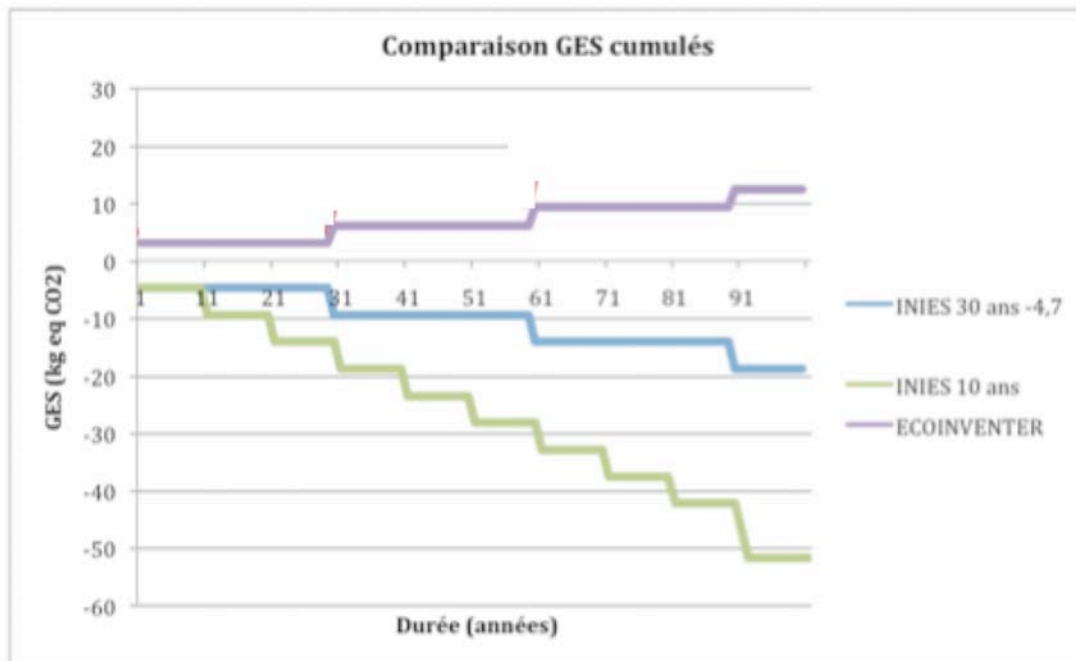
Les arguments d'un indice à valeur négative d'impact des GES

Le choix méthodologique de non prise en compte des flux liés au carbone biomasse ne permet pas d'évaluer l'impact négatif ou positif de ces flux. Il met au même plan une forêt coupée et brûlée et une forêt gérée durablement. La prise en compte du carbone biomasse pourra au contraire permettre de différencier un produit en bois issu de forêts gérées de manière soutenable par rapport à un produit issu d'une déforestation qui ne pourra prétendre à un stockage de CO₂. Ari Rabl conclue donc que la non prise en compte des émissions et prélèvements liés au carbone biomasse peut conduire à des conclusions contre-productives pour la lutte contre le changement climatique (Ari Rabl et al., 2007).

« *L'ISO 14040, qui donne les principes et le cadre de l'analyse de cycle de vie, ne précise nul part que les flux liés au carbone biomasse ne doivent pas être pris en compte. Ainsi l'indicateur de changement climatique peut se retrouver négatif, traduisant un effet bénéfique de lutte contre le changement climatique, si le carbone biomasse n'est pas relargé* » (Cornillier et Vial, 2008). Pour ces auteurs, ceci est d'autant plus vrai que la faible dégradation du bois en décharge sur une durée de 100 ans, délai préconisé par le GIEC comme échelle de travail, permet de considérer l'objectif atteint.

La difficulté pour notre méthode

Considérant notre méthode, tel qu'illustré par le Graphique 1 ci-après, l'indicateur à la valeur négative comprend le paradoxe suivant. Etablie sur le cycle de vie complet, plus la durée de vie du produit est courte, plus la réponse à un besoin fonctionnel impose un grand nombre d'unités consommées et plus l'effet présenté est bénéfique pour la planète. Il ressort de l'exploitation de cet indice cette apparente absurdité.



Graphique 1 : GES cumulé des solutions « bois » en fonction de la source de données et de la durée de vie

La position retenue

Pour les produits dont les composants ont pour origine des matériaux bois, chaque fois que l'indice engendre des difficultés d'interprétation présentées dans le paragraphe précédent, nous présente simultanément les résultats liés aux bases INIES et ECOINVENT-KBOB.

Synthèse

Les données disponibles sont assez nombreuses et précises pour répondre à la question posée par notre sujet. Les protocoles de collecte sont eux-mêmes disponibles et précis. En ce qui concerne les indices environnementaux, les déclarations faites par les fabricants doivent maintenir une vigilance de notre part. Néanmoins, la relative cohérence d'information des bases INIES et ECOINVENT-KBOB, nous permet d'entreprendre sereinement la démonstration à partir des données INIES. Concernant les indicateurs GES pour les produits « bois », compte-tenu de la contradiction présentée précédemment, nous conservons les données de deux sources INIES et ECOINVENT-KBOB. Concernant les coûts, nous retenons l'unique base de données, servant de référence aux professionnels, à savoir Batiprix. Celle-ci, précise et détaillée, permet de répondre à la question. Enfin, l'approche sociale ne fait pas appel à une base de données en tant que telle. Elle fera l'objet d'un développement et d'une analyse spécifique.

II.3 Présentation de la méthode

Afin d'atteindre l'objectif et de pouvoir étudier les performances des bâtiments en termes de développement soutenable en ce qui concerne l'impact de la durée de vie, ce sous-chapitre expose la stratégie retenue, puis le traitement des impacts en phase d'usage et enfin le développement de la méthode.

II.3.1 Analyse des performances de l'unité de mur et du logement

Le logement est ici considéré comme un système, soit un ensemble d'éléments ayant des relations entre eux et avec l'environnement. Ce système a toujours la même situation géographique quelles que soient les solutions techniques retenues. Ce principe permet de neutraliser les facteurs d'impact, non liée à la durée de vie, et de les négliger. Par exemple, la demande d'énergie à l'usage est la même pour toutes les solutions techniques et nous n'évaluons pas l'impact de la durée de vie des solutions technique en fonction de la situation géographique.

Dans une première étape, notre démarche consiste à établir et réaliser l'évaluation du comportement en termes de développement soutenable d'un élément de logement, à savoir une unité d'un mur porteur extérieur, sur une longue durée de vie soit 300 ans.

Plusieurs raisons ont prévalu à ce choix :

- cet élément est l'un des plus pérennes du bâtiment, il répond donc plus facilement à l'échelle de temps long choisi par hypothèse ;
- il comprend l'importante question du comportement thermique. Sur ce point, le choix de cet élément permet de fixer les contraintes de réduction des impacts à l'usage et de les résoudre avec une bonne précision;
- il permet de fixer un protocole méthodologique précis pour répondre à la question;
- le choix de cet élément est validé par les résultats. En effet, élément de base du composant « parois verticales » présenté dans le résultat 18, il est validé comme hiérarchiquement le deuxième composant le plus émissif.

Cependant, si le comportement de l'unité permet des comparaisons et des analyses, il ne fournit pas :

- les grandeurs d'échelle au travers des comparaisons;
- la possibilité de vérifier les similitudes de réponse des solutions à l'usage ;
- les informations nécessaires aux décisions stratégiques et politiques quant à la question de l'impact de la durée de vie des bâtiments.

Les valeurs obtenues dans l'évaluation du comportement de l'unité de mur sont incommensurables puisque l'échelle des résultats ne peut être produite en l'état. Après avoir étudié les possibilités et les limites de l'usage de la méthode pour les autres composants du logement, dans un troisième temps, nous étendons la méthode développée pour l'unité du mur à l'ensemble d'un logement type. Hormis les murs, les autres composants du logement ne font pas l'objet d'une proposition de plusieurs solutions techniques. Les solutions retenues pour les autres composants sont des solutions courantes. La multiplication des facteurs modifiés,

impactant les résultats, rendrait ambiguës les analyses et les conclusions. En introduisant la durée de vie des murs à l'échelle du logement, la fonction d'impact de l'unité de mur s'étend par homothétie au bâtiment de logement, à laquelle s'ajoute une fonction constante d'impact des autres composants. Dans l'exercice de comparaison, la démarche introduisant les autres composants réduits donc les écarts relatifs d'une solution à l'autre car ils sont « confondus » avec les autres composants à l'impact fixe.

L'étude du logement type permet de :

- comparer les performances des solutions à l'échelle du bâtiment;
- vérifier l'équivalence d'impact à l'usage ;
- confronter les parts relatives des impacts des phases de production/déconstruction et d'usage ;
- établir la grandeur d'échelle de l'écart d'impact des solutions extrêmes ;
- hiérarchiser des impacts des différents composants du bâtiment.

II.3.2. La prise en compte des impacts d'usage

La nécessité admise d'évaluation en cycle de vie complet implique la prise en compte de toutes les étapes du cycle de vie des produits, à savoir, la production, la mise en œuvre, l'usage, la maintenance et la démolition.

La prise en compte de l'entretien courant

Les solutions techniques ayant les mêmes finitions extérieures et intérieures (hormis la solution « pierre »), par souci de simplification, nous supposons l'entretien courant identique pour toutes les solutions. Cet entretien identique, ne modifiant pas les résultats des évaluations d'impact à une constante près, n'est pas évalué.

La prise en compte de la maintenance

La situation géographique choisie n'implique pas de contraintes particulières. Les opérations sont considérées conformes aux prescriptions des fabricants et des usages. Le maintien en fonction de l'élément étudié, à savoir l'unité de mur, est considéré dans le cadre de la durée de vie des produits qui le composent.

Les travaux de réparation

En ce qui concerne les durées de vie des solutions techniques retenues en hypothèse, il est admis qu'aucun incident n'implique des travaux de réparations. Cette hypothèse fait partie des conditions restrictives de l'étude.

La neutralisation des impacts de l'usage

Notre sujet a pour objectif l'étude de l'impact de la durée de vie des solutions techniques sur les performances en termes de développement soutenable. Les durées de vie et leurs impacts, différents selon les solutions, imposent que soient comparés des systèmes

répondant strictement aux mêmes besoins et dans les mêmes conditions. Les solutions techniques proposées doivent être soumises à la clause « *ceteris paribus* ». Cette équivalence est indispensable pour une comparaison des impacts de la durée de vie des différentes solutions retenues. L'absence d'équivalence de la réponse aux besoins rendrait imprécise la comparaison des solutions et aléatoires les conclusions. Cette stricte équivalence de réponse à l'usage doit donc engendrer le plus strictement possible une équivalence des impacts environnementaux et économiques à l'usage pour la fonction de logement. Par exemple, les situations de confort d'hiver doivent être les plus proches possible quelles que soient les solutions techniques retenues. Cette équivalence de comportement à l'usage doit être vérifiée à l'aide des outils disponibles. Ce sont les caractéristiques des conceptions des solutions techniques qui permettent l'égalisation des impacts de la phase d'usage de la fonction « logement ». Ceux sont donc les incidences de la conception qui sont comptabilisés lors des simulations. A usage identique, les différences de comportement non réductibles au travers de la conception qui génèrent des différences à l'usage doivent être incorporés dans les résultats de simulation si elles ne sont pas négligeables.

II.3.3. Le développement de la méthode

La démarche comprend trois étapes. La première résout le problème engendré par le nombre important d'indicateurs environnementaux. La deuxième étape consiste à la définition d'un élément précis composant le système « logement », à savoir, l'unité de mur. Cette étape permet de développer la méthode, de définir précisément l'élément étudié, les limites et enfin de présenter les comportements des différentes solutions dans le temps en fonction des hypothèses de durées de vie. La troisième étape consiste à étendre la méthode définie précédemment au système constitué par un logement type complet.

A. L'analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales consiste à réduire le nombre d'indicateurs sans perdre statistiquement la pertinence des résultats et des analyses. La démarche consiste, dans un premier temps, à extraire la liste des produits participant à la construction du logement. Dans une deuxième phase, pour chaque produit, les indicateurs environnementaux de ces produits regroupés par thèmes sont collectés à partir des FDES. Enfin, par une analyse statistique, les indicateurs sont répartis en plusieurs sous-groupes afin de sélectionner les plus représentatifs. Les produits dont les indicateurs sont pris en compte sont ceux de produits constituant un bâtiment de logement et ceux participant aux différentes solutions techniques envisagées.

B. La définition et l'étude de l'unité de mur porteur extérieur

L'étude de cet élément a pour objectif de permettre de simuler le comportement des indicateurs environnementaux et des coûts en fonction des hypothèses de durée de vie retenues des solutions techniques.

La méthode retenue est schématiquement représentée et explicitée ci-après.

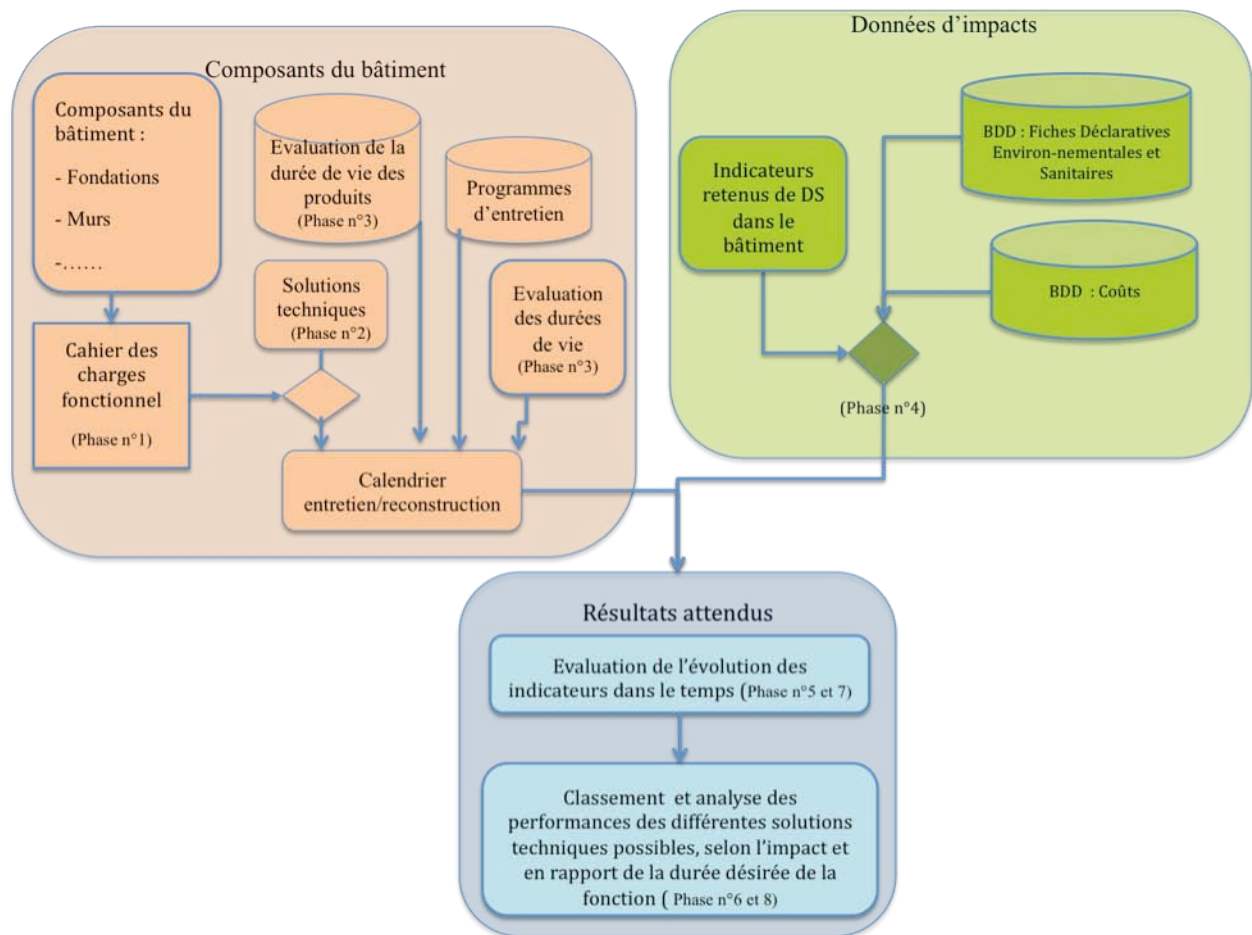


Figure 14 : Schéma de la méthode appliquée à l'unité de mur

Remarque : considérant la *Figure 10*, par soucis de simplification, le lien et les impacts du mur avec les menuiseries extérieures, les planchers et la toiture sont ignorés. Cette simplification est permise car les durées de vie de la toiture et des menuiseries vont être considérées toujours inférieures ou égales à celles du mur.

L'étude ici ne vise donc que l'évaluation des performances du mur lui-même au travers du maintien de ses propres performances.

Suivant le schéma de la Figure 14, nous présentons ci-dessous, les différentes phases de notre démarche.

Phase 1 : Analyse du besoin, établissement du cahier des charges fonctionnel, caractéristiques attendues.

Cette étape permet de garantir une équivalence des solutions proposées dans la réponse à la fonction d'usage. Le cahier des charges permet de réduire les divergences de réponses fonctionnelles. Par exemple, il est nécessaire de neutraliser les différences de consommation d'énergie dues au chauffage grâce au respect d'un coefficient identique d'isolation, de fournir des solutions à l'esthétique et au confort identiques.

A partir des méthodes initiées par la norme NF X 50-151 et APTE, reconnues et adoptées dans le secteur industriel pour la phase de conception, nous énonçons les fonctions d'usage et nous établissons un cahier des charges fonctionnel synthétique qui s'impose à l'étape de la conception et des choix de solutions techniques. La méthode consiste à situer l'élément étudié

dans son système en décrivant les liens qu'il entretient avec les autres éléments ainsi que les interactions avec les éléments de son environnement extérieur. Ces liens sont traduits en fonctions pour lesquels sont définis des critères et des niveaux de critères. L'ensemble permet de rédiger le cahier des charges.

Phase 2 : **Elaboration et présentation des différentes solutions techniques**

Cette étape consiste à proposer différentes solutions techniques répondant aux fonctions d'usage et respectant le cahier des charges de la phase précédente. Les différentes solutions techniques retenues doivent permettre la comparaison des impacts en termes de développement soutenable sur la durée de vie fixée du besoin défini. Les solutions techniques retenues doivent être disponibles. Les solutions répondant au cahier des charges comprennent les solutions structurelles présentées dans le tableau ci-dessous :

Elément porteurs
bloc béton creux 200mm
structure bois
brique multi alvéoles 300mm
Pierre de Noyant 240mm
béton cellulaire 200 mm
brique terre cuite pleine 200
béton banché
brique alvéole 200mm
mur terre crue 200mm
Brique de terre cuite pleine

Tableau 17 : Solutions techniques répondant au cahier des charges

Les critères qui ont prévalu à ce choix sont les pratiques contemporaines, les pratiques qui ont été courantes par le passé ainsi que les solutions qui tentent de s'imposer.

Les solutions techniques proposées doivent entraîner une réflexion sur la nature des impacts de ces solutions sur les autres éléments du système ainsi que sur la maintenance imposée par le choix pour le maintien des performances.

Phase 3 : **Evaluation des durées de vie des solutions proposées**

L'évaluation des durées de vie peut être le résultat d'approches expérimentales, fiabilistes, statistiques ou à « dire d'expert » (A.Talon, 2006). C'est par la méthode dite « à dire d'expert » que nous allons retenir les hypothèses d'intervalles de durées de vie. Cette méthode, utilisée dans le cadre d'une première approche, permet une simulation fournissant des résultats approximatifs basés sur la logique mathématique floue (Bouchon-Meunier et al, 2003). Afin de définir les durées de vie des éléments constituant notre unité de mur, et leur périodicité de remplacement, nous reprenons la partie de la *Figure 10* correspondant au mur. Il s'agit du schéma ci-dessous.

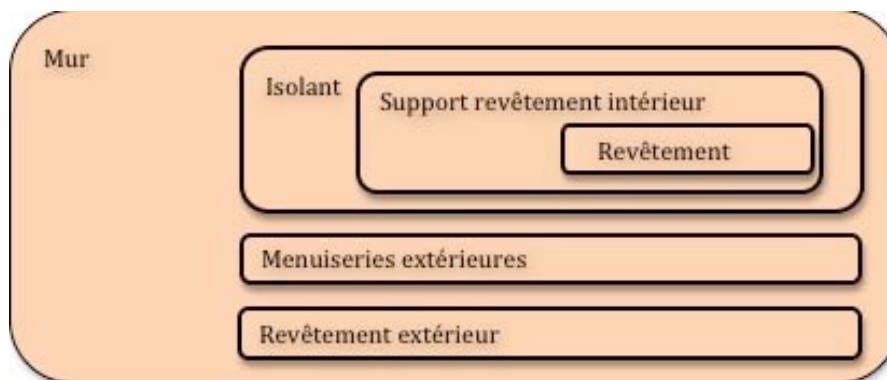


Figure 15 : Schéma de dépendance des durées de vie du mur extérieur

Par souci de simplification, la relation avec les menuiseries extérieures est négligée. Le revêtement de finition intérieur à la durée de vie courte est aussi exclu.

Phase 4 : Collecte des valeurs des indicateurs retenus

Les différents critères de l'étude étant définis dans les étapes précédentes, cette étape consiste à réaliser la collecte des données permettant d'évaluer les indices choisis et de présenter les résultats et leur évolution sur la durée retenue. Les bases de données sont INIES et ECOINVENT-KBOB pour l'aspect environnemental et les bordereaux de prix « Batiprix » Ed Le Moniteur sont retenues pour l'aspect économique.

Phase 5 : Simulations environnementale et économique

La simulation de l'évolution des impacts, sur la base des hypothèses retenues, permet d'obtenir différents résultats. Le principal traitement des données réside dans une accumulation des impacts sur la durée de la fonction. L'outil de traitement est un tableur.

Les résultats attendus sont les suivants :

- évolutions des émissions de gaz à effet de serre cumulés sur la durée du besoin, soit 300 ans ;
- confrontation des résultats aux valeurs d'indicateurs officiels ;
- évolution des coûts cumulés ;
- mise en relation des coûts et des GES.

Remarque : bien que l'approche sociale de l'impact de la durée de vie de l'unité de mur ait été intéressante, cet aspect est renvoyé à l'échelle du bâtiment.

Phase 6 : Analyses des résultats

Cette phase consiste à comparer et analyser les différents résultats.

Phase 7 : Durée de vie des solutions techniques variables

La durée de vie n'étant pas objectivable, dans cette phase, les comportements des indicateurs sont évalués en considérant cette fois la durée de vie des solutions techniques variables.

Les résultats attendus sont :

- L'évolution des impacts en fonction de la durée de vie des solutions ;
- L'évolution des coûts en fonction de la durée de vie.

Phase 8 : Analyses des résultats

L'évolution des indicateurs en fonction de la durée de vie est précisément identifiable. De plus, cette phase permet de mettre en correspondance les différentes solutions techniques sur la base d'un impact identique.

C. Définition et étude du bâtiment de logement

La méthode établie sur la base de l'unité de mur est étendue à un logement type. Les solutions techniques des autres composants sont toujours identiques quelle que soit la solution technique des murs porteurs. Les solutions techniques de ces derniers sont celles proposées dans le Tableau 17. Cette extension de l'unité de mur à l'ensemble du logement permet différentes observations. Dans un premier temps, nous pouvons vérifier, grâce aux outils de simulations, l'égalité des consommations de chauffage. Cette égalité valide la stricte égalité de réponse aux besoins fonctionnels. D'éventuelles différences de consommation, en particulier celles liées au confort d'été, peuvent être intégrées. Par ailleurs, l'évaluation sur une longue durée permet de hiérarchiser les différents composants constitutifs du bâtiment en fonction de l'importance de leurs impacts. Enfin, les résultats permettent de comparer les solutions extrêmes et de les rendre commensurables à une autre fonction de service telle que celle d'un déplacement automobile.

Les étapes successives de simulations sont les suivantes :

Phase 1 : Analyse du besoin, programme, caractéristiques attendues.

L'objet étudié est une unité d'habitation. Il répond donc au besoin de logement. Les éléments du programme sont repris ici. La situation géographique est la région toulousaine. Les points principaux du programme qui intéressent la question sont les suivants. Le type de logement est une maison individuelle, d'une surface de 91 m², soit la surface moyenne du logement français en métropole (source INSEE). La proposition doit présenter un logement de type 5 constitué d'un grand séjour et de 4 pièces supplémentaires. La conception doit permettre une réponse proche des conditions de la réglementation thermique RT 2012 pour le critère énergétique soit une consommation inférieure à 45 kWh/m²/an compte tenu de la zone climatique. L'objectif attendu permet de négliger certaines caractéristiques du logement. En effet, l'étude s'attache à considérer uniquement la phase de construction, maintenance et destruction. Les impacts de la phase d'usage doivent être les plus proches possibles quelle que soit la solution technique retenue. La localisation et les impacts liés aux déplacements des usagers, par exemple, sont ici sans objet. Les contraintes environnementales susceptibles d'avoir un impact sur l'entretien et le vieillissement sont considérées normales.

Phase 2 : élaboration des solutions techniques

Concernant les murs porteurs, l'intégralité des solutions retenues dans la section précédente est reprise. Concernant les autres composants du bâtiment, l'objectif n'étant pas d'étudier leur propre comportement, les solutions retenues seront courantes et toujours identiques d'une solution de mur à l'autre. Les solutions doivent permettre de répondre au programme précisé au sein de la phase 1. Les autres éléments du système sont considérés comme restant identiques par ailleurs afin de garantir les conditions des comparaisons. Les interactions des différentes solutions techniques, susceptibles de modifier les résultats de la comparaison, doivent être caractérisées. La maintenance nécessaire pour le maintien des performances des différentes solutions techniques envisagées doit être intégrée aux calculs lors des simulations.

Phase 3 : choix des indicateurs observés et sources de données

Cette phase consiste à choisir les indicateurs étudiés et les sources de données. Cette étude étant le prolongement de celle réalisée pour l'unité de mur, les indicateurs et les sources de données sont conservés.

Phase 4 : évaluation des durées de vie des solutions proposées

Les durées de vie des différentes solutions techniques pour la structure du logement sont fixées par hypothèse afin de réaliser les simulations. Ces durées sont établies « à dire d'expert ». Dans cette phase, le principe de dépendance décrit par la *Figure 10* est respecté.

Phase 5 : simulations et analyses des comportements des différentes solutions techniques en regard des indicateurs retenus

Sur la base des informations précédentes, à l'aide d'un tableur, les simulations d'impacts de GES et du coût global (hors coût d'usage) du logement sont réalisées pour chaque solution technique retenue et pour la durée de la fonction de logement.

Les résultats attendus à propos des impacts environnementaux sont :

- l'évolution des indicateurs dans le temps ;
- la grandeur d'échelle dans la confrontation des solutions extrêmes ;
- la différence des résultats extrêmes de solutions n'est pas commensurable. Pour cette raison, il est établi une équivalence d'impact avec la fonction de transport automobile.
- la simulation considérant la durée de vie des solutions variable. La durée de vie n'étant pas objectivable, nous réalisons les calculs d'impact sur les GES en considérant la durée de vie des solutions variables. Afin de ne pas réaliser des simulations aux résultats purement théoriques et irréalistes, la « variabilité » de la durée de vie, ne s'applique qu'aux composants de la structure porteuse : soubassement et murs porteurs. Il est admis, dans un premier temps, qu'à chaque démolition /reconstruction des murs porteur, les fondations sont reconstruites. Les autres composants conservent les durées de vie « à dire d'expert » initialement fixées. Ces simulations permettent l'analyse précise de l'importance de la variable « durée de vie » des solutions techniques. De plus, elles permettent la comparaison des solutions entre elles sur la base d'un impact identique. Enfin, sur la base de prix du marché, l'impact de la durée de vie d'un bâtiment est mis en rapport de l'économie que procure l'investissement.

- la hiérarchisation des différents composants du logement
Dans cette phase, sur la base d'une hiérarchisation des impacts des différents composants, la stratégie de réduction des impacts peut-être étudiée ;

- le bénéfice du découplage des composants
Dans cette étape, après avoir émis l'hypothèse d'une possibilité de « découplage » des composants les plus émissifs, les calculs seront repris sur la base d'un prolongement de durée de vie de ces composants. Afin d'alléger les calculs, seules les solutions ossature bois, pierre, blocs de béton creux et béton cellulaire ont été évaluées. Les choix des solutions analysées sont basés sur des performances extrêmes ou des solutions fréquentes. Les nouveaux résultats sont comparés.

A propos des impacts économiques

Sur le même principe méthodologique que précédemment, l'évolution des coûts est simulée. Les résultats attendus concernent :

- la simulation de l'évolution des coûts ;
- l'évolution des coûts en fonction de la durée de vie variable des solutions;
- l'évolution de la rentabilité en fonction de la durée de vie.

Phase 6 : **Discussion**

A partir des résultats précédemment obtenus, les analyses sont réalisées.

Phase 7 : **Approche sociale**

En assumant l'hétérogénéité dans l'analyse, la démarche consiste à réaliser un inventaire structuré des pistes d'impacts. La démarche est réalisée au travers de trois axes. Le premier comprend l'analyse des impacts quantifiables que sont les impacts sanitaires, les externalités et le parc de logements sociaux. Le second traite des approches des faits culturels, patrimoniaux et affectifs. Enfin, le troisième met en perspective l'impact de la durée de vie du logement dans son rapport à l'environnement bâti constitué par l'îlot urbain.

Synthèse :

L'échelle du bâtiment permet :

- de vérifier la similitude des comportements à l'usage grâce aux logiciels d'évaluation thermique. Cette opération permettra la vérification du respect de la clause « ceteris paribus ». En ce qui concerne le comportement de consommation d'énergie pour le confort d'hiver, une résistance thermique identique est vérifiée. Pour le confort d'été, la nécessité d'un rafraîchissement et la consommation associée sera intégrée aux résultats si cela est nécessaire;
 - de comparer les parts relatives d'impacts des différentes phases en fonction de la durée de vie et des solutions techniques choisies
 - de mettre en évidence l'importance relative des impacts du choix des solutions techniques en fonction de la durée de vie;
 - de mettre en évidence les grandeurs d'échelle des impacts.
 - de hiérarchiser les composants du bâtiment en fonction de leurs impacts. Ce qui peut permettre une stratégie d'analyse et d'amélioration au sens d'une optimisation de Pareto ;
- Et enfin,
- de fournir les informations permettant les décisions stratégiques

Conclusion

Dans ce chapitre, les objets d'étude et les échelles de l'évaluation ont été précisément délimités. Les indicateurs évalués et les sources de données sont précisés. Les solutions techniques à comparer, précisément définies, sont identiques dans la réponse qu'elles fournissent en termes de besoin fonctionnel. La neutralisation des impacts à l'usage, vérifiée, doit permettre les comparaisons, *ceteris paribus*, des solutions techniques en qui concerne les impacts de la production, la maintenance et la fin de vie. Les résultats attendus doivent permettre d'évaluer tout particulièrement les conséquences de la durée de vie du bâtiment sur les indicateurs retenus, à savoir les gaz à effets de serre et le facteur économique. Enfin, les conséquences sociales de la durée de vie d'un bâtiment peuvent être inventoriées.

CHAPITRE III : APPLICATION - ETUDE DE L'UNITE DE MUR ET DU BATIMENT

Le chapitre précédent justifie et précise notre méthode de travail. Nous allons maintenant l'appliquer. Ce chapitre comprend trois sections. La première permet de justifier le choix d'indicateurs environnementaux. La deuxième étudie le comportement d'un élément du bâtiment, à savoir, une unité de mur extérieur. Enfin, le comportement du bâtiment de logement type est étudié. Cette troisième et dernière section finit par une synthèse des résultats obtenus et une conclusion.

III.1. Le choix des indicateurs environnementaux

Les impacts environnementaux des produits du bâtiment sont nombreux. Leurs justifications ont fait l'objet d'un développement dans le §I.1.2. pages 44 et 47. Il est difficile de réaliser des évaluations avec tant d'indices. Il faut donc en réduire le nombre tout en gardant une représentativité.

Sur la base du regroupement des indicateurs de l'Annexe 3, nous allons chercher à étudier l'impact environnemental à partir de l'indicateur statistiquement le plus représentatif sur la base d'une réduction des éléments obtenue à l'aide d'une analyse en composantes principales ACP) (Bougeard, 2007).

III.1.1. La méthode

La démarche entreprise est une réduction des données en composantes principales. Dans une première phase, pour chaque grand élément d'un bâtiment (planchers, mur porteurs, isolation, charpente...), nous sélectionnons plusieurs produits qui permettent de répondre aux besoins. Ces produits et leur FDES sont présentés dans le tableau ci-après.

Produits	Référence FDES	Vérification ¹⁸	Date
Bloc de béton creux	Mur de petits éléments de béton creux	Vérifiée	Septembre 2006
Béton cellulaire	Mur en maçonnerie de blocs en béton cellulaire d'épaisseur 25 cm	BIO Intelligence Service	Novembre 2007
Plaque de plâtre	Plaque de plâtre	Pas de tierce partie	Septembre 2008
Plancher Hourdis	Plancher Hourdis	Pas de tierce partie	
Enduit minéral	Mortier d'enduit minéral	ECOBILAN	Janvier 2007
Isolation	ISOCONFORT 35 épaisseur 220mm LV	ECOBILAN+ Vérifiée	Janvier 2006
Tuiles de terre cuite	Tuile Terre Cuite	Pas de tierce partie	Juillet 2005
Béton Banché	Mur en béton XF1 C25/30 CEM II avec complexe de doublage thermo-acoustique	ECOBILAN	Octobre 2007
Brique multi alvéolaire	Monomur 30 cm à joint mince en terre cuite	Vérifiée	Octobre 2009
Charpente traditionnelle	Charpente traditionnelle bois (Chêne ou Résineux)	Vérifiée	Juin 2009
Menuiserie	Fenêtre et porte-fenêtre en Pin sylvestre	Vérifiée	Mars 2008
Pierre	Élément de maçonnerie en Pierre de Noyant	Pas de tierce partie	Juin 2010

Tableau 18 : Inventaire des produits et des FDES correspondantes produits

Plusieurs produits correspondent à la solution technique des murs (bloc de béton creux, béton cellulaire, brique multi alvéolaire, béton banché et pierre) tandis que d'autres produits répondent à d'autres fonctions du bâtiment de logement (plaque de plâtre, plancher hourdis, isolation, tuile, charpente et menuiseries).

Ensuite, nous collectons les données des produits fournies par les FDES et reprises dans le tableau ci-après.

¹⁸ Le protocole prévoit la possibilité de présenter la FDES comme « vérifiée » selon les modalités mises en place par l'AFNOR

	Energie primaire totale (MJ)	Energie renouvelable (MJ)	Energie non renouvelable (MJ)	Energie primaire procédée (MJ)	GES (kg éq CO2)	Déchets dangereux (kg)	Déchets non dangereux (kg)	Déchets inertes (kg)	Déchets radioactifs (kg)	Pollution de l'air m ³	Pollution de l'eau m ³	Acidification (kg éq SO2)	Epuisement des ressources (kg éq antimoine Sb)	Eau (Litre)	Déchets valorisés (kg)	ozone photochimique (kg éq éthylène)
Béton creux	174	15	158	166	16	1,25E-02	0,867	236	1,49E-03	1673	7,83	7,16E-02	5,74E-02	83	0,617	6,65E-03
Béton cellulaire	485	29	457	479	40	4,00E-02	3	91	1,07E-03	2234	56	1,00E-01	1,57E-01	267	9	2,67E-03
Plaque de plâtre	49,75	1,925	46,7	47,7	2,8	4,64E-02	12,1	0,11	2,22E-04	213,5	2,32	1,30E-02	1,92E-02	18,75	0,068	1,48E-03
Plancher Hourdis	456	11,1	445	333	31	4,70E-02	3,04	115	2,12E-04	2030	11,7	1,50E-01	1,23E-01	129	64,1	1,61E-02
Mortier	61,5	8,8	53	45,7	5,15	4,10E-03	24,15	0,21	4,75E-04	290	3,47	1,90E-02	1,89E-02	23,2	0,79	2,42E-03
Isolation	128	24,3	104,5	0	4,16	3,78E-03	4,645	0,004	7,50E-04	670	1,3	5,80E-02	3,00E-02	33,7	0,3785	4,21E-03
Couverture	185	0,248	184	178,4	9,3	4,79E-03	0,912	46	7,60E-04	601	21,7	3,46E-02	6,74E-02	21,7	0,512	3,70E-03
Banché	878	25,6	853	716	65,1	7,39E-02	25	242	4,78E-03	639	2,96	2,83E-01	3,33E-01	335	168	2,29E-03
Brique multi alvéolaire	824	115	709	787	41,3	2,61E-02	0,135	262	3,03E-03	2884	11,2	9,46E-02	2,37E-01	67,7	2,64	2,67E-03
Charpente	1320 0	9100	4090	4397	-0,048	2,21E-01	539	4,88	5,02E-02	2380	47,7	1,15E+0 0	9,02E-01	965	1300	9,17E-02
Menuiserie	1191	363	831	878	23,49	5,43E-01	11,76	16,98	3,99E-03	3720	72	2,31E-01	2,48E-01	187,8	23,43	0,00E+00
Pierre	328	69,8	258	259	24	6,90E-02	0,244	38	2,42E-03	2240	3,46	1,46E-01	9,20E-02	60,4	526	0,00E+00

Tableau 19 : Valeurs des indicateurs contenues dans le volet environnemental des FDES

L'étape suivante consiste à réaliser une réduction sur la base d'une corrélation des valeurs d'indicateurs.

III.1.2. Les résultats

Les produits à base de bois tels que la charpente ont un profil de performance très différent des autres produits. Par exemple, les modalités de calculs des émissions de Gaz à Effets de Serre (GES) procurent à ces produits des comportements très spécifiques avec des valeurs négatives. Pour l'analyse en composantes principales, ce produit est écarté.

La mise en relation des valeurs d'indicateurs des autres produits présente les valeurs de corrélations suivantes :

	Energie primaire tot(MJ)	Energie renouvelable (MJ)	Energie non renouvelable (MJ)	Energie primaire procédé (MJ)	GES (kg éq CO2)	Déchets valorisés (kg)	Déchets dangereux (kg)	Déchets non dangereux (kg)	Déchets inertes (kg)	Déchets radioactifs (kg)	Pollution de l'air (m ³)	Pollution de l'eau (m ³)	Acidification (kg éq SO2)	Epuisement des ressources Sb	Eau (L)	Kg éq éthylène
Energie primaire tot	1,00															
Energie renouvelable	0,77	1,00														
Energie non renouvelable	0,98	0,61	1,00													
Energie primaire procédé	0,98	0,69	0,98	1,00												
GES	0,71	0,13	0,84	0,77	1,00											
Déchets valorisés	0,07	0,02	0,08	0,05	0,25	1,00										
Déchets dangereux	0,72	0,95	0,57	0,61	0,10	0,01	1,00									
Déchets non dangereux	0,14	0,02	0,16	0,08	0,16	-0,09	0,17	1,00								
Déchets inertes	0,39	-0,10	0,51	0,50	0,71	-0,03	-0,21	-0,10	1,00							
Déchets radioactifs	0,84	0,60	0,84	0,83	0,70	0,32	0,54	0,28	0,48	1,00						
Pollution de l'air	0,72	0,77	0,63	0,72	0,36	0,16	0,64	-0,42	0,23	0,46	1,00					
Pollution de l'eau	0,58	0,71	0,63	0,56	0,16	-0,23	0,74	-0,11	-0,17	0,26	0,66	1,00				
Acidification	0,83	0,51	0,86	0,77	0,78	0,39	0,57	0,27	0,37	0,83	0,47	0,32	1,00			
Epuisement des ressources	0,93	0,50	0,98	0,95	0,90	0,12	0,46	0,23	0,58	0,88	0,51	0,38	0,86	1,00		
Eau	0,67	0,23	0,76	0,68	0,85	0,09	0,32	0,33	0,42	0,62	0,29	0,45	0,80	0,80	1,00	
Ozone	0,37	-0,15	0,51	0,35	0,71	0,17	-0,03	0,58	0,49	0,57	-0,26	-0,22	0,68	0,63	0,70	1,00

Tableau 20 : Matrice de corrélations

	Corrélation très forte : 0,90 à 1
	Corrélation forte : 0,80 à 0,90

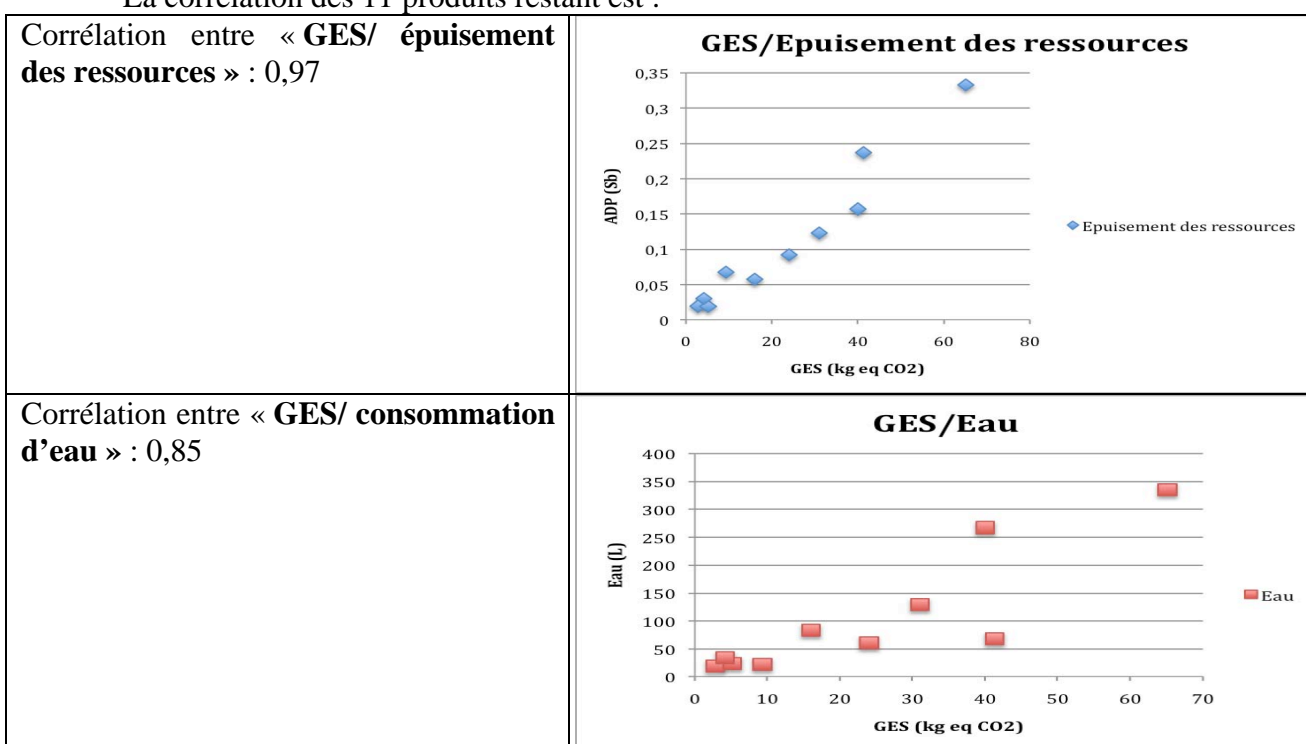
Cette matrice laisse apparaître des corrélations très fortes entre :

- énergie non renouvelable/Energie primaire ;
- énergie primaire procédé/Energie primaire ;
- épuisement des ressources /Energie primaire ;
- épuisement des ressources /Energie non renouvelable ;
- épuisement des ressources / Energie primaire procédé ;
- épuisement des ressources / GES ;
- et enfin
- entre les déchets dangereux et l'indicateur « Energie renouvelable ».

Il n'y a pas vraiment d'indicateur révélateur des autres au travers de cette première analyse.

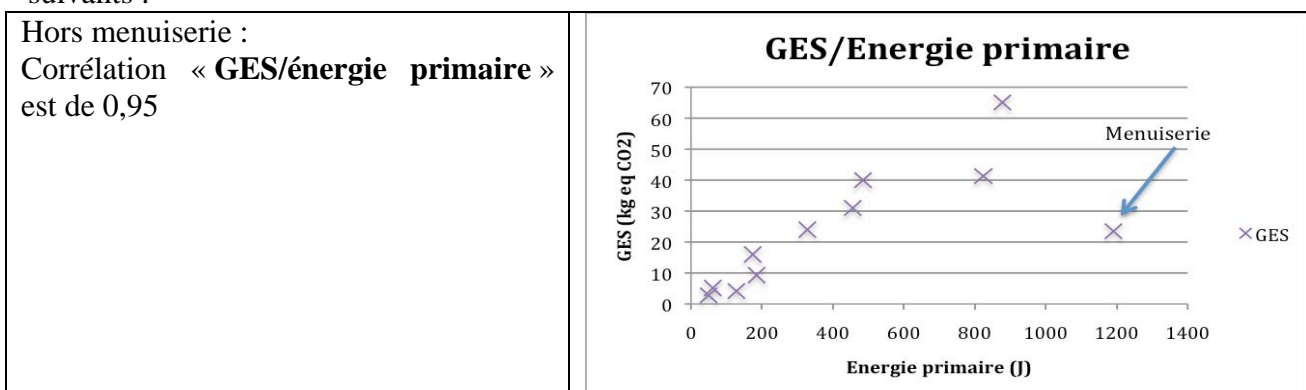
Nous allons tenter de réduire les indicateurs autour de celui des émissions de GES.

La corrélation des 11 produits restant est :

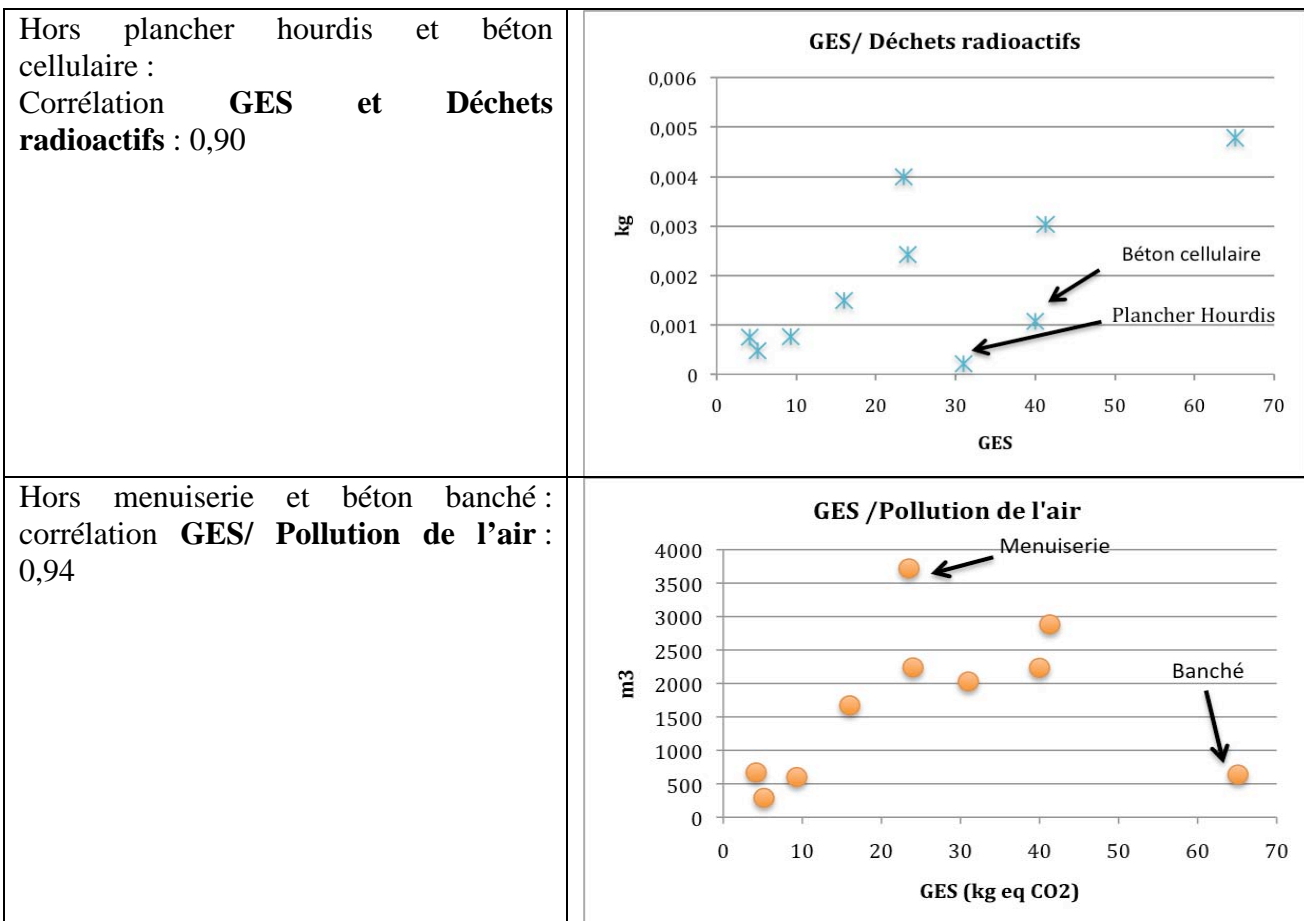


Nous pouvons donc considérer l'indicateur GES corrélé à l'indicateur d'épuisement des ressources et à la consommation d'eau.

Une fois le produit « menuiserie » écarté, les coefficients de corrélation sont les suivants :



<p>Hors menuiserie : Corrélation « GES/énergie procédé » est de 0,93</p>	<p style="text-align: center;">GES/ Energie primaire procédé</p>
<p>Hors menuiserie : Corrélation « GES/énergie non renouvelable » est de 0,97</p>	<p style="text-align: center;">GES/ énergie non renouvelable</p>
<p>Hors menuiserie : Corrélation « GES/acidification » est de 0,88</p>	<p style="text-align: center;">GES/Acidification</p>
<p>Hors pierre et brique multi alvéolaire : corrélation des GES et déchets valorisés de 0,86</p>	<p style="text-align: center;">GES/Déchets valorisés</p>



Il n'apparaît pas de corrélation entre les GES et les déchets dangereux, l'énergie renouvelable, les déchets non dangereux, les déchets inertes et la pollution de l'eau.

Par ailleurs, il n'existe pas non plus de corrélation entre l'indicateur « Energie renouvelable » et les autres...

Il n'existe pas de corrélation entre l'indicateur « déchets non dangereux » et les autres.

Enfin, la suppression de la plaque de plâtre permet de présenter une corrélation entre l'indicateur des déchets dangereux et l'acidification de 0,90.

III.1.3. L'analyse

Analyser le comportement de l'indicateur GES dans nos simulations permet statistiquement d'observer le comportement général de 9 des 14 indicateurs constituant les FDES avec une sensibilité très correcte. En effet, après avoir écarté de un à trois produits « déviants » sur les 12 sélectionnés, l'indicateur GES est corrélé avec 9 autres indicateurs. Les corrélations se situent dans une fourchette allant de 0,85 à 0,97. Ces indicateurs sont :

- l'énergie primaire ;
- l'énergie primaire procédé ;
- l'énergie non renouvelable ;
- les déchets valorisés ;
- les déchets radioactifs ;
- la pollution de l'air ;
- l'acidification ;
- l'épuisement des ressources ;
- la consommation d'eau.

Ces corrélations pourraient faire l'objet d'une analyse approfondie mais l'objectif n'est pas ici de les comprendre mais de les utiliser.

Par ailleurs, le choix de cet indicateur est cohérent. En effet, il est l'un des signes les plus médiatisés des actions de l'homme sur la planète et il en est devenu le symbole. Rappelons que le quatrième rapport du GIEC en 2007 ne laisse aucun doute quant à la responsabilité des GES sur le changement climatique.

III.1.4. Les limites

L'analyse en composante principale est réalisée sur la base de produits variés constituant le logement. Ce choix peut être critiqué puisque l'étape suivante vise l'analyse du comportement d'une unité de mur. L'exercice aurait pu reposer dans un premier temps sur les produits des différentes solutions techniques de mur et une nouvelle ACP pourrait être réalisée à l'échelle du logement.

Tout d'abord, avec l'objectif d'une cohérence nécessaire à l'extension de la méthode de l'unité de mur au logement type, la conservation d'un même indicateur environnemental s'impose. Nous avons donc choisi d'analyser simultanément différents produits participant à la constitution d'un mur ainsi que d'autres composants du logement. Les résultats de comportement proches en termes d'indicateurs et donc d'impacts de produits très différents permet l'analyse du logement dans sa globalité.

Par ailleurs, le choix d'un indicateur ne compromet nullement l'application de la méthode à d'autres indicateurs. Rappelons que cette première étape n'a pour objet que le choix d'un indicateur environnemental le plus représentatif soit les émissions de GES. La méthode présentée par la suite peut être exploitée pour :

- les déchets dangereux ;
- l'énergie renouvelable ;
- les déchets non dangereux ;
- les déchets inertes ;
- la pollution de l'eau.

L'analyse de comportement de tous ces indicateurs pour le mur puis le bâtiment permettrait un bilan complet de l'impact de la durée de vie sur l'environnement.

En résumé, étudier le comportement des émissions de GES permet d'étudier simultanément les GES, les consommations d'énergie primaire, d'énergie primaire procédé, d'énergie non renouvelable, de la production des déchets valorisés, des déchets radioactifs, la pollution de l'air, l'acidification, l'épuisement des ressources, et enfin la consommation d'eau des produits.

III.2. Etude d'une unité de mur porteur extérieur

III.2.1. Développement de la méthode

La méthode utilisée dans ce chapitre est représentée schématiquement dans le § II.3.3 du chapitre II page 106.

A. Définition de l'élément étudié

A.1 Analyse du besoin et éléments du cahier des charges fonctionnel (phase n°1)

Le cahier des charges de la fonction de l'unité de mur a fait l'objet d'un développement précis dans résumé dans le tableau suivant :

Réf	Fonctions	Critères des fonctions	Niveau des critères
FI1	Permettre la reprise de l'ensemble des charges et forces auxquels il est soumis	- Masses - Forces latérales de vent - Contraintes dues aux ouvertures	- Conforme à l'EUROCODE EN 1990 : 2002 Cat A
FI2	Protéger les biens et les personnes des éléments extérieurs	- Résistance au vent - Résistance à la pluie - Résistance au froid - Résistance à la neige - Permettre le confort d'été - affaiblissement acoustique (Nouvelle Réglementation Acoustique arrêté du 30 mai 1996) - Résistance au feu - Résistance à l'intrusion	- Niveau local et norme européenne : EUROCODES structuraux NF EN 1990 Fonction du niveau local niveau local ¹⁹ - Atténuation >50dB(A) aérien - EUROCODE (voir EN 1991-1-2) > A2P***
FI3	Permettre le confort et limiter les impacts sur l'environnement	- Limitation des déperditions thermiques - Limitations des fuites d'air - Température superficielle et effusivité - Confort d'été	- R = 5 (cible : RT 2012) - Norme NF EN 13829 pour le logement global
FA1	Être agréable à l'œil et favoriser la sensation désirée	- Aspect/ finitions - Propriocepteurs - Mémoire	Conforme à la culture locale
FA2	Permettre la pose d'ouvertures	- Intégration des ouvertures	< à 2m sans reprise
FA3	Résister à l'environnement extérieur	- La pollution - La sismicité	- Niveau local*
FA4	Faciliter l'entretien		
FA 5	Participer au patrimoine		

Tableau 21 : Cahier des charges du mur extérieur

Contraintes : Économique
Technique
Réglementaire

¹⁹ Le niveau local est considéré dans la moyenne normale française soit sans particularité nécessitant des mesures spécifiques

Le tableau ci-dessus présente des fonctions

FI : Fonction d'interaction

FA : Fonction d'adaptation

Les solutions techniques qui seront proposées doivent répondre à ces fonctions.

A.2 Présentation des différentes solutions techniques (phase n°2)

Les solutions acceptables en réponse au cahier des charges sont résumées dans le tableau ci-dessous. Les détails et les précisions concernant les produits participant aux solutions ainsi que leurs caractéristiques techniques sont fournis dans les **Annexe 8** et

Annexe 9.

L'ensemble des solutions correspond à la figure ci-dessous.

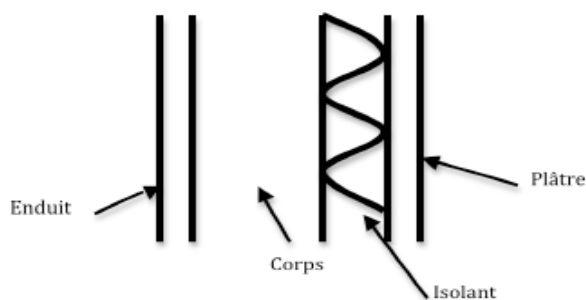


Figure 16 : Coupe du mur

Finition extérieure	Corps (Elément porteur)	Isolant	Finition intérieure
enduit minéral	bloc béton creux 200mm	180 mm isolant LV ²⁰	plaque de plâtre
enduit minéral	structure bois	190mm isolant LV	plaque de plâtre
enduit minéral	brique multi alvéoles 300mm	100mm d'isolant LV	plaque de plâtre
-	pierre de Noyant	190 mm isolant LV	plaque de plâtre
enduit minéral	béton cellulaire 200 mm	60 mm isolant LV	plaque de plâtre
enduit minéral	brique terre cuite pleine	160mm d'isolant LV	plaque de plâtre
enduit minéral	béton banché +80mm PSE	80mm PSE + 90mm LV	plaque de plâtre
enduit minéral	terre crue 400 mm	190 mm isolant LV	plaque de plâtre

Tableau 22 : Solutions techniques répondant au cahier des charges

Ces solutions techniques ont le même coefficient d'isolation thermique $R=5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. Il est impossible d'agir simultanément sur l'isolation thermique et l'inertie tout en garantissant des conditions proches de confort. Le facteur de l'inertie est d'autant plus difficile à contrôler que son effet sur le confort est encore mal connu qu'il s'agisse de confort d'hiver ou d'été. La prise en compte de l'inertie des matériaux dans les outils d'évaluations est à améliorer (CETE Est, 2010). Lorsqu'il n'est pas possible de neutraliser les différences de caractéristiques physiques des solutions techniques, les variations résultantes à l'usage doivent être intégrées dans l'évaluation globale. Des hypothèses restrictives sont nécessaires compte tenu de limite de prise en compte de certains phénomènes pour laquelle la modélisation n'est pas encore aboutie.

²⁰

LV : Laine de verre

Les solutions techniques proposées doivent entraîner une réflexion sur la nature des impacts de ces solutions sur les autres éléments du système ainsi que sur la maintenance imposée par le choix pour le maintien des performances.

Nous admettons que :

- que la solution pierre ne soit pas revêtue d'un enduit de mortier ;
- que l'isolant retenu quelle que soit la solution est la laine de verre ;
- que le strict respect de la fonction isolante, neutralisant la consommation durant la phase d'exploitation, implique dans certains cas l'ajout d'une faible épaisseur d'isolant. Si cette proposition de conception n'est pas réaliste en phase de production du bâti, elle est conservée dans un objectif de rigueur scientifique ;
- que la prise en compte de l'impact GES du pare vapeur se fasse au prorata de l'épaisseur de l'isolant ;
- que les phénomènes de convection thermique à l'intérieur du mur et de perméabilité soient négligés ;
- que les phénomènes de déphasages soient négligés ;
- que d'éventuels impacts des transferts internes de vapeur sur le confort soient négligés ;
- que le système d'accrochage de l'isolant ne soit pas pris en compte car différents supports existent tandis que les FDES correspondantes sont inexistantes ;
- que l'isolant soit toujours considéré posé à l'intérieur ;
- que les solutions techniques sélectionnées n'ont pas d'impact sur les autres éléments du système. Par exemple, les impacts des ponts thermiques variables d'une solution à l'autre sont négligés.

Remarque : il est admis l'absence d'enduit extérieur pour la solution « pierre ». En effet, les enduits minéraux ont en général pour objectif principal l'imitation de l'aspect « pierre ». Bien que la grande souplesse des produits et techniques de mise en œuvre ait amené de la variété dans les rendus, cette hypothèse restrictive a été conservée. L'enduit d'un mur « pierre » sain ne peut se justifier.

A.3 Durées de vie des solutions proposées (phase n°3)

Les durées de vie retenues en hypothèses sont présentées dans le tableau suivant.

Type de mur	Durée de vie	Sources
Isolant LV	40-60	Fabricants et chercheurs
Parement enduit	25-35	Directeur technique Sté HLM et professionnels
Pierre	500-1000	Sur existant
Ossature bois	60-80	Chargé de mission - Patrimoine culturel architectural Québec/ Praticien
Béton banché	180- 220	Ingénieur béton (DDVT : 100 ans)
Brique pleine terre cuite	250-350	Sur existant
Blocs béton creux	100	Constructeur
Béton cellulaire	100	Constructeur
Terre crue	250-350	Sur existant
Brique multi alvéolaires	100	Constructeur

Tableau 23 : Durées de vie retenues en hypothèse – Unité de mur

Remarque : s'il est admis sur le principe de la théorie de la logique floue, un intervalle pour les durées de vie, par soucis de simplification, les durées de vie retenues pour les calculs sont une moyenne de l'intervalle.

B. Définition des données utilisées (Phase n°4)

B.1 Données environnementales : valeurs d'indicateur de GES

Les valeurs des indicateurs de GES des différents produits, évaluées en analyse de cycle de vie complet, sont retranscrites dans le tableau ci-dessous.

Produit	Kg éq CO2 en ACV
Bloc béton creux	16
Multi alvéoles 30cm à joint mince	41,3
Brique pleine (KBOB-ECOINVENT) ²¹	84,72
Mortier d'enduit	5,13
Terre crue 30cm ²²	7,5
Ossature bois (KBOB-ECOINVENT ²³) (OSB : 3,32, Pare Air : 0,05)	9,89 ²⁴
Ossature bois (valeur INIES ²⁰) (OSB = -7,56 ; Pare air = 0,05)	-18,27
Béton banché 16cm +80mm PSE	65,1
Dalle de pierre naturelle rectifiée	9,6
Béton cellulaire 25cm	40
Laine de verre (cm)	0,309
Plaque de plâtre	2,8

Tableau 24 : Valeurs des indicateurs de GES des produits

B.2 Données économiques : valeurs des coûts

Les prix de ventes sont retranscrits dans le tableau ci-dessous.

Coût (Euro)	Prix de vente	Prix Fournitures	Prix Main d'œuvre	Rénovation doublage	Déconstruction
Type de mur					
Bloc béton creux	158,03	45,23	63,77	81,69	19,16
ossature bois	210,79	87,76	61,35	58,27	11,74
Brique pleine terre cuite	323,50	108,65	114,48	78,12	18,46
Brique multi alvéoles	169,21	170,16	53,44	67,24	19,86
Béton banché	214,92	89,73	43,77	67,24	19,16
Pierre	251,22	106,90	66,38	81,69	19,86
Terre crue	275,10	82,48	107,26	81,69	18,47
Béton cellulaire	177,55	62,57	59,88	68,69	13,46
Enduit	26,85	4,09	14,43	-	-

Tableau 25 : Prix des fournitures en euros (Source Batiprix-2010- Ed Le Moniteur)

²¹ Ce produit ne faisant pas parti de la base INIES, l'indicateur officiel n'existe pas. Nous empruntons la valeur à la base de données KBOB-ECOINVENT

²² Indicateur non présenté dans INIES mais provenant du résultat provisoire du projet de recherche TERCRUSO qui porte sur les briques crues de la vallée de la Garonne

²³ Ce produit n'existant pas dans les bases INIES et KBOB, il a été l'objet d'un calcul par nos soins sur la base de produits existants.

²⁴ Il est considéré que passé les 300 ans, la pierre continuera d'être utilisée. La valeur est donc calculée au prorata de la durée de vie

Comme le préconise la norme ISO 15686-5, nous ne prenons pas en compte l'inflation. Nous évaluons la sensibilité des prix des produits au facteur de l'énergie afin de voir s'il est utile de distinguer l'impact de la durée de vie des produits énergivores des produits non énergivores.

III.2. 2. Résultats (Phase n°5)

Pour plus de commodité, le référencement des résultats se fait sur la base de la figure suivante :

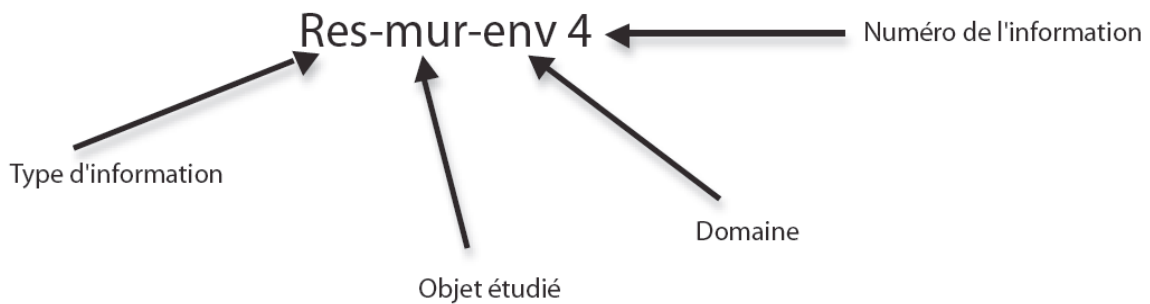


Figure 17 : Référencement des résultats

Les différents éléments de la nomenclature peuvent prendre les résultats listés dans le tableau ci-dessous.

Type d'information	Objets évalués	Domaines	Numéro de l'information	Exemples
Resultat : Res	Mur	Env : environnement	1, 2, 3, ...	Res-Mur-Env- 2
		Eco : économie		Res-Mur-Eco- 5
	Logement : Log	Env : environnement		Res-Log-Env- 15
		Eco : économie		Res-Log-Eco- 19

Tableau 26 : Nomenclature des résultats

Remarque : le numéro de l'information est une valeur absolue. Chaque résultat possède son propre numéro.

A. Simulations des impacts environnementaux - Unité de mur

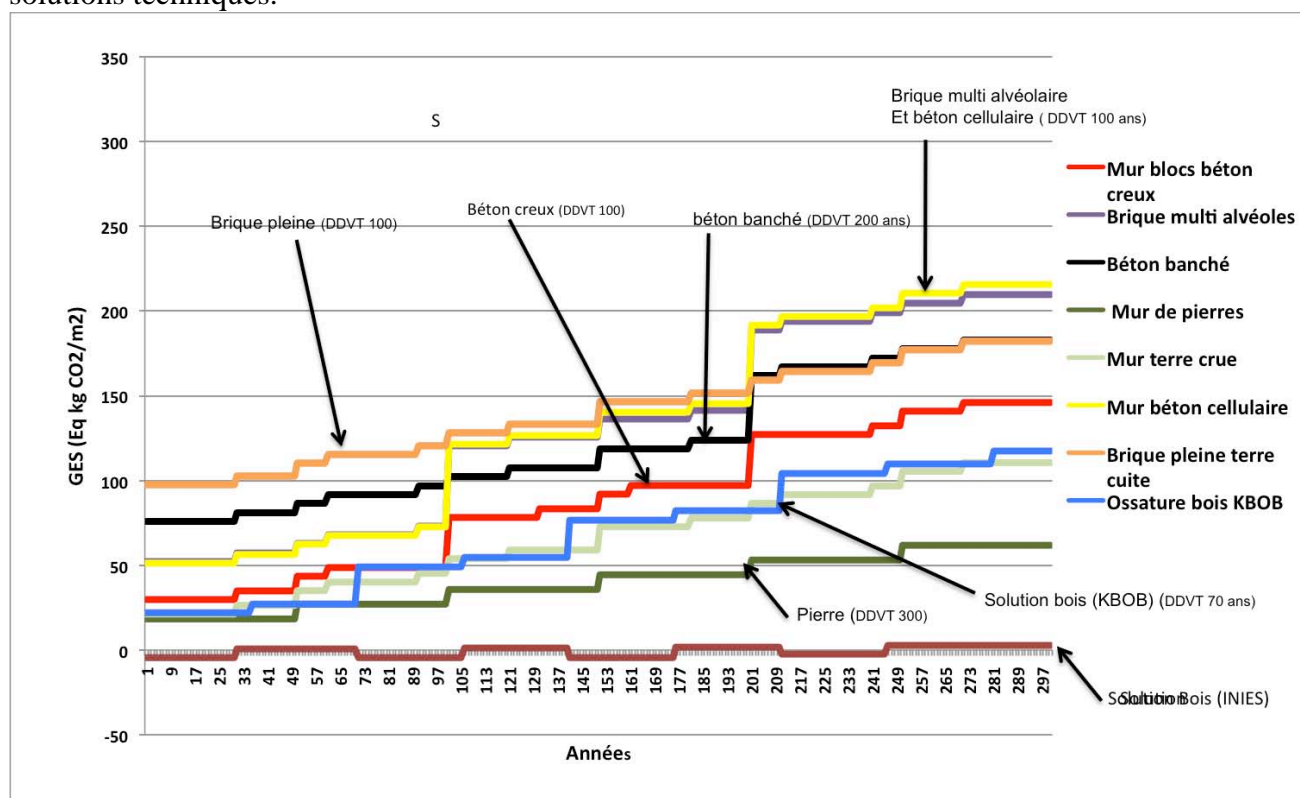
Res-mur-env 1 : Evolutions des émissions de gaz à effet de serre cumulées

Le tableau ci-dessous présente les quantités d'émissions de GES pour chacune des solutions techniques. Les valeurs sont fournies à 50 ans et 300 ans.

Type de mur	kg éqCO ₂ émis à 50 ans	kg éqCO ₂ émis à 300 ans
Ossature bois (ind INIES)	1	3
Pierre	27	62
Ossature bois (ind KBOB-ECO)	28	117
Terre crue	35	111
Blocs béton creux	44	151
Brique pleine	110	182
Béton banché	81	183
Brique multi alvéoles	63	210
Béton cellulaire	62	216

Tableau 27 : Emissions de GES à 50 ans et 300 ans

Le graphique ci-dessous présente l'évolution des émissions de GES des différentes solutions techniques.



Graphique 2 : Evolution des GES sur la durée de la fonction d'usage

Res-mur-env 2 : Part relative d'émissions des isolants et des enduits sur la durée de la fonction

Le **Tableau 28** ci-dessous présente les parts relatives d'émission du corps, de l'isolant et de l'enduit sur la durée de la fonction, soit 300 ans.

Type de mur	Total	kg éqCo ₂ Corps	% du total des émissions	kg éqCo ₂ Isolant	% du total des émissions	kg éqCo ₂ Enduit	% du total des émissions
Ossature bois indice INIES	3	- 78	-	37	-	44	-
Ossature bois indice KBOB	117	44	37	25	27	46	39
Pierre	62	10	16	52	84	-	-
terre crue	111	7	7	52	47	51	46
Béton banché	183	98	53	34	19	51	28
Blocs béton creux	151	49	32	52	34	50	34
Brique terre cuite pleine	182	85	46	46	25	51	28
Brique multi alvéoles	210	124	59	35	16	51	24
Béton cellulaire	216	121	56	43	20	51	24

Tableau 28 : Parts relatives détaillées des émissions des solutions techniques

Res-mur-env 3 : Mise en évidence des incertitudes inhérentes aux indicateurs officiels

Le **Tableau 29** ci-dessous classe les performances techniques, telles que simulées, des solutions par ordre décroissant de performance. Le **Tableau 30**, lui, classe les solutions techniques par ordre décroissant de performance telle qu'affichée au travers des indicateurs officiels.

Type de mur	Rang	EqCo ₂ émis à 300 ans	Indice officiel
Ossature bois indice INIES	1	3	-0,1076
Pierre	2	62	0,1200
Terre crue	3	110	0,075
Ossature bois indice KBOB	4	117	-
Blocs béton creux	5	151	0,1600
Brique terre cuite pleine	6 ^{ème} ex aequo	182	0,2640
Béton banché	6 ^{ème} ex aequo	183	0,651
Brique multi alvéoles	7	210	0,2753
Béton cellulaire	8	216	0,4040

Tableau 29 : Classement des solutions techniques par ordre croissant d'émissions de GES cumulés

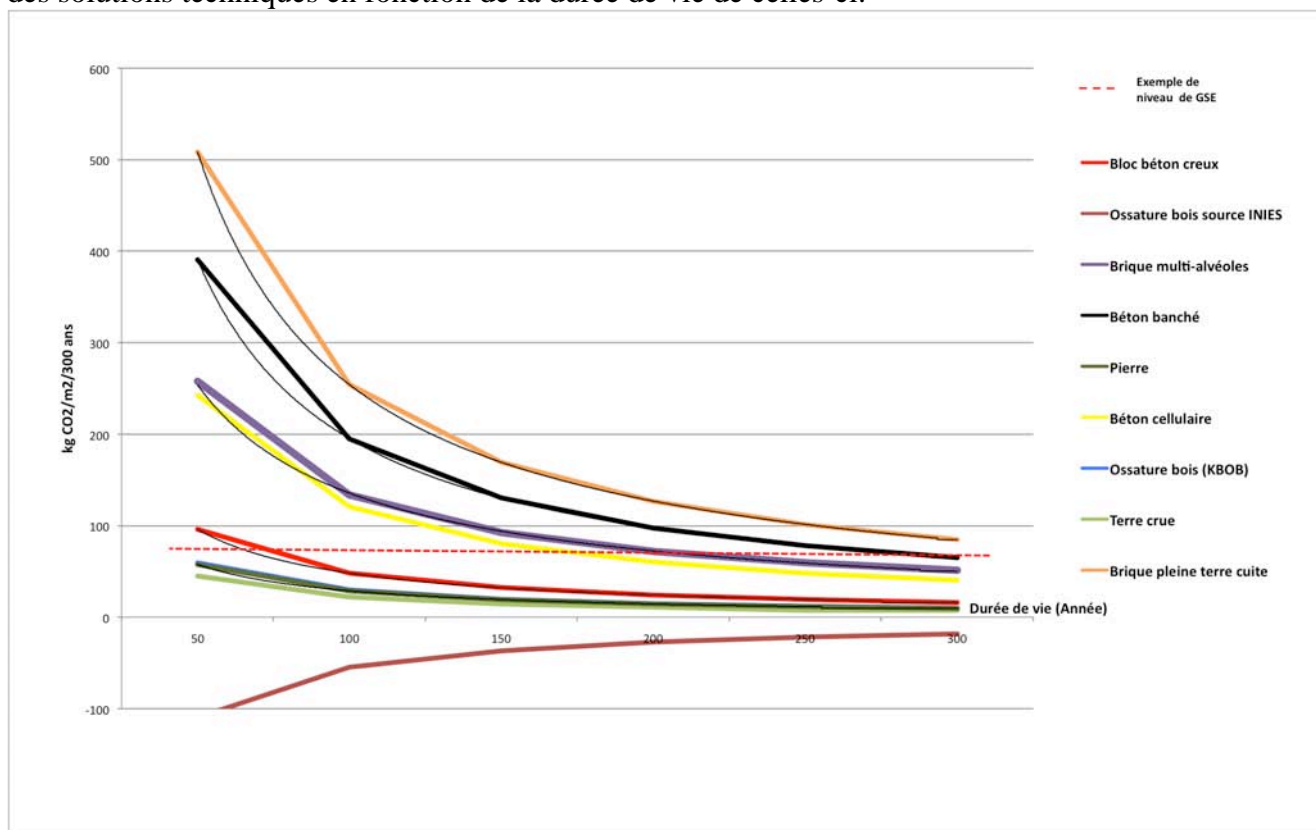
Type de mur	Rang	EqCO ₂ émis à 300 ans	Indice officiel
Ossature bois INIES/KBOB	1 ou 4	3	-0,1076
Terre crue	3	110	0,0750 ²⁵
Pierres	2	62	0,1200
Blocs béton creux	5	151	0,1600
Brique terre cuite pleine	6 ^{ème} ex aequo	182	0,2640
Brique multi alvéoles	7	210	0,2753
Béton cellulaire	8	216	0,4040
Béton banché	6 ^{ème} ex aequo	149	0,650

Tableau 30 : Classement des solutions technique par ordre croissant des indicateurs officiels de GES

2.1.3 Impact de la durée de vie sur les émissions de GES

Res-mur-env 4 : Evolution des émissions (phase 6)

Le graphique ci-dessous présente l'évolutions des émissions de GES de chacun des corps des solutions techniques en fonction de la durée de vie de celles-ci.



Graphique 3 : Evolutions des émissions de GES du corps en fonction de la durée de vie des solutions ²⁶

²⁵ Rappel : Indicateur non présenté dans INIES mais provenant du résultat provisoire du projet de recherche TERCRUSO qui porte sur les briques crues de la vallée de la Garonne.

²⁶ Les courbes « Terre crue » et « Ossature bois – KBOB » sont superposées.

Les résultats obtenus présentent des profils de fonction inverse du type « $y = a/x$ » avec a = constante d'émission liée à la solution et x la durée.

Nous pouvons observer :

- des émissions de GES beaucoup plus réduites pour des prolongements de 50 à 100 ans, à 150 ou à 300 ans;
- la courbe de la solution « bois indice INIES », présente une tendance inversée par rapport aux autres ;

Res-mur-env 5 : Comparaison des solutions techniques

Les tendances des comportements d'émissions de GES des différentes solutions en fonctions de leurs durées de vie sont fournies par les équations de la colonne n°2 du tableau ci-dessous. Pour une émission équivalente de GES, par exemple 75 kg éq CO₂/m², considérant une fonction d'usage de 300 ans, la durée de vie nécessaire de chacune des solutions est donnée dans la colonne n°3 du tableau ci-dessous.

Produits	Equation de tendance ²⁷ (Colonne n°2)	Durée équivalente (Années) (Colonne n°3)
Brique cuite pleine	$y = 508,3x^{-1}$	339
Béton banché	$y = 390,6x^{-1}$	260
Brique multi alvéoles	$y = 253,6x^{-1}$	194
Béton cellulaire	$y = 242,4x^{-1}$	162
Béton creux	$y = 96x^{-1}$	64
Ossature bois (KBOB)	$y = 59,32x^{-1}$	40
Pierre	$y = 57,6x^{-1}$	39
Terre crue	$y = 45x^{-1}$	30

Tableau 31 : Durées de vie des solutions techniques pour des émissions équivalentes

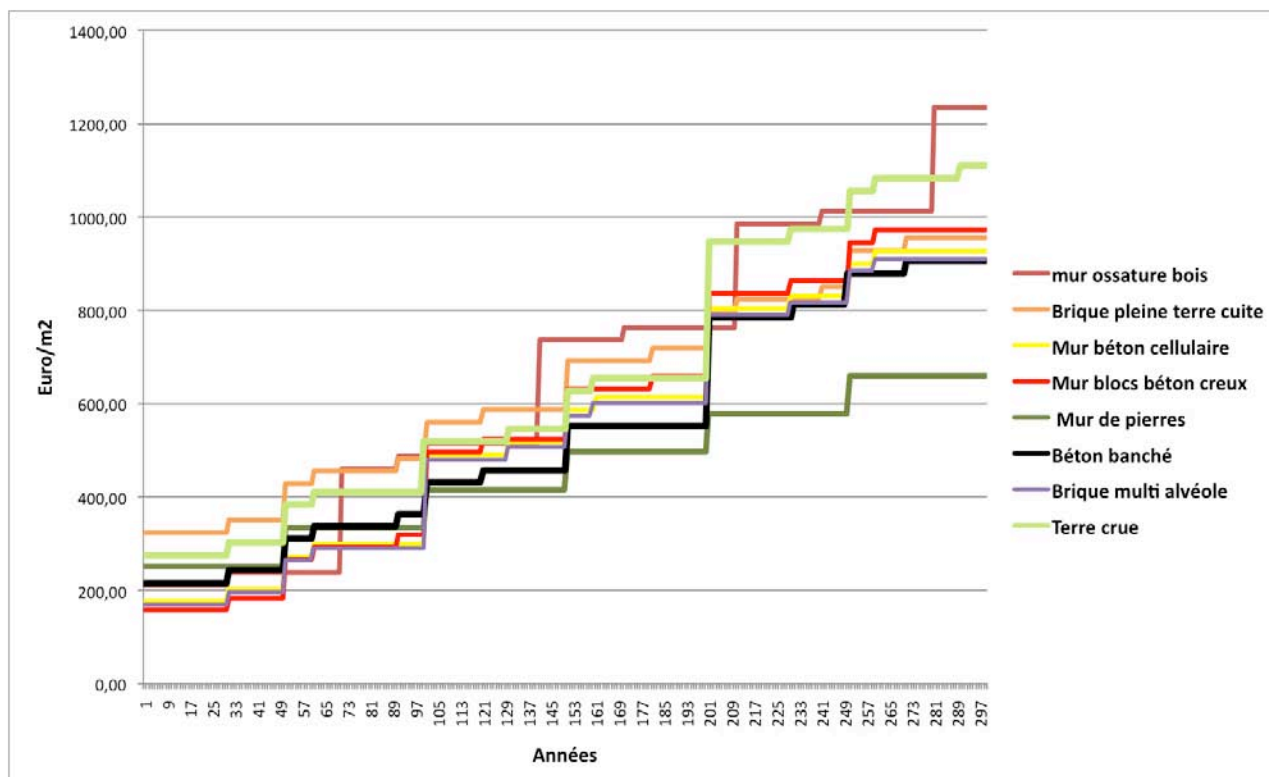
²⁷

Le calcul impose un changement de variable. Si X est le nombre d'année, $X = 50x$

B. Simulation des impacts économiques - Unité de mur

Res-mur-éco 6 : Evolution des coûts cumulés

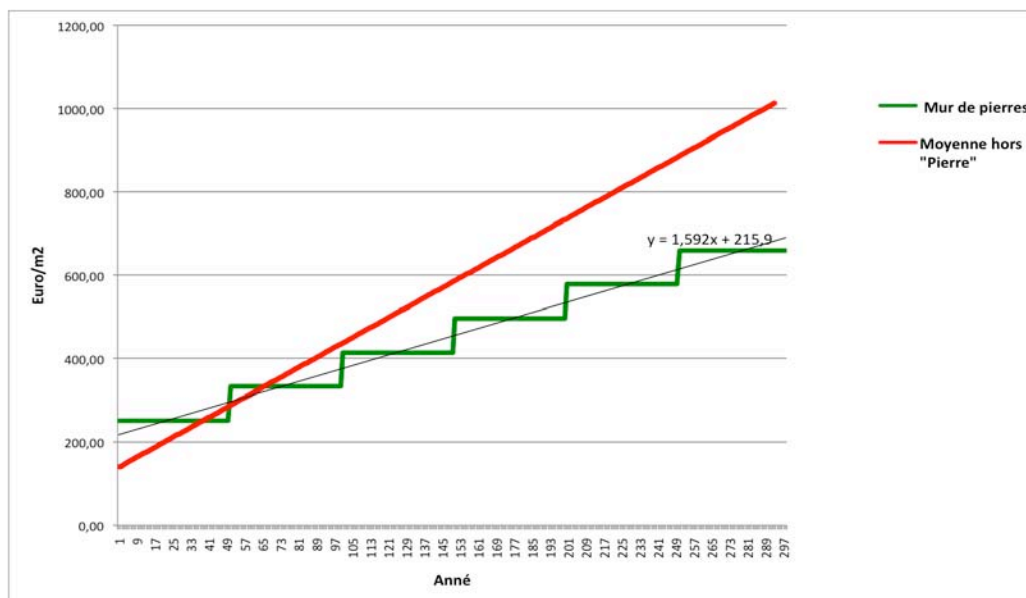
Les simulations économiques de l'unité de mur, basées sur le bordereau de prix « Batiprix » Ed Le Moniteur, fournissent les résultats ci-après. Les simulations ont été établies à partir des données du Tableau 25.



Graphique 4 : Evolution des coûts des différentes solutions

Res-mur-éco 7 : Tendances

L'ensemble des solutions, hormis celle de la pierre, présente un profil semblable. Le Graphique 5 suivant présente la tendance moyenne de cet ensemble et la tendance de la pierre.



Graphique 5 : Tendances économiques de l'ensemble des solutions et de la solution pierre

Res-mur-éco 8 : Corrélation GES/Prix de vente - Qualité des informations

L'idée est ici de chercher une éventuelle corrélation entre le prix de vente des fournitures et les émissions GES eux-mêmes corrélés, rappelons-le, à l'indicateur «énergie procédé».

	Prix Total Fournitures de l'élément du corps du mur (Euro)	Total kg CO ₂ initial
Bloc béton creux	45,23	16,00
Ossature bois	81,76	-18,27
Brique terre cuite pleine	108,65	84,72
Brique multi alvéoles	63,27	41,30
Béton banché	89,73	65,10
Pierre	106,90	24,00
Béton cellulaire	62,57	40,40
terre crue	82,48	7,50
Mortier d'enduit	4,09	5,13
Isolant	10,47	8,65
Coefficient de corrélation :		0,47

Tableau 32 : Corrélation Prix matière/Eq kg CO₂ à la construction des solutions techniques

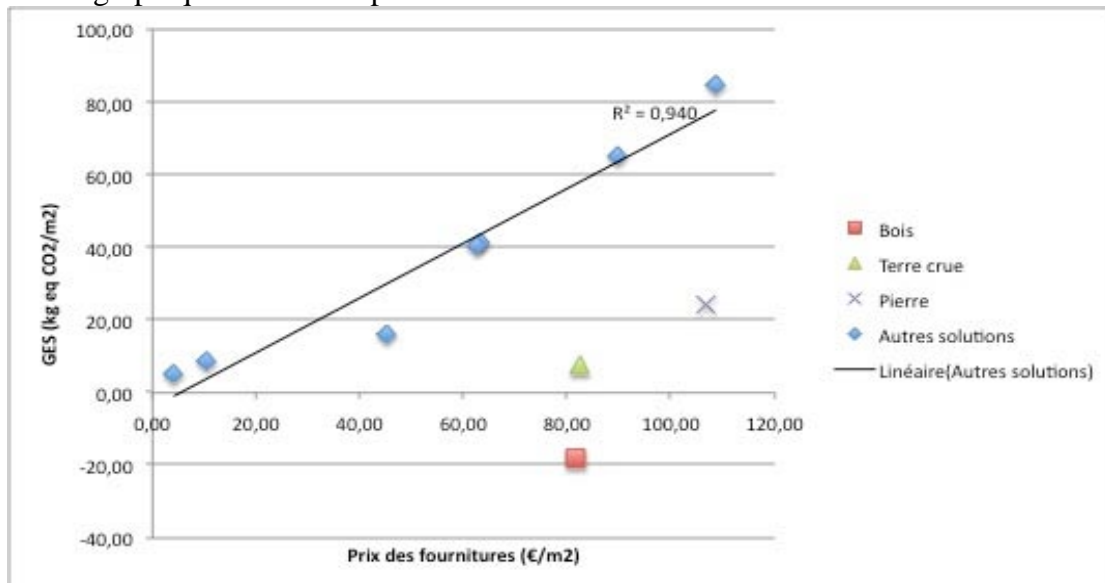
Un coefficient de 0,47 présente clairement une absence de corrélation entre l'énergie utilisée pour la Production/Déconstruction et les prix de vente des fournitures. Néanmoins l'ensemble des produits observés comprend des produits faiblement consommateurs d'énergie, à savoir, l'ossature bois, la terre crue et la pierre. Le tableau ci-dessous réitère le calcul de corrélation sans ces produits.

	Prix des Fournitures de l'élément du corps du mur (Euro)	kg éq CO ₂ /m ²
Bloc béton creux	45,23	16,00
Brique terre cuite pleine	108,65	84,72
Brique multi alvéoles	63,27	41,30
Béton banché	89,73	65,10
Béton cellulaire	62,57	40,40
Mortier d'enduit	4,09	5,13
Isolant	10,47	8,65
Coefficient de corrélation :		0,97

Tableau 33 : Corrélation Prix matière/ kg éq CO₂ à la construction des solutions techniques (hors Terre crue, pierre, ossature bois)

Le résultat obtenu est égal à 0,97, ce qui confirme la corrélation entre les prix des produits qui nécessitent de l'énergie et la quantité d'énergie utilisée pour la fabrication et la pose.

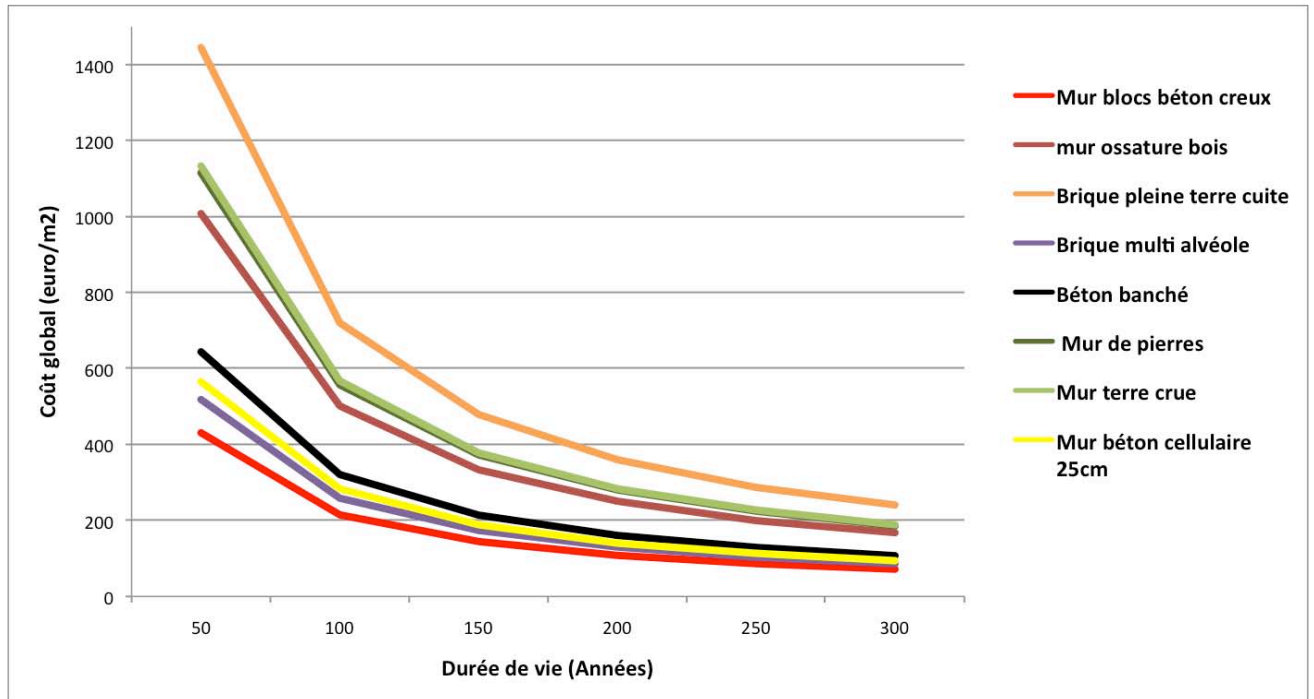
Le graphique ci-dessous présente la situation de chacune des solutions.



Graphique 6 : Mise en relation des indicateurs GES et Prix des fournitures

2.2. Evolution des coûts en fonction de la durée de vie

Res-mur-éco 9 : Le Graphique 7 ci-dessous présente l'évolution des coûts des solutions techniques du corps de l'unité de mur en fonction de la durée de vie.



Graphique 7 : Evolution du coût du corps des solutions techniques en fonction de leurs durée de vie

Les résultats obtenus présentent des profils de fonction inverse du type « $y=a/x$ » avec a = constante de coût liée à la solution et x le temps.

Comme cela avait pu être fait pour l'évaluation des GES en fonction de la durée de vie, nous pouvons observer :

- des réductions importantes des coûts pour des prolongements de 50 à 100 ans, à 150 ou à 300 ans ;

III.2.3. Analyse des résultats - Eléments de discussion (Phase n°6)

A. Analyse des simulations des impacts environnementaux - Unité de mur

A.1 Evolution des émissions de gaz à effet de serre cumulées

Res-mur-env 1 : À partir du Graphique 2, nous pouvons réaliser les observations et les analyses suivantes.

Les solutions les plus performantes

La performance de la solution bois, évaluée à partir de l'indice INIES est la meilleure quelle que soit la durée d'utilisation du mur. Celle-ci permettrait la totale disparition d'émission de GES. La valeur négative de l'indice du bois (stockage à long terme de CO₂) permet de compenser les GES émis par l'enduit minéral (renouvelé tous les 30 ans) et ceux de l'isolant (renouvelé tous les 50 ans). Ce résultat est néanmoins à reconsidérer au travers de l'analyse réalisée dans la section II.2.3 page 101.

Si l'on considère l'indice KBOB, la performance est différente²⁸. Jusqu'à 70 ans d'usage, cette solution est aussi performante que la pierre. Passé ce délai, compte tenu d'une reconstruction nécessaire, la solution bois présente une performance moins bonne que la solution « pierre » avec un impact de 47% supérieur à 300 ans. La solution « bois » reste une solution relativement performante quelle que soit la durée de vie puisse qu'elle se situe en deuxième position, quasi ex-aequo, avec la solution terre crue.

La solution « pierre » est performante quelle que soit la durée de vie envisagée. Cette solution permet une importante réduction, comprise entre 47% et 72% d'émission par rapport aux autres solutions (hors indice bois INIES), pour une durée de 300 ans. Cette solution est présentée par l'architecte Gilles Péraudin comme la solution écologique par excellence. Pour lui, toutes constructions en pierre peuvent devenir une « carrière » pour un projet suivant. La performance est réalisée grâce à une durée de vie extrêmement longue, le besoin d'énergie restreint au débit, transport et mise en œuvre et enfin à l'absence d'enduit. Dans le cas d'une obsolescence rapide du bâtiment, la pierre peut être aisément réemployée. C'est probablement en l'état des techniques et produits existants, la solution la plus recyclable.

La solution « terre crue », deuxième ex-aequo sur les 7 solutions, présente un comportement très performant. Il est cependant nécessaire de rappeler l'exigence d'entretien et de surveillance qu'impose cette solution au regard de la grande sensibilité à l'humidité.

Après ces solutions, dans les premières années, nous trouvons la solution « bloc de béton creux ». Compte tenu d'une durée de vie retenue en hypothèse de 100 ans, cette solution reste toujours plus performante que la brique multi alvéoles, le béton cellulaire et la brique pleine de terre cuite. Elle se situe dans la moyenne des performances au bout de 300 ans d'usage.

Il existe un paradoxe. Les solutions, pierre, bois et terre crue, parmi les plus performantes de la confrontation, sont les moins utilisées tout au moins en France.

²⁸ Les résultats montrent la contradiction des deux principes de comptabilisation de stockage de CO₂ concernant les produits d'origine « bois ». Un consensus rapide doit être établi si l'on veut pouvoir exploiter les valeurs d'indicateurs et obtenir des résultats cohérents.

Les solutions de second ordre

Pour une durée de vie du mur inférieure à 70 ans, les solutions « béton cellulaire » et « briques multi-alvéoles », ayant toutes deux des résultats identiques, sont préférables aux solutions « béton banché » et « briques pleines ». Elles fournissent respectivement une réduction de 25 et 43 % d'émission. De 100 ans à 200 ans, les solutions de béton cellulaire, brique multi alvéoles ou brique pleines de terre cuite émettent la même quantité de GES. Passé 200 ans, le béton banché est une solution plus performante avec respectivement des réductions de 17 et 21% comparées respectivement à la « brique multi-alvéoles » et au « béton cellulaire ». La solution « brique pleine » permet des réductions de 11% et 15% comparées respectivement à la « brique multi alvéoles » et au « béton cellulaire ». Ces dernières solutions ont donc des performances relatives étroitement liées à leur durée de vie.

Res-mur-env 2 : Impacts des isolants et enduits - *Tableau 28*

Les parts des émissions des isolants et des enduits ne sont pas négligeables. Le renouvellement est indépendant de la solution technique associée car nous avons admis des durées de vie plus courtes respectivement de 45 à 55 ans pour l'isolant et de 25 à 35 ans pour l'enduit. Les parts relatives d'impact de ces produits dans la composition du mur, représentent de 16% à 84% du total pour les isolants et de 24 à 46% du total pour les enduits. Néanmoins, la part relative ne doit pas occulter les valeurs absolues. Ces deux éléments, l'isolant et l'enduit, sont probablement des sources de réductions potentiellement importantes d'émissions de GES.

A.2 Incertitudes inhérentes aux indicateurs officiels

Res-mur-env 3 : La comparaison des *Tableau 29* et *Tableau 30* montre en quoi les décisions basées sur l'indicateur de l'Unité Fonctionnel officiel, censé présenter la performance du produit, peuvent être contre-productives. Le désordre de la colonne teintée en vert présente schématiquement l'erreur de performance.

A.3 Impact de la durée de vie sur les émissions de GES

Res-mur-env 4 : Evolution des émissions

Le Graphique 3 permet de réaliser plusieurs analyses.

Pour une durée de vie donnée de l'unité de mur, les solutions techniques peuvent être classées par ordre de performance. La terre crue, le bois, la pierre et le bloc de béton creux, sont les solutions les plus performantes. A l'inverse, la brique pleine de terre cuite et le béton banché sont les solutions les plus « impactantes ».

Il faut noter, qu'il s'agit du comportement en fonction de la durée de vie du corps seul du mur. La solution « pierre » n'exploite pas ici l'intérêt de l'absence d'enduit.

L'intérêt d'allonger la durée de vie du corps du mur est une évidence.

Fixer un objectif à 100 ou 300 ans permet une amélioration de la performance dans des proportions importantes. Quelle que soit la solution, prolonger la durée de vie de 50 à 100

ans permet de réduire les émissions de 50 %. L'allonger à 150 ans permet une réduction de 67% des émissions et enfin l'allonger à 300 ans, réduit les émissions de 83%.

Remarque : nous pouvons par ailleurs remarquer la bonne performance de la solution « bloc de béton creux » dégagé de son handicap d'une durée de vie relativement courte de 100 ans dans l'hypothèse de la section III.2.1.

L'EUROCODE 0 définit des durées pour le calcul de dimensionnement des bâtiments sur la base de calculs statistiques de défaillance. Si la durée de vie de 50 ans mentionnée pour les bâtiments courants devenait un objectif des professionnels, il est montré qu'elle ne favoriserait pas une optimisation en termes d'émission de GES et des neuf autres indicateurs environnementaux.

De manière générale, les consommations de ressources naturelles et rejets des GES, pour la réalisation de la fonction à laquelle répond l'élément, sont décroissants et inversement proportionnels en fonction de l'accroissement de la durée de vie de l'élément. Par exemple, très logiquement, si la fonction d'usage est nécessaire sur 300 ans, la consommation de granulats sera 6 fois moins importante si la durée de vie du produit est de 300 ans et non de 50 ans. A l'opposé, si l'élément est détruit de manière anticipée, la consommation ramenée à l'unité de temps est proportionnellement augmentée.

Remarque : ce constat est vrai pour tous les matériaux et avec, tous les impacts, quelle que soit la solution retenue.

Res-mur-env 5 : Comparaison des solutions techniques

Il est établi qu'une solution présentée comme moins performante qu'une autre, peut l'être tout autant à la condition que sa durée de vie soit proportionnellement plus importante (repère en tirets rouges du Graphique 3).

Par exemple, bâtir en se fixant pour émission une valeur de 75 kg éq CO₂/m²/300ans permettra une équivalence d'impact à la condition que la durée de vie réelle prenne les valeurs suivantes.

Le mur de pierre doit être conservé 39 ans. Le mur en terre crue doit être conservé 30 ans. Le mur en bois (indice KBOB) doit être conservé 40 années, le mur en blocs de béton creux 64 années, celui en béton cellulaire 162 ans, en briques multi-alvéolaires 194 ans, béton banché 260 ans et enfin en briques pleines de terre cuite 339. Quel que soit le niveau d'émission admis, il existe des équivalences sur la base de durées de vie différentes Cf. le *Tableau 31*.

Remarque : La courbe inversée de la solution « bois », basée sur l'indice INIES, montre bien que cet indice ne peut être utilisé de la même manière que les indices des autres produits. Tel quel et utilisé comme nous l'avons fait pour les autres produits, il crée une ambiguïté voire induit en erreur. En effet, il amène à ce paradoxe absurde : « plus la durée de vie est longue moins son impact en termes de GES est favorable ». Il y aurait un intérêt à réduire la durée de vie à quelques années, mieux quelques jours sans qu'il n'y ait de conditions sur le devenir des déchets lors de la démolition... Il semble que cette valeur négative résulte d'un amalgame (stockage durant l'usage et devenir après utilisation) des caractéristiques du bois. Il paraît nécessaire d'approfondir ces caractéristiques spécifiques et de fournir une information cohérente qui présente les performances intéressantes des produits bois.

B. Impact de la durée de vie sur les coûts - Unité de mur

B.1 Evolution des coûts cumulés

Res-mur-éco 6 : Sur la base des durées de vie retenues en hypothèse, l'ensemble des solutions techniques, exceptée la solution « pierre », présente un profil similaire (Graphique 4).

La solution « pierre » présente un profil différent. Avec 251€ de coût initial, la solution « pierre » est l'une des plus chères avec la terre crue et les briques pleines. Il est à noter que ces trois solutions les plus chères sont peu utilisées tout au moins en France. Les autres solutions sont un peu moins onéreuses coûtant de 158€ pour le bloc de béton creux à 214€ pour une solution « banchée ». Néanmoins, la solution « pierre », initialement près de 60% plus chère que le bloc de béton creux, devient la solution la plus économique passé 100 ans. Sur 300 ans, cette solution permet de réduire de 16% les coûts cumulés par rapport à la solution, immédiatement moins économique, le banché et de 38% par rapport à solution la plus chère, la terre crue. Cette performance, sur la durée, est expliquée par la longévité important du bâtiment mais aussi par l'absence d'enduit qui permet d'importantes économies tous les 30 ans selon nos hypothèses. Néanmoins, cet état de fait est à considérer dans son rapport au temps long qui interpelle plusieurs générations.

La solution « bois », initialement 25% plus chère que la solution la moins chère, soit la solution « bloc de béton creux », devient, compte tenu de l'hypothèse d'une durée de vie de 70 ans, la solution la plus chère au bout de 200 ans. Elle coûte 80% plus cher que la solution « pierre » au bout de 300 ans.

Le béton banché, utilisé pour les bâtiments de logement individuel de manière anecdotique, passé la centième année, présente la performance immédiatement après, la plus économique. A l'opposé, la solution à ossature bois devient la plus onéreuse sur la durée de 300 ans. De manière générale et assez logiquement, le coût d'une solution technique est inversement proportionnelle à sa durée de vie.

Res-mur-éco 7 : Conformément au Graphique 5, La tendance de l'ensemble des solutions techniques confrontées à celle de la solution pierre permet de montrer que, globalement, l'équivalence économique se réalise vers 55 années. Par la suite, la solution « pierre » se présente comme la plus économique.

Comme cela a été dit, la prise en compte de cette durée interpelle plusieurs générations.

B.2 Corrélation GES/Prix de vente - Qualité des informations

Res-mur-éco 8 : Bien que non liée à la question de la durée de vie, la mise en relation des indicateurs GES et coûts des fournitures des solutions techniques (Tableau 32) permet des constats qui crédibilisent les données environnementales. La mise en relation des indicateurs GES et des coûts des marchandises de toutes les solutions techniques ne permet pas de présenter une corrélation. Cependant, lorsque l'on écarte les produits faiblement émissifs tels que la pierre, la terre crue et l'ossature bois, la confrontation des deux indicateurs permet une excellente corrélation avec $R^2 = 0,94$ représentée par le Tableau 33. Nous savons que les indicateurs GES sont corrélés à « l'énergie procédé ». Nous savons aussi que la comptabilité analytique des grands groupes industriels, celle qui se préoccupe des coûts, vise la répercussion précise des facteurs de « coût » avant l'imputation de leurs marges. Ce principe permet d'établir l'hypothèse suivante. Les industriels, indépendants les uns des autres, appliquent une stratégie précise de la répercussion des coûts, prennent en compte

scrupuleusement la consommation de l'énergie et présentent un comportement relativement homogène envers ce facteur économique. La forte corrélation entre les GES déclarés et les prix de vente, permet de penser que les informations déclarées qui concernent les GES sont correctes. Ce comportement homogène d'industriels, pour des produits dont les FDES sont parfois réalisées par des tiers indépendants et reconnus, parfois « vérifiées », permet d'espérer une démarche de « bonne foi ».

Les prix des produits énergivores sont certes sensibles à l'énergie consommée mais ce dernier facteur ne permet pas, en l'état des connaissances actuelles, de différencier les produits énergivores de produits non énergivores. Rien ne permet de penser que les prix de ces derniers baisseront dans un cadre relatif lorsque le coût de l'énergie augmentera. Quoiqu'il en soit, un impact du coût de l'énergie qui ferait augmenter les prix lors du renouvellement ou de la maintenance des produits, accroîtrait l'impact de la durée de vie.

Parallèlement, la corrélation «GES/Coûts» des produits qui nécessitent beaucoup d'énergie, pose la question des raisons du prix élevé des produits qui n'utilisent pas ou peu d'énergie. Que peuvent payer les acheteurs s'il est fait l'économie de l'énergie par le producteur ? Pour répondre à cette question, deux pistes sont envisageables. La première réside dans la faiblesse des volumes de ventes. Celle-ci ne permet pas l'organisation de grandes filières. Or, l'organisation et la concentration de la production sont des sources d'économies d'échelle et d'amortissements des charges fixes. La seconde est celle d'une stratégie mercatique volontaire ou inconsciente. La notion de prix psychologique, celle qui associe la qualité d'un produit à son prix élevé ou l'utilisation de l'image, peut expliquer la pratique de prix élevés.

B. 3. Impact de la durée de vie des corps des solutions techniques

Res-mur-éco 9 : les gains économiques représentés sur le Graphique 7, pour une durée de vie étendue de 50 à 100 ans sont de 50% tandis qu'un allongement à 300 ans du corps du mur permet une réduction de 80% des coûts. Par ailleurs, sur le même principe que pour les GES, les coûts des différentes solutions techniques peuvent être équivalents à la condition d'une adaptation de la durée de vie.

C. Eléments pour une modélisation – Unité du mur

Evolution de l'impact d'un produit *i* au cours du temps

De manière synthétique, nous pouvons déduire de ces résultats le comportement de l'impact en fonction du temps. Nous pouvons établir la fonction ci-dessous :

$$\text{Imp}_i(t_j) : \begin{array}{l} [t_j, t_{j+1}[\\ t_j \end{array} \begin{array}{l} \xrightarrow{\quad} \\ \longmapsto \end{array} \begin{array}{l} \text{IR} \\ (1+j)a_i \end{array} \quad (1)$$

Tel que, $t_{j+1} = t_j + d_i$ avec $t_0 = 0$

Imp_i : Impact de la solution technique *i* en fonction de la durée de vie de la solution technique

a_i : facteur d'impact de la solution i évalué sur le cycle complet de vie de la solution technique ou du produit
 d_i : durée de vie de la solution technique i
 t_j : pas de temps

Exemple : fonction de l'impact du mortier d'enduit (noté me) dont la durée de vie $d_i = 30$ ans en rapport du temps de service.

Pour $j=0$:	$t_{0+1} = t_1 = t_0 + 30 = 30$	$Imp_{me}(t_0) = 1 * a_i = 5,13$
Pour $j=1$:	$t_{1+1} = t_1 + 30 = 60$	$Imp_{me}(t_1) = 2 * a_i = 10,26$
Pour $j=2$:	$t_{2+1} = t_2 + 30 = 90$	$Imp_{me}(t_2) = 3 * a_i = 15,39$
.	.	.
.	.	.
.	.	.

Evolution de l'impact d'un produit i en fonction de sa durée de vie

L'impact d'un produit en fonction de sa durée de vie, est représenté par la fonction suivante :

$$\text{Nous avons : } Imp_i(d_i) = \frac{a_i}{d_i} \times D \quad (2)$$

avec,

Imp_i : Impact de la solution technique i en fonction de sa durée de vie

a_i : facteur d'impact de la solution i évalué sur le cycle complet de vie de la solution technique

d_i : durée de vie de la solution technique i

D : durée de la fonction de service

L'équation (2) établie ci dessus montre que l'impact en termes de développement soutenable est inversement proportionnelle à D_i . Une durée de vie faible engendre un impact important.

Analyses

Le facteur d'impact « a » est le facteur attaché à la solution technique i elle-même. Ce facteur est directement lié à la nature des matériaux et au procédé de fabrication. Qu'il s'agisse de l'énergie nécessaire à la production de la solution technique, de l'énergie comptabilisée sur le cycle complet, des gaz à effet de serre émis, de l'épuisement des ressources ou de tout autre facteur d'impact environnemental ou économique, cette valeur est une donnée. Pour répondre à une demande générale, les industriels cherchent à réduire technologiquement ce facteur.

Pour une durée fixée, on obtient une valeur de l'impact. S'agissant d'une fonction telle que l'habitation, compte tenu de besoin considéré à l'échelle humaine, cette durée doit être par définition importante.

La variable de la fonction, la durée de vie du produit i , d_i , est par définition le facteur qui rend la fonction inversement proportionnelle au temps. Ce facteur n'a pas encore fait l'objet d'étude spécifique et précise par les scientifiques.

Impact de la durée de vie et améliorations technologiques

Dans le cadre d'un choix entre la démolition/reconstruction ou la rénovation, il est nécessaire de prendre en compte d'une part, les gains technologiques et les impacts associés de la nouvelle solution, d'autre part les impacts liés à la rénovation et à l'entretien de la solution initiale. Rappelons que lors de nos travaux, les performances des solutions ont été maintenues par le remplacement des isolants tous les 50 ans et de l'enduit protecteur avec une période de 30 ans. Ces renouvellements ont été, bien entendu, pris en compte dans les calculs. Ainsi les impacts de maintenance nécessaire au maintien de l'unité de mur sont inclus et intégrés dans les calculs. Ils sont donc pris en compte dans un processus stratégique de décision de maintien en fonction ou de déconstruction-reconstruction. L'allongement de la durée de vie de la « fonction porteuse » de notre unité de mur n'exclut pas la recherche d'une amélioration des autres fonctions telle que l'isolation.

Comparaison de produits

A partir de l'équation 2 établie précédemment, comparer deux produits 1 et 2 qui rendent un service pendant une durée D , en termes d'impact de gaz à effet de serre, impose de comparer :

$$\frac{a_1}{d_1} \times D \text{ et } \frac{a_2}{d_2} \times D$$

a_1 sera réellement plus performant que a_2 si et seulement si :

$$\frac{a_1}{d_1} < \frac{a_2}{d_2}$$

Il est donc absolument nécessaire de connaître d_1 et d_2 .

Rappelons que les comparaisons se font à service identique et par conséquent, à l'aide de quelques hypothèses réductrices, à impact d'usage identique. Rappelons encore que le choix final entre deux produits, basé sur une performance intégrée en termes de développement soutenable, nécessiterait l'utilisation d'outils de choix multi-critères.

C. Limites de la méthode – Unité de mur

Les principaux éléments de confort entre les différentes solutions sont neutralisés pour l'aspect biophysique. Le coefficient d'isolation, les matériaux intérieur et extérieur identiques neutralisent en effet les déperditions, la température superficielle et l'effusivité. Cependant, les aspects de transfert d'humidité, de convections internes de chaleur et de déphasage, sont négligés. Les aspects psychologiques du confort et l'humeur associée à l'utilisation des solutions plus ou moins néfastes à l'environnement sont aussi négligés.

L'étude d'une unité de mur ne permet pas d'envisager l'impact de la durée de vie sur le système pour les différentes solutions techniques comme par exemple les déperditions thermiques linéiques. Elle ne permet pas non plus d'intégrer l'impact du confort d'été des

différentes solutions, les deux paramètres d'isolation et d'inertie thermiques étant difficiles à neutraliser simultanément.

Par ailleurs, les différences des résultats sont intangibles à cette échelle.

Les différences de performances acoustiques des solutions sont négligées.

La réduction des impacts autorisée par l'amélioration technologique des procédés de fabrication ou de mise en œuvre des produits a été négligée. Les impacts lors du renouvellement ont été considérés constants.

Enfin les gains obtenus grâce à l'allongement de la durée de vie sont théoriques. Ils ne tiennent pas compte d'éventuels seuils de durées de vie « mécaniques » qui engendreraient des ruptures.

Conclusion

Qu'il s'agisse d'impacts environnementaux ou économiques, la prise en compte de la durée de vie d'un mur, qu'elle soit explicitée ou non, est indispensable à la prise de décision responsable dans les choix de solution techniques.

Concernant, les émissions de GES et les 9 autres indicateurs au comportement proche, la durée de vie effective des produits de construction a un effet sur le bilan environnemental de la réponse à une fonction d'usage pour une durée donnée. Par exemple, la solution « bloc de béton creux » serait pénalisée par une utilisation de 100 ans alors qu'elle serait parmi les plus performantes pour des durées de vie plus importantes. La durée de vie réelle est un critère très important de la performance.

Les indicateurs officiels, basés sur la valeur de l'unité fonctionnelle, peuvent être contre-productifs dans une démarche de réduction des impacts entreprise par des concepteurs. Ce n'est pas l'évaluation des indicateurs réalisés en analyse de cycle de vie qui est en cause mais la durée de vie typique.

Pour comparer deux produits sur un facteur d'impact, comparer les facteurs d'impact isolément ou associés à un facteur temporel forfaitaire est une erreur. Il est absolument nécessaire d'associer le facteur temporel le plus proche de la réalité.

Le facteur dont la connaissance doit être approfondie est celui de la durée de vie.

Les produits utilisés pour les enduits et les isolants ne sont pas négligeables en termes d'impacts de GES. Parallèlement au travail de réduction des émissions de la phase d'utilisation, il est important d'augmenter la durée de vie de ces deux éléments. Leur durée de vie est donc aussi à étudier dans l'objectif d'une réduction d'impacts.

Concernant l'aspect économique, les observations montrent clairement la relation inversement proportionnelle des coûts et de la durée de vie. La solution « pierre » est assez caricaturale de ce fait. Initialement la plus chère après la brique de terre cuite pleine, elle devient au bout de 55 ans dans la moyenne des coûts des autres solutions pour enfin être au bout de 100 ans, la solution la plus économique.

Les indicateurs des différentes solutions pourraient être confrontés mais l'objectif de ce travail n'est pas de présenter la solution d'une unité de mur la plus performante en regard de différents critères mais seulement d'analyser l'impact du facteur durée de vie.

Enfin, à l'opposé, la réduction de la durée de vie présente dans le bilan quelques points positifs :

- **les améliorations corolaires à la courbe d'expérience. En effet, plus la durée de vie des produits et les cycles complets sont courts, plus le nombre de cycles est important. Chaque cycle permet une amélioration des connaissances par l'expérience ;**
- **l'amélioration éventuelle de la performance liée aux progrès technologiques. L'évolution technologique des process de fabrication et des produits eux-mêmes peut laisser espérer des gains à l'usage des nouveaux produits;**

III.3. Etude d'un logement type

L'étude de l'impact de la durée de vie de l'unité du mur a permis de définir un élément du bâtiment avec précision, de réaliser certaines observations et d'établir des résultats. Néanmoins, cette étude n'a pas fourni de réponse à certaines questions. Il n'a pas été possible de :

- mettre en évidence les parts relatives des phases construction/déconstruction et usage ;
- vérifier la neutralisation des impacts de confort d'hiver et mesurer les différences d'impacts de confort d'été ;
- rendre commensurable et appréhendables les différences d'impact des solutions extrêmes ;
- mesurer les gains de l'extension de la durée de vie du bâtiment ;
- analyser l'impact social de la durée de vie du bâtiment.

L'objectif de ce chapitre est de permettre d'établir des réponses à ces questions.

III.3. 1 Définition de l'objet et des conditions de l'étude

A. Proposition d'un plan type répondant au programme (Phase 1)

Une solution architecturale est proposée en réponse au programme suivant :

Localisation : le projet est situé dans une zone sans contrainte climatique particulière, type région toulousaine.

Terrain : plat, superficie supérieure à 800 m²

Les besoins :

La superficie doit être 91 m². Pour ce projet, le maître de l'ouvrage désire un bâtiment de plain-pied, confortable et économique à l'usage. A cette fin, le bâtiment doit chercher à répondre à la dernière norme thermique RT 2012.

Il désire un grand séjour comprenant le salon et la salle à manger, 3 chambres et un petit bureau. Les chambres doivent être isolées du séjour. Pour profiter de l'extérieur, une petite terrasse de moins de 20 m² doit être prévue. Enfin, une salle de bain et un WC indépendant seront aménagés.

Il n'y a pas de besoin concernant un garage ou parking.

Le plan proposé en réponse à ce programme et utilisé pour l'ensemble de l'étude est le suivant :

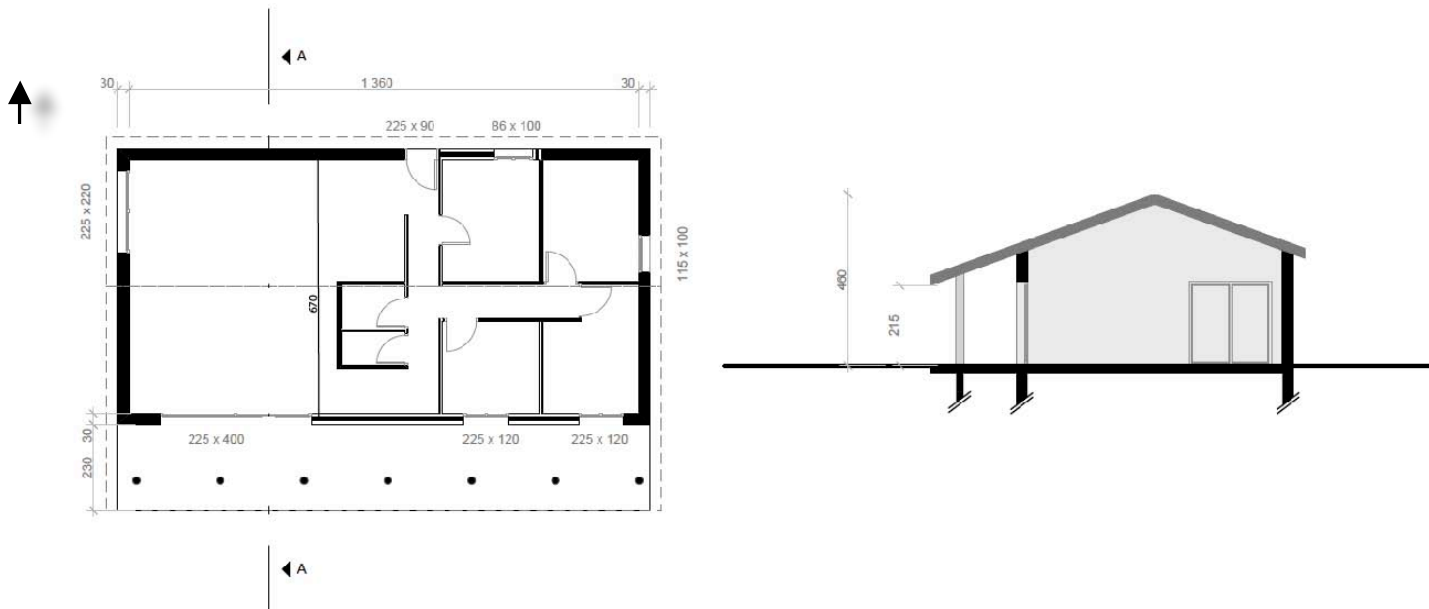


Figure 18 : Plan du logement type

B. Elaboration et présentation des différentes solutions (Phase 2)

Les différentes solutions de la structure porteuse sont identiques à celles retenues pour l'étude de l'unité de mur. Les solutions techniques des autres éléments du bâtiment sont décrites en Annexe 10. Quelle que soit la solution technique porteuse, les autres éléments sont toujours identiques. A partir de ces plans, un descriptif quantitatif sommaire est établi pour chacune des solutions retenues (Annexe 11).

Remarque : Toutes les solutions ont des finitions intérieures et extérieures identiques afin d'obtenir des conditions esthétiques et de confort proches. Les limites et les négligences sont celles établies au sein de l'étude du mur.

Vérification du comportement thermique à l'usage

Les simulations des comportements en termes de consommation d'énergie de chauffage et de rafraîchissement, ont été réalisées à partir du logiciel TRNSYS et Pleiades+COMFIE. Les résultats sont présentés dans le Tableau 34 ci-dessous. Quelles que soient les solutions techniques, on observe de très proches consommations de chauffage et de rafraîchissement. Pour ces dernières, nous savons que les résultats identiques sont liés d'une part à la situation géographique aux courtes périodes de surchauffes ainsi qu'à l'imprécision des modèles de simulation utilisés dans les logiciels. Néanmoins, nous admettons l'équivalence des impacts à l'usage qui peuvent donc être écartés dans le cadre des comparaisons des solutions.

Solution	Epaisseur de l'isolant	Besoin en chauffage annuel (kWh)	Besoin en froid annuel (kWh)/m2	Consommation totale annuelle (kWh)
ossature bois	0,20	3180	1	3182
Brique multi alvéolaire	0,08	3171	1	3172
Mur de pierres	0,19	3196	1	3197
Blocs de béton creux	0,19	3253	1	3254
Briques pleines	0,15	3365	1	3366
Béton banché	0,16	3157	1	3158
Terre	0,19	3250	1	3251
béton cellulaire	0,14	3347	1	3348
Ecart des extrêmes				208
Ecart Type				79,65

Tableau 34 : Besoins énergétiques de chauffage et rafraîchissement des solutions à l'usage – Logiciel Pleiades

Conformément aux résultats fournis en Annexe 12, les simulations des besoins d'énergie à l'usage, qu'il s'agisse du chauffage ou du confort d'été présentent des résultats proches ayant une différence maximum de 6,6% entre les solutions extrêmes. La faiblesse des besoins de rafraîchissement, inférieur à 1 kWh/m2/an permet de négliger cet aspect. La neutralisation simultanée des deux facteurs de chauffage et de confort d'été n'étant pas réalisable pour les différentes solutions techniques, un écart trop important aurait nécessité l'intégration d'un impact d'usage.

Rappelons que pour maintenir cette performance, il est prévu une rénovation des isolants tous les 50 ans.

Remarque : l'hypothèse d'une isolation par l'extérieur a fait l'objet d'une évaluation avec le logiciel TRNSYS. Cette solution n'a fait pas l'objet d'un développement ici. En synthèse, l'économie de 7%, obtenue grâce à l'isolation extérieure, doit être évaluée au regard de la durée de vie de l'isolant plus exposé aux agressions climatiques et risques mécaniques.

C. Choix des indicateurs (Phase 3)

C.1. La mesure de l'impact environnemental

Avec les mêmes justifications que celles précisées pour l'étude de l'unité de mur (cf § II.2.1 page 94), l'étude porte sur les évolutions des indicateurs de gaz à effet de serre (GES).

C.2. La mesure de l'impact économique

Les objectifs sont :

- d'analyser les écarts de coûts d'investissement et de maintenance de différentes solutions ;
- de comparer l'évolution du cout global de solutions équivalentes sur la base des hypothèses restrictives du § II.2.1. p88. L'objectif étant la comparaison des impacts de durées de vie des solutions, ces dernières sont rendues équivalentes pour les consommations de la phase d'usage. Les consommations d'usages sont donc identiques à la tolérance mesurée près. Ces consommations sont donc écartées. Le terme coût global est donc ici restreint à l'investissement initial, les travaux de maintien en l'état et la démolition ;
- d'étudier l'impact de la durée de vie et les gains obtenus lors d'un allongement de cette dernière.

Dans un deuxième temps, l'objectif est d'analyser l'évolution du seuil de rentabilité de l'investissement en rapport de la location du logement en fonction de la durée de vie du bâtiment.

Afin de comparer le coût économique des solutions de la structure du bâtiment en fonction de la durée de vie, les informations utilisées sont celles du tableau ci-dessous :

C.3. L'évaluation de l'impact social

Pour les raisons évoquées précédemment, l'aspect social de l'impact de la durée de vie est l'objet d'une analyse qualitative.

D. Evaluation des durées de vie des composants (Phase 4)

Pour une première série de simulation et de calculs, les durées de vie des différents éléments du bâtiment sont établies à « dire d'expert ». Les durées des murs porteurs sont celles de l'étude de l'unité de mur. Les durées des autres composants sont reprises dans le tableau suivant.

Solutions techniques	Hypothèses de durées de vie (en année)	Sources
Menuiseries extérieure	30 à 40	A.Talon (Talon, 2006)
Fondations	Durée de la solution technique	Observation ²⁹
Evacuation eaux pluviales	40 à 60	Professionnels ³⁰
Cloisons	40 à 60	Professionnels ³⁰
Charpente	Durée de la solution technique	Observation ³¹
Couverture	60 à 80	Professionnels ³⁰
Plomberie	80 à 120	Observation

Tableau 35 : Durées de vie prises en hypothèse – Logement type

Remarque : pour ces durées de vie, il est admis sur le principe de la théorie de la logique floue, le choix d'un intervalle. Pour les calculs, par soucis de simplification, les durées de vie retenues seront la moyenne de l'intervalle.

Dans une deuxième série d'évaluation, les durées de vie sont considérées variables.

²⁹ De nombreuses fondations sans armatures et souvent superficielles au sens étymologique du terme perdurent encore à ce jour. Elles ont donc plusieurs siècles.

³⁰ DDVT déclarées dans les FDES ainsi que par observations

³¹ Les charpentes en bois massif telles que celle retenue ici ont souvent plusieurs siècles

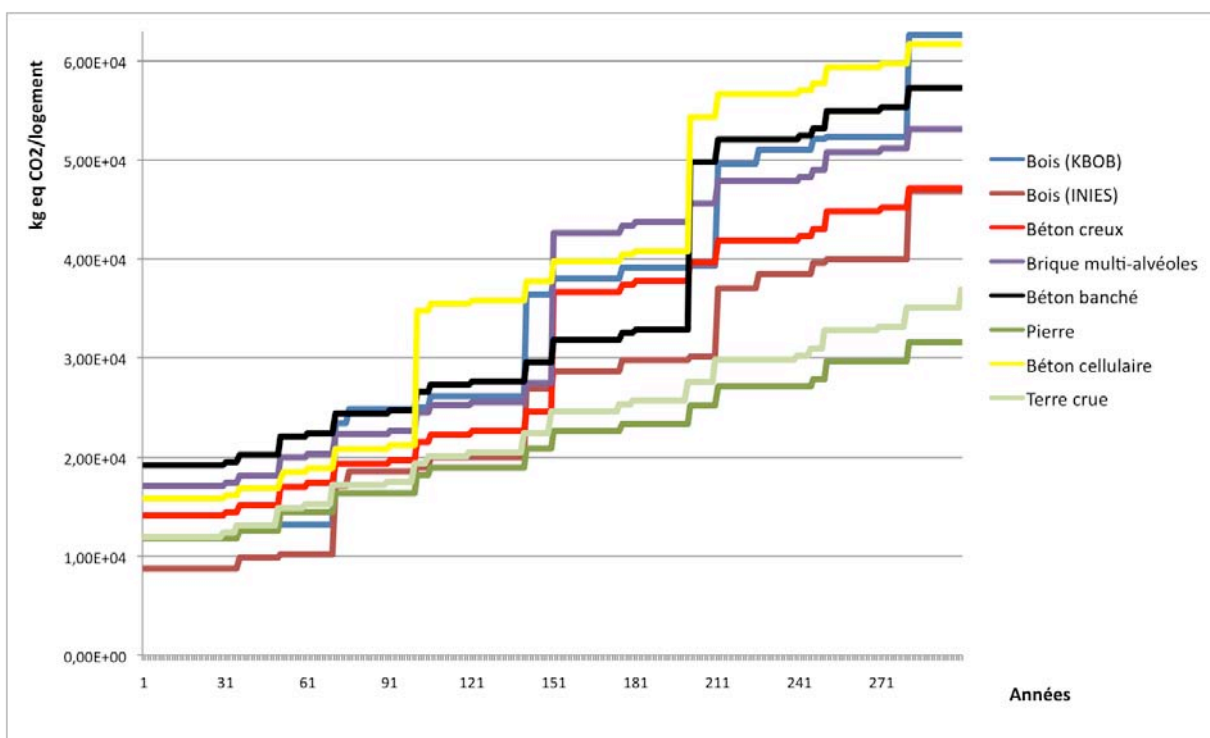
III.3.2. Résultats des simulations - Logement type (phase 5)

A. Domaine environnemental - Logement type

A.1 Simulation de l'évolution des émissions de GES

Res-Log-Env 10 : Evolutions des émissions de GES sur une durée longue

Le Graphique 8 ci-dessous présente, pour chacune des solutions techniques retenues, l'évolution des émissions des GES du logement type, sur la base des hypothèses décrites dans la méthode et précisées dans la section précédente.



Graphique 8 : Evolution des émissions de GES dans le temps des solutions techniques

Rappel : pour la solution « bois », il apparaît deux courbes. Les raisons qui ont conduit à cette double présentation sont détaillées dans le § II.2.3 de la Partie II, page 101. L'une des courbes est établie sur la base de l'indice INIES, l'autre sur la base d'indicateur bois de la base KBOB-ECOINVENT.

Res-Log-Env 11 : Gains obtenus en choisissant la solution la moins émissive comme référence

Sur une longue durée, la solution la moins émissive est la pierre.

Le choix d'une solution pierre permet les gains mentionnés dans le Tableau 36 suivant.

	Solution pierre/ Aux autres solutions - Gain à 300 ans
Brique multi alvéoles	51%
Banché	44%
Bois (INIES)	32%
Béton creux	46%
Bois (KBOB)	47%
Béton cellulaire	56%

Tableau 36 : Gain fourni par la solution « Pierre »

Res-Log-Env 12 : évaluation de la part relative de la phase de construction - démolition dans l'émission de GES en comparaison de la phase d'usage

Sur la base de la réglementation RT 2012, notre logement doit consommer moins de 45 Kwh/m²/an soit moins de 4095 Kwh/an³². Compte tenu d'une conversion de 0,09 kg CO₂/kWh pour la France (source Agence Internationale de l'Energie – AIE), les émissions liées aux émissions d'usage pour ce logement type représente 368 kg de CO₂/an/m². Le tableau ci-dessous présente les émissions des différentes solutions sur un cycle complet de production considérant une durée de fonction de service de 50 ans (colonne 1) et 300 ans (colonne 3). Les colonnes 2 et 4 présentent la part relative en rapport des émissions liées à l'usage.

Structures	à 50 ans		à 300 ans	
	GES Production (kg éq CO ₂) Colonne1	Part GES Prod/Utilisation Colonne2	GES Production (kg éq CO ₂) Colonne3	Part GES Prod/Utilisation Colonne4
Bois Indice INIES	1,01 ^{E+04}	55%	4,86 ^{E+04}	44%
Pierre	1,77 ^{E+04}	96%	6,10 ^{E+04}	55%
Bois indice KBOB	1,41 ^{E+04}	76%	3,30 ^{E+04}	30%
Béton creux	1,32 ^{E+04}	72%	6,30 ^{E+04}	57%
Béton cellulaire	1,76 ^{E+04}	95%	7,46 ^{E+04}	67%
Brique multi alvéoles	1,99 ^{E+04}	108%	6,77 ^{E+04}	61%
Banché	2,20 ^{E+04}	120%	5,89 ^{E+04}	53%

Tableau 37 : Émission de GES pour la production/déconstruction à 50 ans et 300 ans en kg éq CO₂ – Part relative en rapport de la phase d'usage

³² Cette consommation comprend le chauffage, le refroidissement, l'eau chaude sanitaire, l'éclairage et appareils auxiliaires.

Res-Log-Env 13 : grandeur d'échelle

Le Tableau 38 ci-dessous présente la comparaison des solutions extrêmes en termes d'émissivité en équivalence de déplacements automobiles. La conversion est faite sur la base d'une émission de 130g CO₂. Cette émission correspond aux émissions moyennes des automobiles du parc neuf français (Source ADEME).

Equivalence d'impact pour la fonction déplacement automobile		
	à 50 ans	à 300 ans
Valeurs d'émissions des GES des solutions les moins émissives (« Bois » indice INIES à 50 ans, « pierre » à 300 ans (kg éq CO ₂))	1,01 ^{E+04}	3,16 ^{E+04}
Valeurs d'émissions des GES des solutions les plus émissives (« Banché » à 50 ans, « Bois » indice KBOB à 300 ans (kg éq CO ₂))	2,20 ^{E+04}	6,26 ^{E+04}
Différences entre les solutions extrêmes en kg éq CO ₂	1,19 ^{E+04}	3,1 ^{E+04}
Différences annuelles d'émissions entre les solutions extrêmes (kg éq CO ₂ /an)	238	103,33
Équivalence de l'impact au regard de déplacements en km/an	1830,76	794,87

Tableau 38 : Emissions en équivalent d'une distance parcourue avec une automobile (base 120g/km parcouru)

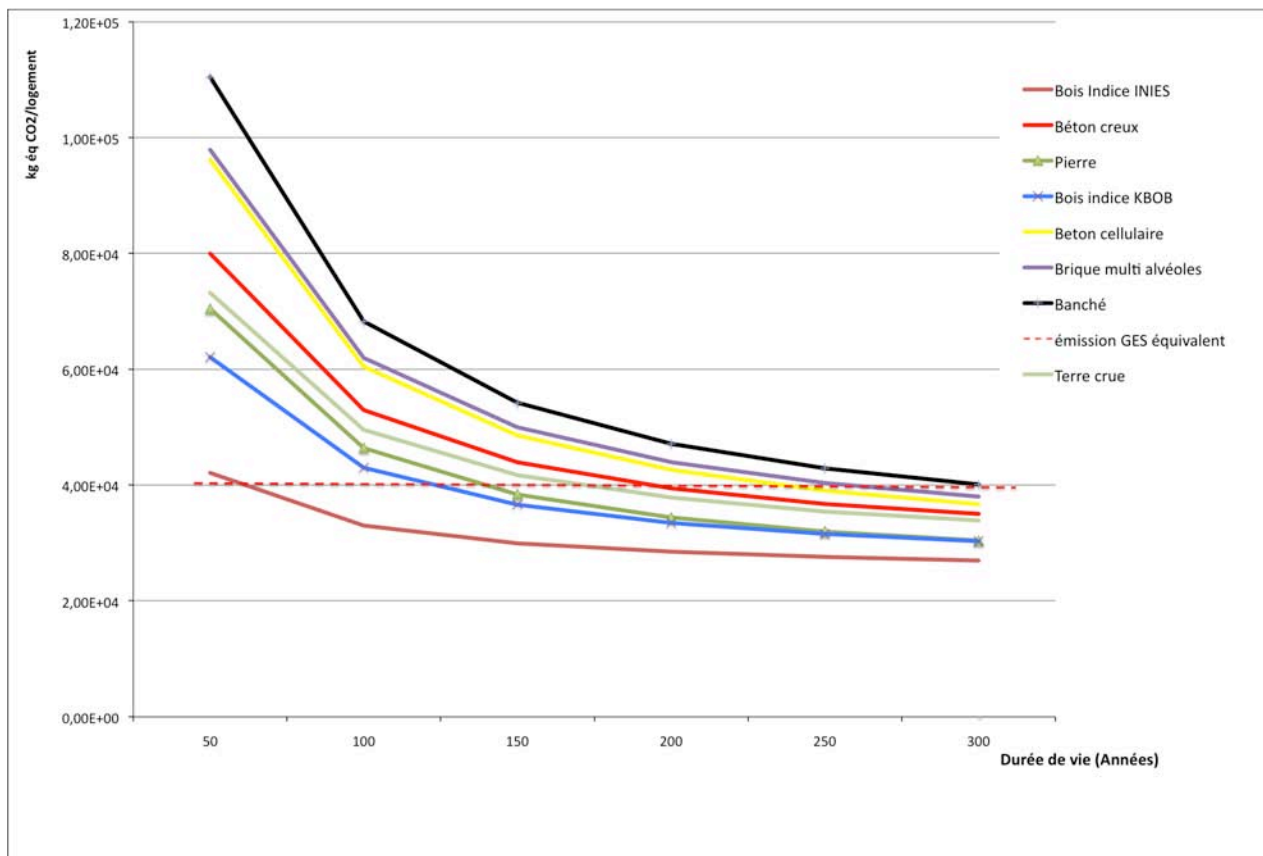
A.2 Durée de vie variables – Logement type

Res-Log-Env 14 : Impact de la durée de vie de la solution technique

Le Tableau 39 et le Graphique 9 présentent les émissions de GES en kg éq CO₂ pour chacune des solutions techniques en fonction de leur durée de vie considérant que la fonction d'usage doit être remplie durant 300 ans.

Solutions techniques	Durée de vie des solutions					
	300	250	200	150	100	50
Bois Indice INIES	2,69 ^{E+04}	2,75 ^{E+04}	2,85 ^{E+04}	3,00 ^{E+04}	3,30 ^{E+04}	4,21 ^{E+04}
Béton creux	3,56 ^{E+04}	3,76 ^{E+04}	4,05 ^{E+04}	4,54 ^{E+04}	5,51 ^{E+04}	8,44 ^{E+04}
Pierre	3,00 ^{E+04}	3,16 ^{E+04}	3,39 ^{E+04}	3,78 ^{E+04}	4,56 ^{E+04}	6,89 ^{E+04}
Bois indice KBOB	3,00 ^{E+04}	3,13 ^{E+04}	3,31 ^{E+04}	3,62 ^{E+04}	4,23 ^{E+04}	6,07 ^{E+04}
Béton cellulaire	3,62 ^{E+04}	3,86 ^{E+04}	4,21 ^{E+04}	4,81 ^{E+04}	6,00 ^{E+04}	9,57 ^{E+04}
Brique multi alvéoles	3,78 ^{E+04}	4,02 ^{E+04}	4,38 ^{E+04}	4,98 ^{E+04}	6,18 ^{E+04}	9,77 ^{E+04}
Banché	3,99 ^{E+04}	4,27 ^{E+04}	4,70 ^{E+04}	5,40 ^{E+04}	6,81 ^{E+04}	1,10 ^{E+05}

Tableau 39 : Variation des émissions de GES des solutions en fonction de leur durée de vie



Graphique 9 : Evolution des émissions de GES en fonction de leurs durées de vie

Rappel : seuls le soubassement et les murs voient leur durée de vie varier dans la simulation. Les autres éléments ont les durées de vie estimées « à dire d'expert ». Leurs fréquences de remplacement sont donc celles déterminées en hypothèse dans le Tableau 35.

Res-Log-Env 15 : Gains procurés par l'allongement de la durée de vie

A partir du Graphique 9, nous pouvons constater que prolonger la durée de vie d'un logement de 50 ans à 100 ans ou à 300 ans pour une durée de fonction totale de service de 300 ans permet de réduire dans les proportions suivantes les émissions de GES :

	Gains d'un allongement de 50 à 100 ans	Gains d'un allongement de 50 à 300 ans
Bois (INIES)	22%	36%
Béton creux	35%	58%
Pierre	34%	56%
Bois (KBOB)	30%	50%
Béton cellulaire	37%	62%
Brique multi alvéoles	37%	61%
Banché	38%	64%

Tableau 40 : Gains relatifs résultant de l'allongement de la durée de vie de 50 à 100 et 300 ans

Res-Log-Env 16 : Equivalence d'émissions de GES

Le Graphique 9 permet de mettre en relation une équivalence des émissions de GES de chacune des solutions si la durée de vie est adaptée.

	Durées de vie pour une équivalence d'impacts (années)
Bois (INIES)	60
Bois (KBOB)	120
Pierre	135
Béton creux	205
Béton cellulaire	230
Brique multi alvéoles	255
Banché	300

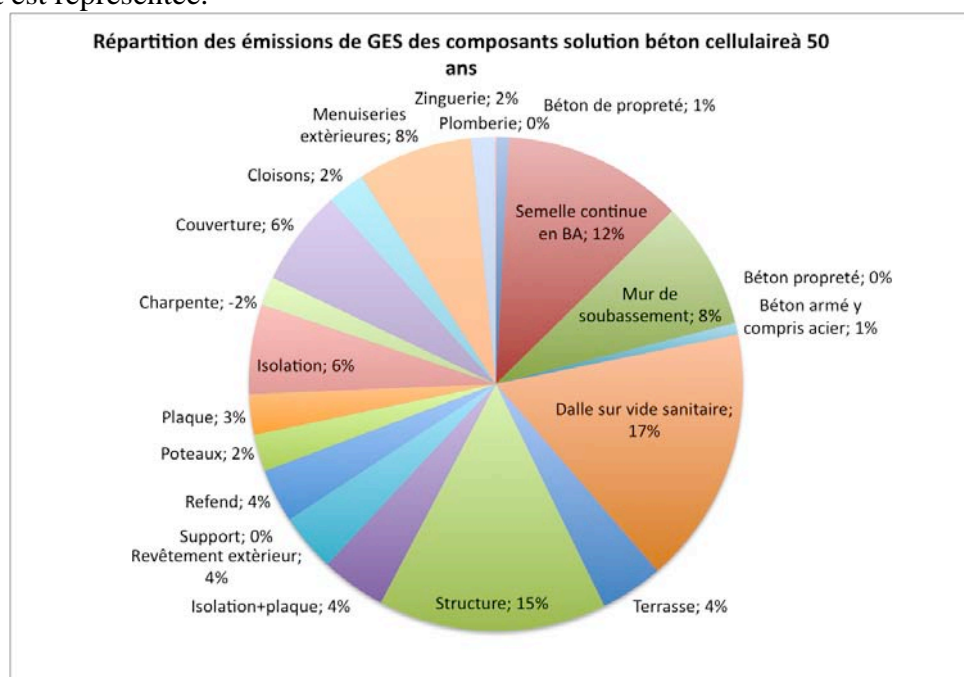
Tableau 41 : Durée de vie pour une équivalence d'émission

A.3. Hiérarchisation des différents composants du logement

Res-Log-Env 17 : Hiérarchisation des différents composants du logement

Les différents composants d'un logement présentent des émissions de GES de valeurs très variées mais non négligeables. A titre d'exemple, le graphique ci-contre présente la répartition des GES émis par chacun des composants pour la solution « béton cellulaire ». Les valeurs sont établies sur une durée de 50 ans. Dans cet exemple, les émissions varient de 1% pour la plomberie à 18% pour la dalle sur vide sanitaire.

Dans le graphique ci-dessous, la part relative des impacts des différents composants du bâtiment est représentée.



Graphique 10 : Répartition des GES selon les composants

Regroupement des composants du logement

Sur la base d'un regroupement par poste, il apparaît que deux groupes constituent les principales sources émettrices (cf Tableau 42 ci-après). Il s'agit du soubassement et des parois verticales. Selon la solution technique retenue, le soubassement représente une part relative des GES allant de 44% à 76% pour les évaluations à 50 ans. Pour une évaluation à 300 ans, les résultats se situent entre 22 et 78%.

Rappel : le choix de soubassement retenu est couramment employé. Il s'agit de fondations continues en béton armé pour les murs extérieurs et le mur de refend, des semelles isolés pour les poteaux. Le mur de soubassement est en béton plein. Enfin, le plancher est de type hourdis à entrevous.

Remarque : la solution bois-indicateur INIES ayant une valeur cumulée d'impact de GES négative pour les parois verticales, cet élément n'apparaît pas sur le graphique.

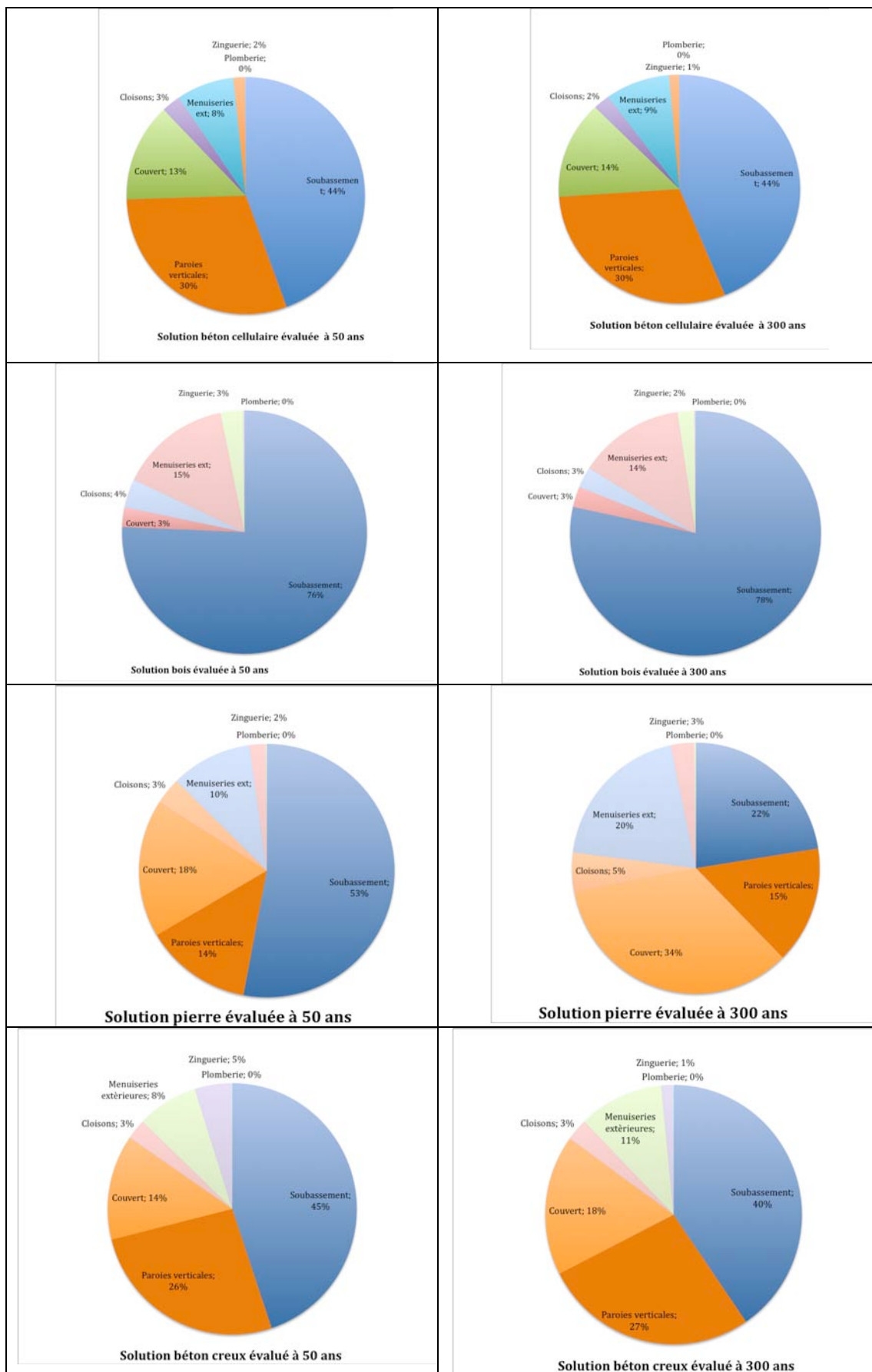


Tableau 42 : Parts relatives des émissions des composants regroupés

A.4 Gains engendrés par le découplage fondation/élévation

Res-Log-Env 18 : Découplage du soubassement

Nous entendons par découplage, le fait de dissocier le soubassement, étant l'élément le plus impactant, de l'élévation. Les dissocier permet de réaliser les évaluations sur la base d'une conservation du soubassement. Le découplage du soubassement des autres éléments constituant le logement permet de présenter de nouveaux profils d'émission des différentes solutions techniques Tableau 43.

	50	100	150	200	250	300
Bois indice INIES	1,05E+04	1,24E+04	1,52E+04	1,72E+04	2,01E+04	2,20E+04
Béton creux	1,61E+04	2,06E+04	2,54E+04	3,00E+04	3,52E+04	3,95E+04
Pierre	1,17E+04	1,62E+04	2,07E+04	2,33E+04	2,78E+04	3,19E+04
Bois indice KBOB	1,36E+04	1,78E+04	2,31E+04	2,49E+04	3,02E+04	3,37E+04
Béton cellulaire	1,70E+04	2,44E+04	2,90E+04	3,52E+04	4,01E+04	4,76E+04

Tableau 43 : Emission des GES avec conservation des fondations à chaque reconstruction (découplage)

Le découplage du soubassement permet de réaliser les économies d'émission de GES, pour une durée de 300 ans, telles que figurant dans le tableau suivant :

	Avec découplage	sans découplage	Gain absolu	Gain relatif
Bois (INIES)	2,20E+04	4,86E+04	2,66E+04	55%
Béton creux	3,95E+04	6,10E+04	2,17E+04	36%
Pierre	3,19E+04	3,30E+04	0,00E+00	0%
Bois (KBOB)	3,37E+04	6,41E+04	2,98E+04	46%
Béton cellulaire	4,76E+04	7,46E+04	2,75E+04	37%

Tableau 44 : Gain fourni par le découplage des fondations

Dans l'hypothèse soit d'une dissociation du soubassement et de l'élévation, soit de la réutilisation des fondations avec les reconstructions ultérieures, la réduction en gaz à effet de serre est assez importante. Les réductions varient de 36 à 55% (hors solution pierre) ce qui représente des réductions allant de 21700 kg éq CO₂ à 29800 kg éq CO₂.

Res-Log-Env n°19 : Comparaison des gains liés aux choix de matériaux/ durée de vie

Les tableaux ci-dessous présentent le gain d'émission de GES obtenu au travers du choix de la solution technique bois plutôt que bloc de béton creux (

	Choix de l'ossature Bois (KBOB)/Bloc béton creux
Gain (kg éq CO ₂)	2,37 ^{E+04}
Emission totale (kg éq CO ₂)	6,07 ^{E+04}

Tableau 45) et le gain obtenu grâce à l'allongement de la durée de vie de la solution la moins performante.

	Choix de l'ossature Bois (KBOB)/Bloc béton creux
Gain (kg éq CO ₂)	2,37 ^{E+04}
Emission totale (kg éq CO ₂)	6,07 ^{E+04}

Tableau 45 : gain lié aux choix de solutions techniques.

	Allongement de la durée de vie du bloc de béton de 50 à 150 ans
Gain (kg éq CO ₂)	3,90 ^{E+04}
Emission totale (kg éq CO ₂)	4,55 ^{E+04}

Tableau 46 : gains liés à la durée de vie de la solution technique

B. Domaine économique

B.1 Evolution des coûts – Logement type

Res-Log-éco 20 : Investissement et grosses réparations

Le tableau ci-dessous présente le coût initial, les coûts de maintien de la fonction d'usage et celui de la démolition. (source Batiprix-Edition 2010)

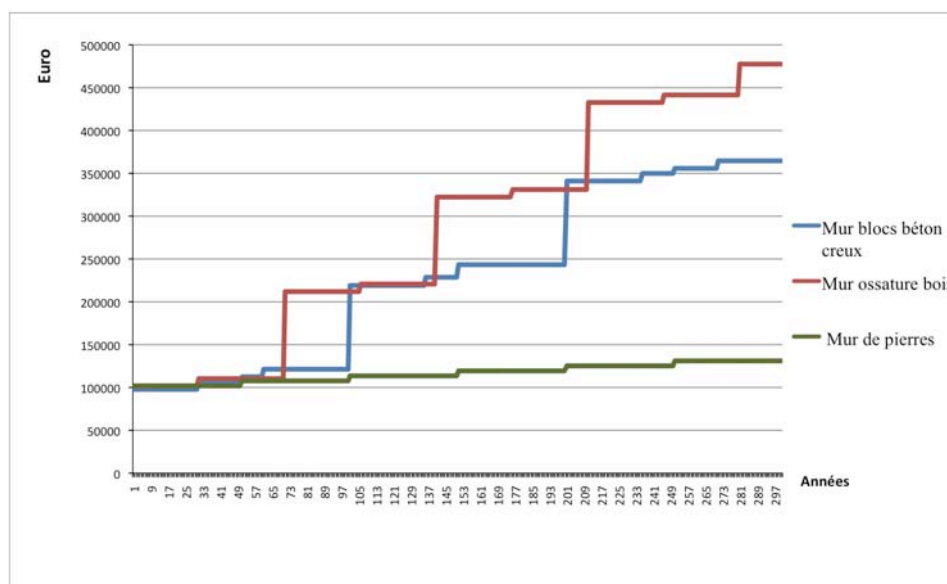
Montant en euro (HT)	Investissement initial	Démolition	Rénovation enduit	Rénovation isolation thermique
Bloc béton creux	97799	1365	8952	5821
Bloc pierre	101926	1415	-	5821

Bois	102345 ³³	836	8952	4153
------	----------------------	-----	------	------

Tableau 47 : Coût initial et de grosses réparations

Res-Log-éco 21 : Evolution du coût du logement en fonction des hypothèses de durée de vie

Les investissements initiaux ainsi que les coûts supportés par la suite afin de maintenir la réponse au besoin en l'état sont représentés ci-dessous. L'évaluation comprend les coûts des isolants et enduits des murs



Graphique 11 : Evolution du coût du logement

Les coûts d'investissement étant proches quelle que soit la solution technique retenue, par souci de simplification, nous n'avons retenu que trois solutions aux durées de vie différentes afin de présenter le comportement économique sur la durée de 300 ans. Nous avons sélectionné trois solutions, représentatives des choix courants ou extrêmes. Il s'agit de la pierre, du bloc de béton creux et de l'ossature bois.

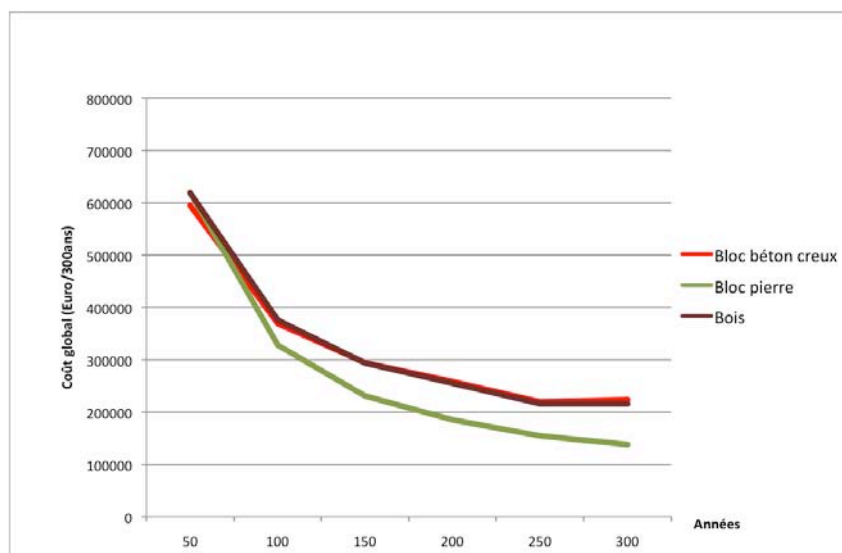
Remarque : La courbe de la brique de terre cuite multi-alvéoles aurait un profil semblable à celle du bloc de béton creux car les coûts sont proches et les hypothèses retenues de durée de vie sont identiques.

³³ Le prix de l'unité de mur était moins élevé en bois qu'en pierre. Néanmoins le prix des pré-cadres de l'ossature bois engendre un surcoût important (source Batiprix)

B.2 Evolution du coût du logement en fonction de la durée de vie

Res-Log-éco 22 : Evolution des coûts de la structure en fonction de la durée de vie

Le Graphique 12 représente l'influence de la durée de vie des murs porteurs sur leurs coûts. L'évaluation comprend les coûts de la rénovation des isolants et enduits des murs sur la base du tableau ci-dessous.



Graphique 12 : Evolution du coût des murs porteurs en fonction de la durée de vie³⁴

Les économies relatives réalisées sont présentées dans le tableau suivant :

	Gains d'un allongement de 50 à 100 ans	Gains d'un allongement de 50 à 300 ans
Ossature Bois	39%	65%
Béton creux	38%	62%
Pierre	47%	78%

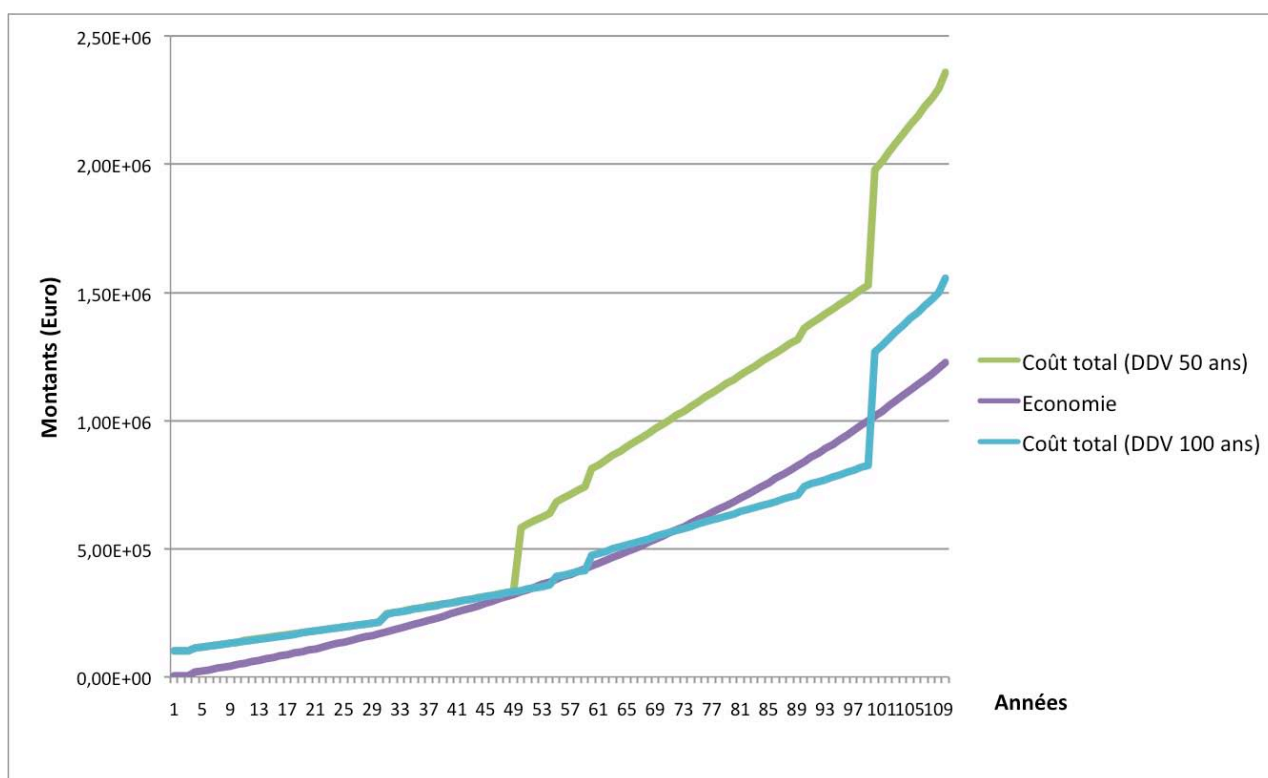
Tableau 48 : Economies grâce à l'allongement de la durée de vie

³⁴ Ces évolutions sont approximatives en ce qui concerne les postes retenus du second œuvre dans l'évaluation. En effet, il est admis que ces postes ont tous fait l'objet d'un allongement identique de durée de vie.

B.3 Evolution du seuil de rentabilité en fonction de la durée de vie

Res-Log-éco 23 : Evolution du seuil de rentabilité en fonction de la durée de vie

Le Graphique 13 ci-après présente l'évolution des coûts engendrés par l'achat du logement type (hors foncier) sur une durée de 100 ans. Le choix retenu est la solution « bloc de béton creux »³⁵. La courbe verte représente le coût dans l'hypothèse d'une durée de vie de 50 ans, la courbe bleue représente celle d'une durée de vie de 100 ans. Enfin, la courbe violette présente l'économie réalisée grâce à l'absence de location. Les conditions ont été développées dans le § II.2.2 à la page 93 tandis que les durées de vie des différents composant du bâtiment sont celles de l'étude environnementale.



Graphique 13 : Evolution des coûts en fonction de la durée de vie et de l'économie

Rappel : les calculs ne tiennent pas compte des coûts de plomberie, de finition de murs intérieure et cloisons du chauffage et des équipements électriques.

³⁵ Les prix des différentes solutions technique étant très proches, le choix d'une solution n'est pas déterminant pour la démonstration.

Res-Log-éco 24 : Impact micro-économique de l'externalité GES

Considérant un coût économique de l'externalité GES de 137€/tonne éq CO₂ (valeur actualisée de la proposition des coûts des GES (Vogländer, 2000)), le tableau ci-dessous présente la part du coût des externalités au regard du coût global (hors usage).

	GES/ 300 ans (t éqCO ₂ /300 ans)	Coût de l'externalité (Euros)	Proportion de l'externalité GES/ coût global (hors usage)
Solutions la moins émissive	31	4247	<1%
Solution le plus émissive	60	8220	< 3%

Tableau 49 : évaluation des coûts des GES en t éqCO₂ et euros pour 300 ans

III.3.3. Eléments de discussion (phase 6)

A. Domaine environnemental – Logement type

Avoir étendu la méthodologie appliquée à 1m² de mur à l'ensemble d'un logement présente des avantages et des inconvénients. En dehors de la solution technique des murs porteurs, les autres composants étant identiques quelle que soit la solution technique du mur retenue, les calculs sont imputés de constantes d'émission de GES. Les différences relatives tendent à diminuer et les résultats sont moins démonstratifs. L'avantage de la présentation de résultats pour un logement type est la plus grande facilité d'appropriation des résultats par le lecteur ainsi que la vérification des impacts à l'usage. Elle permet l'évaluation globale du logement pour cette phase et la comparaison de l'impact des GES émis sur le cycle de vie complet.

A.1 Evolution des émissions de GES sur une durée longue

Res-Log-Env 10 : Simulation des évolutions des émissions de GES sur une durée longue

L'analyse du **résultat 10** (Graphique 8) permet les commentaires suivants. Compte tenu de nos hypothèses, pour une durée d'utilisation du logement inférieure à 70 ans, il apparaît que la solution à ossature bois, évaluée à partir de l'indice INIES, est la moins émissive. Pénalisée par la durée de vie courte de 70 ans, même avec cet indicateur INIES négatif pour l'ossature, la performance se dégrade pour s'approcher de la performance du béton creux à 300 ans. L'indicateur bois KBOB engendre une mauvaise performance pour cette solution quelle que soit la durée de vie. Notons que si cette durée de vie était confirmée dans les usages, cette solution serait la plus mauvaise à long terme, soit 300 ans, avec la solution béton cellulaire.

Sur une durée supérieure à 70 ans du besoin fonctionnel, il apparaît que la solution « pierre » est la solution la plus performante. Cette performance est liée à deux facteurs. Le premier est la durée de vie longue mais réaliste prise en hypothèse de 500 à 1000 ans. La seconde est l'absence d'enduit de parement, économisé tous les 30 ans selon nos hypothèses.

La terre crue, avec une durée de vie de 300 ans, ancienneté observable dans de vieilles fermes et moyennant quelques précautions, présente un résultat très performant. Toujours en deuxième position, avantage par la faiblesse de « l'énergie procédé », elle fait donc partie des solutions les plus performantes. Paradoxalement, de la même manière que pour l'unité de mur, les solutions « pierre », « terre crue » et « ossature bois » sont les plus performantes et les moins utilisées tout au moins en France.

Enfin, quelle que soit la durée de vie désirée de la fonction, inférieure à 300 ans; la solution « béton creux » semble préférable à celle du « béton cellulaire ».

Sur une durée inférieure à 70 ans, la solution « béton cellulaire » est plus performante que les solutions « multi-alvéoles » et « béton banché ». Sur une longue durée les performances s'inversent.

La solution « béton banché » présentant la performance la plus mauvaise sur un délai court et ne s'améliore que faiblement sur des délais longs. Seuls le « béton cellulaire » et « bois-KBOB » présentent de moins bonnes performances à 300 ans.

Les hypothèses des durées de vie prises ici pour les solutions ne sont pas « objectivables ». Néanmoins, celles-ci sont des hypothèses établies sur avis de professionnels. Cette source est dite « à dire d'expert ». Dans une première approche et dans l'attente de données d'essais de vieillissement accéléré, ces hypothèses restrictives ont été admises. Comme les résultats l'attestent, ces hypothèses permettent la mise en évidence de l'impact du facteur « durée de vie », qu'elle soit physique ou fonctionnelle, sur le résultat de la performance.

Res-Log-Env 11 : Gains obtenus en choisissant la solution la moins émissive comme référence

Selon le **résultat 11** (Tableau 36) sur une durée de 300 ans, la solution « pierre » permet une réduction de 32% d'émission de GES par rapport à la solution « bois » telle que comptabilisée par INIES, 46% par rapport à la solution « blocs de béton creux » et 56% par rapport à la solution « béton cellulaire ». Il n'est pas dans les objectifs de notre thèse de déterminer la meilleure solution sur un critère. Néanmoins, il apparaît intéressant d'évaluer le gain relatif potentiel d'une solution par rapport aux autres.

Res-Log-Env 12 : Evaluation de la part relative de la phase de construction dans l'émission de GES en comparaison de la phase d'usage

Le **résultat 12** (Tableau 37) montre que la lutte contre les déperditions énergétiques a permis de réduire considérablement l'impact de la consommation d'énergie à l'usage et par conséquent des émissions de GES associées. Ce constat est fait tout au moins dans la théorie. De fait, les GES liés au cycle de vie complet de la solution technique retenue pour remplir la fonction se sont, sur un plan relatif, considérablement accrus. Pour une construction dont l'évaluation intervient suite à 50 ans d'usage, les émissions de GES des solutions représentent de 55% à 120% des émissions liées à l'usage. Pour une évaluation à 300 ans, la part relative s'élève entre 30% et 67% selon les solutions.

Ces chiffres montrent qu'il est devenu nécessaire d'étudier l'impact de la solution technique dans le cadre de la lutte contre les GES.

Remarque : cette analyse est tout particulièrement vraie en France où le taux de conversion kWh/kg CO₂ est faible. Quoiqu'il en soit, dans les autres pays, si la part relative de la phase de production est plus faible, la valeur absolue reste importante.

Par ailleurs, ces valeurs sont en opposition avec la littérature scientifique qui porte sur la question. Ming Liu 2010 évalue à 80% les impacts pour la phase d'usage, 15% pour phase production et 5% les autres phases. Nos résultats se rapprochent davantage de ceux de Thormark (Thormark, 2006) qui évalue l'énergie « procédé » du bâtiment entre 40 et 60% de la totalité. Rappelons que les résultats sont fortement influencés par le lieu et la consommation d'énergie à l'usage.

Res-Log-Env 13 : grandeur d'échelle

Le **résultat 13** (Tableau 38) montre que la comparaison des solutions extrêmes en rapport des émissions de GES équivaut, en termes de déplacements automobiles annuels, pour l'ensemble du logement, à réaliser 1830 km supplémentaires chaque année pour une évaluation à 50 ans d'usage et 794 km si l'évaluation est réalisée à 300 ans. Ce kilométrage équivalent en termes de nuisances ne paraît pas considérable. Néanmoins, il est à rapprocher des 130 millions de logements de l'Europe (source Eurostat).

A.2 Durée de vie variable et analyses

Res-Log-Env 14 : Impact de la durée de vie de la solution technique

Pour remplir une fonction de service d'une durée donnée, il apparaît bien évidemment que les tendances des émissions de GES attachée aux solutions techniques suivent des fonctions inverses en rapport de l'augmentation de leur durée de vie (Graphique 9 et Tableau 39). A durée de vie donnée, la solution « ossature bois », évaluée à partir de d'indice type INIES ou KBOB, apparaît, comme la solution la plus performante. Elle est suivie de la solution « pierre », « terre crue », « béton creux »,...

Res-Log-Env 15 : Allongement de la durée de vie et gains procurés

Quelle que soit la solution technique retenue, prolonger la durée de vie permet de substantielles économies d'émission de GES. En allongeant l'objectif de durée de vie de 50 à 100 ans, les émissions de GES se réduisent de 22% pour la solution à ossature bois jusqu'à 38% pour le béton banché (Tableau 40). L'allongement de 50 à 300 ans permet de réduire cet impact environnemental de 36% à 64% toujours pour ces deux solutions extrêmes. La mise aux normes de bâtiments existants lorsqu'elle est possible, permettant l'allongement de la durée de vie, permet en effet « d'amortir » l'impact de la construction initiale. La construction d'un bâtiment neuf comprenant elle-même les émissions nécessaires à la nouvelle norme entraîne celles générées d'une part par la démolition de l'ancienne et d'autre part par celles de la nouvelle structure.

Il est rappelé que seuls le soubassement et les murs voient leur durée de vie varier dans la simulation. Les autres éléments ont les durées de vie estimées « à dire d'expert ». Ces autres éléments sont autant de source de réduction. L'EUROCODE 0 donne pour objectif une durée de 50 ans pour le calcul de dimensionnement des structures de projets courants tels que les bâtiments d'habitation. Comme le Graphique 9 le montre, une durée de 50 ans n'optimise pas l'impact environnemental.

Res-Log-Env 16 : Equivalence d'émissions de GES

Une équivalence d'impact des solutions techniques sur la base d'une adaptation de la durée de vie peut être établie cf Graphique 9 et Tableau 41. Par exemple, détruire un logement à ossature bois tous les 70 ans (120 ans selon KBOB) équivaut à émettre près de 40000 kg éq CO₂ pour satisfaire le besoin d'un logement pendant 300 ans. En termes d'émissions de GES, ce comportement est équivalent si la durée de vie du même logement en pierre est de 130 ans, en blocs de béton creux égale à 200 ans, ou 225 ans en bloc de béton cellulaire, égale à 260 ans en brique multi-alvéoles ou encore égale à 300 ans en béton banché.

A.3 Hiérarchisation des différents composants du logement et analyses

Res-Log-Env 17 : Hiérarchisation des différents composants du logement et Regroupement des composants du logement

Le résultat 17, et les regroupement des éléments Tableau 42, montrent que ceux proportionnellement les plus émissifs, sont le soubassement réalisé traditionnellement en béton quelle que soit la solution technique de la structure verticale et les parois verticales. Les émissions pour le soubassement vont de 49% à 65% de l'ensemble pour une évaluation à 50 ans et de 24 à 65 % pour une évaluation à 300 ans. La structure verticale elle-même est la seconde source la plus émissive exception faite de la solution « ossature bois »³⁶. Les émissions pour ce deuxième groupe d'éléments vont de 15 à 20%. Sur la base d'une démarche d'optimisation de l'action de type Pareto pour un objectif de réduction des émissions de GES, il est important de se préoccuper dans un premier temps de la question des fondations. Deux solutions permettraient une réduction significative des émissions. La première consisterait à élaborer et utiliser des solutions techniques moins émissives. La seconde solution consisterait à réaliser des fondations restant utilisables, sur une très longue durée, quelles que soient les modifications du bâti élevé. C'est l'action de « découplage » fournissant le résultat 19. Nous pouvons rappeler que certaines fondations, parfois sommaires, ont rempli leur fonction pendant plusieurs centaines d'années. Certes les exigences de l'utilisateur étaient probablement moins élevées et les structures plus souples. Admettant cette nouvelle hypothèse de durée de vie du soubassement, l'étude du gain réalisée est présentée dans le résultat 18 ci-dessous (Tableau 43).

³⁶ Cette observation est à rattacher à l'indicateur dont la valeur est négative pour les produits à base de bois.

Res-Log-Env 18 : découplage du soubassement

La part relative d'émission des GES du soubassement étant très importante, la réduction de ses émissions envisagée grâce à l'allongement de sa durée de vie, permet d'améliorer significativement les performances. Le choix, qui consiste à lier le soubassement, très impactant, à la solution technique de la structure et par conséquent à la durée de vie de cette dernière, démultiplie les émissions. Dans une démarche de réduction des émissions de GES, le « découplage » soubassement/élévation permet des gains importants présentés dans le Tableau 44. Toujours basés sur les durées de vie des solutions techniques prises en hypothèse, les gains sont de 0% pour la solution « pierre » à 55% pour la solution « bois ». Pour cette dernière solution, le résultat peut paraître paradoxal compte tenu de l'image du matériau. Considérant une durée de vie du logement relativement courte, 60 à 80 ans, à l'image du comportement des propriétaires de pays utilisant principalement cette solution, l'utilisation de nouvelles fondations à base de béton dégrade considérablement la performance. A l'inverse, la conservation du soubassement malgré la reconstruction rapide de l'élévation permet d'afficher la meilleure performance. Une autre source d'économie réside dans la stratégie qui consisterait à développer l'utilisation de solutions de soubassements moins émissives dont certaines existent comme par exemple les pieux vissés.

Res-Log-Env n°19 : Comparaison des gains liés aux choix de matériaux/ durée de vie

Ce résultat montre à l'évidence que la durée de vie d'une solution technique est un facteur tout aussi important dans la lutte contre les émissions de GES que le choix de la solution technique.

Si l'on compare la solution « bloc de béton creux » à la solution « ossature bois » (

	Choix de l'ossature Bois (KBOB)/Bloc béton creux
Gain (kg éq CO ₂)	2,37 ^{E+04}
Emission totale (kg éq CO ₂)	6,07 ^{E+04}

Tableau 45), à durée de vie identique des solutions, soit 50 ans, le gain d'émission des GES est de 23700 kg éq CO₂ en faveur de la solution « ossature bois ». Cependant, prolonger la durée de vie de 50 à 150 ans de la solution « blocs de béton creux », permet une réduction de 39000 kg éq CO₂ (Cf. Graphique 9). Dans ces cas, la valeur absolue d'émission de GES est de 62400 kg éq CO₂ pour l'ossature bois et de 45500 kg éq CO₂ pour les blocs de béton creux.

Organiser une réflexion sur le facteur « durée de vie » est donc plus important encore que le choix du produit dans la lutte contre les émissions de GES.

Ajoutons que choisir une solution très performante en terme de GES, qui répond à sa fonction d'usage sur une très longue période permet de cumuler les gains.

Synthèse :

Il résulte des analyses la mise en évidence de l'importance du facteur de durée de vie sur la performance des émissions de GES et donc de l'ensemble des impacts corrélés. Aujourd'hui, compte tenu des réductions d'impact à l'usage, le facteur « durée de vie » de la solution technique est aussi importante que le choix des matériaux et de leurs procédés de mise en œuvre eux-mêmes. La part relative d'impact de la phase de construction-déconstruction oscille entre 30 et 120% des impacts en rapport de la phase

d'usage. Afin de donner une grandeur d'échelle et toujours compte tenu des hypothèses de durée de vie des solutions, la réduction des GES est équivalente à un déplacement automobile annuel d'une famille faisant de 800 km supplémentaires annuellement pour un logement d'une durée de vie de 300 ans à 1800 km/an pour un logement d'une durée de 50 ans. Allonger la durée de vie d'une solution technique quelle qu'elle soit permet d'importante réduction d'émission de GES allant de 22% minimum pour des périodes de 50 à 100 ans à 64% maximum de réduction pour des périodes de 50 à 300 ans. Les gains sont plus ou moins importants selon le groupe d'éléments pour lequel la durée de vie est allongée. Les fondations en béton et les murs porteurs sont les groupes les plus importants en termes de GES. Prolonger la durée de vie à 300 ans des seules fondations ou changer de système constructif pour réaliser celles-ci, permettrait de réduire de 0 à 55% les émissions des phases de maintenance et construction-déconstruction. Enfin, les solutions techniques peuvent induire les mêmes émissions dans la mesure où leur durée de vie est adaptée à l'importance de leurs émissions à la fabrication et mise en oeuvre.

B. Domaine économique – Logement type

B.1 Coûts et évolution

Res-Log-éco 20 : couts d'investissement et de grosses réparations

Le **résultat 20** (Tableau 47) permet les observations suivantes. L'écart de prix à l'investissement des solutions extrêmes « Bloc de béton creux » et « bois » est de 4546€ par logement. Cet écart ne représente que 4,64% du prix global en faveur du bloc de béton. Cette faiblesse d'écart est liée aux choix des solutions identiques des autres éléments. Ces 4127€ sont donc à imputer entièrement aux murs porteurs.

Dans une logique de marché, il est cohérent que les prix soient proches. Les mécanismes de régulation de l'offre et de la demande et d'élasticité des prix engendrent une fixation du prix non pas sur les coûts de revient mais sur l'équilibre entre l'offre et la demande adaptée en fonction de la stratégie commerciale des filières. Cette proximité des prix a pour conséquence d'accroître l'importance des durées de vie dans le calcul du coût global.

Res-Log-éco 21 : Evolution du coût du logement en fonction des hypothèses de durée de vie

Le Graphique 11 du **résultat 21** montre que sur une durée longue du besoin, la solution « pierre » est la plus performante. Sa longue durée de vie, associée à l'absence de réfection des enduits, permet une économie réelle. La solution pierre sur 300 ans est 75% moins coûteuse que la solution bois et 66% moins coûteuse que la solution « bloc de béton creux ».

B.2 Evolution du coût du logement pour 300 ans en fonction de la durée de vie

Res-Log-éco 22 : Evolution des coûts de la structure en fonction de la durée de vie

Les courbes du Graphique 12 présentent ici aussi, un profil de type fonction inverse du temps. La courbe de la solution pierre présente la meilleure performance. Ce résultat, obtenu alors que les investissements initiaux sont proches, est permis grâce à l'économie des enduits réalisée sur la durée des 300 ans. L'intérêt de l'allongement de la durée de vie des solutions,

quelle qu'elle soit est ici aussi évident. La réduction du coût obtenue en prolongeant la durée de vie de 50 à 100 ans, permet de réduire le coût de 38 à 47%. Le passage de 50 à 300 ans permet une réduction allant jusqu'à 78% pour la solution « pierre » Tableau 48. Cet allongement permet donc de diviser par 5 le coût des murs porteurs et de l'ensemble de la fonction.

B.3 Durée de vie et intérêt économique de l'investissement

Résultat 23 : Evolution du seuil de rentabilité en fonction de la durée de vie

Res-Log-éco 24 : le Graphique 13 montre la difficulté d'amortir le coût initial d'un investissement. Sur la base des hypothèses émises, une durée de vie de 50 ans ne permettrait pas l'amortissement. Une durée de vie de 100 ans autorise à peine l'équilibre. Ces résultats peuvent paraître contradictoires avec la présentation contemporaine du statut des propriétaires et des locataires. En effet, il est entretenu l'idée collective de l'enrichissement des propriétaires. L'enrichissement réel des propriétaires est, depuis 1996-1997, lié aux plus-values immobilières réalisées ou potentielles. Seul le coût de la fonction « se loger » est évalué. Ici, la plus-value potentielle n'est pas intégrée. De plus, dans les démarches d'investissement locatif, ces augmentations des prix à l'achat créent un déséquilibre du ratio investissement/revenu. L'affaiblissement du ratio est pour l'heure financé par la défiscalisation. Cette défiscalisation est remise en question. Elle est contestée par la Communauté Européenne³⁷. En effet, La Communauté Européenne dénonce, entre autres, l'augmentation des prix qu'elle engendre, les exclusions à l'accession à la propriété et les éloignements géographiques.

Notons par ailleurs que les plus values actuelles n'existent pas lors de l'analyse sur des longues périodes. Sur ces longues périodes, le ratio investissement/revenu s'équilibre.

Enfin, la durée, nécessairement supérieure à 100 ans pour obtenir l'équilibre peut interpellier l'observateur. Selon la théorie qui veut que la valeur d'un bien soit constituée de la somme des revenus potentiels actualisés sur la durée de vie restante, les bâtiments anciens, hors interférence du foncier, devraient voir leur valeur s'affaiblir considérablement au cours du temps. Pourtant, les biens anciens, correctement maintenus au standard de confort, voient leur valeur parmi les plus élevées du marché. Ce comportement économique prouve que la durée de vie des bâtiments, telle qu'imaginée par les investisseurs, est longue.

Res-Log-éco 25 : Impact micro-économique de l'externalité GES

Le calcul montre que l'unique prise en compte des coûts des effets externes causés par les GES émis pour les phases de construction, maintenance et déconstruction est relativement négligeable en rapport du coût global (hors usage) pour la durée de 300 ans du logement (Tableau 49). Les conclusions basées sur des simulations omettant les externalités ne sont donc pas remises en question.

Synthèse

Economiquement aussi, les durées de vie des solutions techniques retenues sont plus importantes que les solutions elles-mêmes dont les prix sont proches. Une durée de vie courte est économiquement non performante. Sur cet aspect, et en l'état du marché considéré hors défiscalisation, compte tenu des hypothèses retenues, un bâtiment de

³⁷ Le 16 février, la Commission Européenne a officiellement demandé à la France de modifier plusieurs dispositifs fiscaux d'aides à l'investissement dans les logements locatifs neufs.

logement doit nécessairement dépasser les 100 ans pour pouvoir justifier³⁸ l'investissement. La question de l'allongement de la durée de vie, au travers d'une rénovation lourde, nécessiterait un approfondissement. Néanmoins, bien qu'il soit connu que le coût de ce type d'opération soit coûteux et parfois proche du coût du neuf, il ne l'excède pas. Pour le bâtiment de logement, la mise aux normes et au standard de confort paraît toujours possible. Celle-ci n'engendre pas de surcoûts supérieurs au coût du neuf.

C. Eléments pour une modélisation – Logement type

Considérant l'équation (1) appliquée à chaque produit du bâtiment, l'impact global de la production, de la maintenance et de la déconstruction du bâtiment g , noté $Imp\ g$, comprenant l'ensemble des solutions techniques i en fonction du temps, peut être formulé comme suit :

$$\begin{aligned} Imp\ g(t_j) &= \sum_{i=1}^n Imp\ p_i(t_j) \\ &= \sum_{i=1}^n (1+j)a_i \end{aligned}$$

avec,

$Imp\ p_i(t_j)$: Impact des solutions techniques i en fonction des durées de vie t_j , avec $i=1, 2, \dots$;

i : indice des produits utilisés pour le bâtiment

a_i = facteur d'impact de l'indicateur « a » de la solution technique i , évalué sur le cycle complet de vie de la solution technique ou du produit ;

t_j : durée en année

Dans le cadre d'une décision de démolition - reconstruction, les remarques sont identiques à celles réalisées pour l'unité de mur.

Remarque : le progrès technologique est négligé. L'hypothèse initiale est la constance des impacts à l'usage. Intégrer le progrès imposerait l'introduction d'une fonction de gain d'impact et de coût d'accès à cette technologie.

³⁸ Cette analyse établie sur la base de loyer du marché, verrait les conclusions faussées si elle était prise en compte par tous les acteurs du marché. Ce résultat est basé sur la faiblesse « relative » des loyers au regard du prix de l'investissement. Tenant compte de cette information, les acteurs se tournant vers la location et provoquent mécaniquement l'augmentation de ceux-ci

III.3.4. L'approche sociale

Dans cette section, notre approche se présente davantage sous la forme d'un inventaire des impacts. Les pistes d'analyse des impacts sociaux de la durée de vie du bâtiment de logement sont listées. Les relations avec d'autres échelles sont esquissées. L'échelle de temps prise en compte se veut longue et seul le bâtiment éphémère ne fait pas partie de l'étude. Bien que ce dernier type de construction puisse être confronté aux approches environnementale et économique de notre thèse, il nécessiterait une approche sociale spécifique alors qu'il est en terme de volume de production peu significatif.

Les pistes vont être développées selon trois parties. La première partie visite deux aspects quantifiables, directement dépendants des informations présentes dans les FDES. Il s'agit de l'aspect sanitaire et des externalités des produits utilisés sur la base du cycle de vie complet. Une deuxième partie présente l'impact de la durée de vie dans les termes culturel, patrimonial et affectif. Enfin, une dernière partie esquisse très sommairement l'impact de la durée de vie du bâtiment dans son rapport à la ville en ce qui concerne les fonctions urbaines et architecturales.

A. Impacts sociaux quantifiables de la durée de vie du bâtiment

Les impacts sanitaires

Les indications des impacts sanitaires fournis dans les FDES présentent un caractère très hétérogène d'un produit à l'autre. Il est donc difficile de comparer les produits les uns aux autres ainsi que l'impact de leur durée de vie. Cette hétérogénéité rend impossible la recherche d'une corrélation entre les indicateurs environnementaux et sanitaires. Cependant, l'analyse de ces indicateurs sanitaires permet le classement en deux catégories. La première est constituée d'impacts permanents, indépendants du cycle de vie. Il s'agit par exemple des émissions radiatives ou de certains composants organiques volatils (COV). A l'échelle de la durée de vie du bâtiment, ces impacts sont davantage liés au choix des produits qu'à leur durée de vie. Les émissions sont continues. La seconde catégorie d'indicateurs, tels que les fibres sont, en général, « enfermés » par le produit lui-même ou par divers revêtements. Les impacts sont donc indirects et essentiellement actifs durant les phases de construction et de déconstruction. Pour cette dernière catégorie, les éléments de conclusion concernant les impacts de la durée de vie sur les GES sont donc exploitables. Il résulte l'importance du facteur de durée de vie sur la performance.

Les externalités

Positives ou négatives, largement analysées dans le premier chapitre de cette thèse, la question des externalités³⁹ fait, sur le principe, l'unanimité des spécialistes, de Marshall à Stern, (Marshall, 1906), (Stern, 2006). Rappelons qu'il y a externalité lorsqu'une action d'un agent influence le bien-être d'un autre agent, sans que cette action ne rentre dans un marché économique. Le consensus a permis leur évocation et l'intégration au sein de la norme ISO 15686-8. Les difficultés surviennent lors des caractérisations et de l'établissement des critères de prise en compte (Frame, 2009). Quoi qu'il en soit, les externalités et leurs comportements en regard de la question de l'impact de la durée de vie sont des fonctions composées. Les composantes de cette fonction sont les impacts environnementaux, en rapport de la sensibilité du récepteur de l'externalité, affectés d'un coût ou d'un bénéfice économique. Sans pouvoir prétendre établir une valorisation précise, les conclusions établies à partir des indicateurs environnementaux tels que les GES valent, toutes proportions conservées, pour le

³⁹ Une externalité peut être positive ou négative (Marshall, 1906).

comportement des indicateurs d'externalités. L'externalité est donc inversement proportionnelle à la durée de vie des bâtiments et des produits les composants.

Le parc du logement social

Avec un parc de 4.373.000 logements et une production de 47.900 logements en 2009 (source INSEE), le logement social a représenté près de 14% de la production totale du bâtiment de logement. Ce secteur est donc un terrain important en termes de volume pour les stratégies politiques d'approches de développement soutenable. Exception faite des travaux de rénovation, comme les enduits et les isolants, le volume de ce parc immobilier augmente dans les mêmes proportions que l'allongement de la durée de vie. Par exemple, augmenter de 10% la durée de vie, permet d'augmenter de 10% le volume du parc aux surcoûts éventuels initiaux et entretiens supplémentaires près. Cette problématique de l'arbitrage entre démolition/reconstruction et rénovation est investie pleinement par les organismes de logements sociaux collectifs. L'intérêt de ce terrain d'étude, réside dans le fait que la réflexion, les expérimentations et les éventuelles conséquences, souffrent dans une moindre mesure du conflit d'intérêts constructeur/propriétaire/usager du parc de logement purement « privé ». Sur ce dernier marché, le facteur qui détermine la stratégie décisionnelle est essentiellement celui de la rentabilité. Le maître de l'ouvrage, lorsqu'il n'est pas le futur occupant à un intérêt, tout au moins en l'absence de réflexion approfondie, d'investir moins, même si le coût à l'usage qu'il ne supportera pas, est plus élevé. Pour le reste et concernant l'impact de la durée de vie, les conclusions sur le parc de logements sociaux collectifs peuvent s'appliquer au parc individuel privé.

B. Les impacts sur la culture, le patrimoine et l'affectif

L'analyse de l'état de l'art a montré la complexité de l'aspect culturel en particulier en ce qui concerne des bâtiments n'ayant pas une vocation de monument (cf. Martin Dubois - spécialiste du patrimoine culturel québécois). Pourtant, Le projet HQE2R, certes aujourd'hui peu repris, mentionne, dans les cibles du système intégré ISDIS, proposant les objectifs des cahiers des charges des projets urbains de quartier soutenable, la nécessité de mise en valeur de la qualité du patrimoine architectural ainsi que les mesures pour préserver et mettre en valeur ce patrimoine (Merz, 2000). Le bâtiment y compris celui de logement est une trace non seulement d'un usage (savoir être) mais aussi la matérialisation de connaissances, de pratiques (savoir faire). La durée de vie longue permet de laisser le témoignage d'une pratique (faire savoir). C'est avec la technique de la terre crue que J. Dethier en donne un exemple (Dethier, 2008). A ce sujet, P. Mora s'interrogeant sur l'importance de la durée de vie des bâtiments rappelle qu'en réduisant celle-ci, l'image culturelle, technique et technologique transmise aux générations futures pourraient s'en trouver dégradée (Mora, 2005).

Parfois, les bâtiments qui ont perduré acquièrent un statut de patrimoine collectif qui échappe aux éléments individuels qui le composent. Ce statut entraîne une capacité attractive d'une portée spatiale plus ou moins grande qui peut permettre, par exemple, des activités de tourisme. Réciproquement, ce statut entraîne l'augmentation de la valeur économique ou d'image du bâtiment.

La durée de vie longue du produit « bâtiment », comparée à celles des autres produits de la vie courante, lui confère aussi un statut particulier. C'est le temps qui confère ce statut (Rossi, 1981). Il n'est pas simple produit mais devient objet « singulier ». Ce statut d'élément de patrimoine culturel, collectif et individuel est acquis au travers du temps. Au travers d'une réduction de durée de vie, n'y aurait-il pas un risque de rapprocher cet objet particulier des

produits de consommation ? Il est cependant à noter que ce n'est pas la durée de vie en elle-même qui donne ce statut au bâtiment mais davantage la qualité architecturale.

L'état de l'art a montré aussi le caractère psychologiquement et socialement « destructeur » d'une démolition-reconstruction pour un nombre important des occupants souvent composés de personnes âgées, familles monoparentales et en difficulté. Pour d'autres, telles que les jeunes familles, le départ qu'impose la démolition est une occasion positive. Les parts relatives des deux groupes nécessiteraient une analyse plus fine de la composition des occupants (Rojas Arias, 2007). Pour les premiers, la violence du sentiment lors de la démolition trouve son origine dans deux sources. La première réside dans un sentiment d'appartenance à une communauté qui débute dans l'immeuble lui-même. Les évaluations sont rares et il faut aller chercher un programme fédéral d'évaluation des trajectoires réalisé aux Etats-Unis, « Moving to opportunity », pour apprendre que sur ce terrain d'analyse, deux années après la démolition, 50 % de la population est retourné dans le quartier d'origine (Bacque, 2007). D'autre part, le mal-être relève de la manière dont les occupants sont traités en termes d'information. Il est arrivé que ce soit par les médias que les occupants apprennent le projet de démolition de leur immeuble. Les informations précises sur ce traumatisme manquent mais l'impact est tel que certains organismes, bailleurs de logements sociaux, tentent de mettre en œuvre les rénovations au travers d'une démarche de développement soutenable avec le maintien des occupants dans les lieux. Pour illustrer cette question, nous reprenons ci-dessous l'extrait de l'entretien du 27 avril 2011 réalisé par moi-même, avec M. Plouchard, Directeur technique SA-Languedocienne, responsable des actions de développement durable.

MM : Votre organisme a-t-il une réflexion sur l'impact de la durée de vie des logements sur le développement soutenable.

Didier Plouchard : Tout à fait ! C'est avec la question énergétique le dossier le plus important. Dès que nos bâtiments sont évalués comme des produits de qualité et suite à un diagnostic précis, nous décidons s'ils doivent être rénovés ou démolis en vue d'une reconstruction. La première solution est privilégiée. C'est une manière de réduire les impacts environnementaux.

MM : De quelles natures et dans quelle proportions sont les gains ?

DP : La nature des gains est multiple. En ce qui concerne les évaluations, pour l'heure, seule une évaluation d'impact énergie/carbone sur un cycle complet a été entreprise. L'objectif a été de déceler les postes que nous pouvions optimiser.

MM : Dans une approche de développement soutenable, la stratégie comprend-elle d'autre poste ?

DP : Comme je le disais, nous cherchons à réutiliser les bâtiments mais nous faisons plus fort. Nous cherchons à rénover nos immeubles en maintenant les occupants dans leur logement. Il ne suffit pas de reloger les occupants ailleurs pour pouvoir rénover nos bâtiments. Le relogement crée la rupture. Le développement soutenable ne se satisfait pas de fournir des logements rénovés plus cher. Nous avons voulu maintenir les occupants au sein de leur réseau social. Par exemple, un projet de rénovation à Saint-Gaudens comprend plusieurs axes stratégiques. Ces axes sont le maintien de la population, une isolation thermique par l'extérieure et enfin l'opportunité d'une isolation par l'extérieure pour agrandir le logement. L'extension fait souvent partie des vœux des occupants dont la famille s'est agrandie...

MM : Ces extensions ne posent-elle pas des problèmes d'éclairage naturel ?

DP : les anciennes ouvertures extérieures ont été agrandies de sorte que la quantité de lumière au fond des pièces reste suffisante.

MM : Y a-t'il des limites à ces stratégies ?

DP : Oui. Certains de nos immeubles sont inadaptés pour cette stratégie. Des pièces à l'origine trop petites rendent difficiles la mise aux normes... Tout cela nous donne des indications pour la conception des futurs logements.

Figure 19 : Extrait de l'entretien M. Plouchard, Directeur technique SA-Languedocienne, responsable des actions de développement durable.

Remarque : la SA Patrimoine loge près de 27 000 personnes dans 8000 logements en région toulousaine

Certains occupants ont fait l'objet d'un parcours résidentiel composé d'une succession de démolition. Les conclusions directes sont difficiles mais il résulte des courtes durées d'occupation un faible attachement au logement et au quartier.

Enfin, le rapport affectif au bâtiment, bien que difficile à caractériser, est différent selon le statut social de l'occupant. S'il est propriétaire, l'occupant aura un rapport affectif qui facilitera entre autre le besoin d'entretien et de conservation du bâtiment. S'il s'agit d'un bâtiment en vue d'un rendement locatif pour les propriétaires, l'affectif est moindre, l'entretien moins soutenu, le risque et le délai de démolition plus important.

C. La durée de vie du bâtiment et la ville

Il n'est pas pertinent d'ignorer les liens qu'entretiennent le bâtiment et la ville dans le cadre d'une approche sociale de développement soutenable. Chacun des bâtiments ainsi que l'ensemble formé par leur association ont des impacts fonctionnels, morphologiques, environnementaux et patrimoniaux sur la ville. Alors que A. Rossi qualifie les espaces publics de « singuliers » c'est-à-dire de noyau d'agrégation et de pôle d'attraction autour desquels viennent s'organiser les zones de résidence (Rossi, 1984), le temps vient conférer cette fonction singulière à l'ensemble constitué par les bâtiments. L'ensemble génère une entité, autonome et indépendante, qui une fois atteinte, lui donne à terme le statut de « quartier ».

L'interaction bâtiment / ville est cependant d'une grande complexité dans le fait qu'elle interpelle différentes échelles et de nombreuses disciplines.

Le bâtiment, matérialisant souvent la parcelle dans l'espace urbain, est un élément structurant l'îlot, la rue et par conséquent la ville. M Poëte écrivait : « *La ville naît dans un lieu bien précis mais c'est la rue qui la fait vivre* » (Poëte, 1930). Or la rue est aussi une succession de façades plus ou moins structurantes. Le bâtiment répond à une fonction qui le lie à la ville. Les façades sont les éléments de composition architecturale structurant la rue et la ville.

La durée de vie d'un bâtiment ne paraît avoir qu'un faible impact direct sur la ville. D'un strict point de vue fonctionnel, outre l'impact des travaux de démolition/reconstruction, il est possible d'imaginer qu'à fonction d'usage identique, voire à fonction d'usage améliorée d'un cycle à l'autre, la durée de vie du bâtiment ne soit pas fondamentale. Pourtant, face à ces hypothèses et analyses réductrices, différents impacts du registre « sensible » incitent aux questionnements.

Objectivement, les inconvénients de la fin de vie peuvent être listés :

- les impacts sociaux d'une déconstruction/reconstruction urbaine ou réhabilitation ;
- la perte d'usage temporaire ;
- la gêne de circulation piétonne et automobile ;
- les nuisances sonores, visuelles, olfactives ;
- la détérioration momentanée du paysage urbain ;
- les +/- values culturelles et de valeur symbolique de l'action démolition/reconstruction.
- les avantages résident dans l'amélioration potentielle du bâtiment dans sa fonction et dans ses liens avec l'îlot.

Dans le registre « sensible », les enjeux, décrits par de nombreux auteurs, Panerai, Lynch, Poète, Rossi..., sont multiples et les réponses à ses enjeux sont délicates (Panerai, 1999), (Lynch, 1998), (Rossi, 1984) (Poète, 1930). Il est difficile de recréer, ex nihilo, les fonctions d'un îlot urbain. A moindre échelle, pour sa participation au fonctionnement de l'îlot, la réussite de la reconstruction d'un bâtiment peut se révéler ardue. Pour illustrer cette idée, l'exemple des nombreux quartiers de ZAC des centres de villes est démonstratif. Malgré des investissements successifs visant la rénovation dans l'objectif d'une amélioration du fonctionnement, ces quartiers ne paraissent pas convaincre quant à leur fonctionnement. Pourtant, ces actions d'envergure surviennent seulement quelques années après la réception des travaux. Ces dysfonctionnements peuvent, probablement dans une plus faible mesure, se reproduire à l'échelle du bâtiment. La prise de la « greffe » peut s'avérer difficile.

Une autre difficulté réside dans le phénomène de « génie du lieu » soit le fait que le passant ait le sentiment de percevoir la charge des événements du lieu. Le « Genius loci » permet à un lieu de conserver son identité alors même que sa population se renouvelle de plus en plus rapidement (Lynch, 1998).

L'analyse peut aussi s'appuyer sur la base d'une démarche risques/opportunités. Supposons un bâtiment homogène avec son environnement et socialement performant. Un des risques au travers de l'action démolition/reconstruction est la perte de la cohérence du nouveau bâtiment et le risque d'une production d'un « produit de consommation » répondant à un besoin technique d'intérêts particuliers. Le risque « urbain » est la perte qualitative⁴⁰ dans la reconstruction, l'amoindrissement de la performance pour le fonctionnement de la rue. Ce risque est d'autant plus important que l'action de démolition/reconstruction s'accompagne mécaniquement et simultanément, en général, d'une ségrégation sociale.

A l'opposé, l'existence d'un bâtiment présentant des défauts constitue un risque. Les « objets » urbains en général et les bâtiments en particulier constituent un « handicap » du fait de leur inertie car les bâtiments successifs s'analysent comme le « sédiment » laissé par chaque vague du procès de production de la ville (Panerai, 1999).

Si au contraire, le bâtiment ne participe pas correctement au fonctionnement de la rue, l'action de démolition reconstruction peut-être favorable. Il s'agit là d'une opportunité pour la ville et pour l'occupant au travers de l'opportunité d'améliorer la qualité du bâti. La démolition/reconstruction peut être l'occasion d'améliorer la conception, l'intégration dans l'environnement et de bénéficier éventuellement de l'amélioration technologique des produits,...

Enfin, le prolongement de la durée de vie d'un bâtiment socialement « performant » sera bénéfique pour l'îlot voire la ville.

C'est la qualité de la commande, de la conception, de la réalisation et enfin de l'entretien qui garantie la pérennité au travers de la performance sociale établie et maintenue. Ce sont ici des causes favorables à la durée de vie et non ses impacts.

⁴⁰ La notion de qualité est ici à prendre au sens large. Il s'agit d'un bâtiment bénéfique pour le fonctionnement de l'îlot ou la ville qu'il s'agisse des aspects fonctionnels, architecturaux, urbains ou culturels....

Synthèse

La prise en compte de la durée de vie du bâtiment participe à l'approche sociale de notre question d'impact de la durée de vie. Certains points sanitaires et d'externalités sont corrélés aux impacts environnementaux et économiques tels qu'analysés dans les sections précédentes.

Le bâtiment échappe au statut de produit de consommation courante même s'il le comprend. Il a la capacité d'être un vecteur culturel. Lorsque le bâtiment est replacé dans son contexte urbain, au travers des fonctions urbaines qu'il permet ou favorise, le produit de consommation qu'il pourrait être se transforme en symbole porteur de messages, de valeur affective et culturelle. Il est le symbole des valeurs et des savoirs faire d'un groupe et le vecteur de communication des informations. Il n'est plus objet mais élément d'un système. Il participe au système qu'il enrichit, ce dernier en retour garantit sa pérennité. Cette pérennité lui permet de s'enrichir de nouveaux messages. Prendre en compte ces caractéristiques spécifiques, liées à la durée de vie, n'est pas une position « passéiste ». Il s'agit de se servir du passé pour les actions futures. Après analyse, en remplaçant les bâtiments ayant de mauvaises performances sociales par d'autres destinés à une longue durée de vie, les espaces de la ville se trouvent enrichis.

La durée de vie des bâtiments agit sur les facteurs sociaux mais les facteurs sociaux agissent sur la durée de vie. Les facteurs sociaux induisent des causes modifiant la durée de vie. L'adaptabilité fonctionnelle est le critère le plus influent sur la durée de vie (cf Chapitre I). Ici, ce ne sont plus les impacts qui sont en jeu mais les causes. La capacité d'adaptabilité est le résultat de la connaissance culturelle du concepteur.

C'est dans l'approche sociale, dans le rapport du bâtiment à la ville et à l'individu que l'on va trouver l'origine des causes agissant sur le cycle de vie d'un bâtiment et sa fin de vie. C'est dans cette inversion de causes à effets sur la durée de vie que peut apparaître l'importance de la notion de réversibilité, définit pour la ville (Adolphe, 1995) et reprise ici à l'échelle du bâtiment.

Enfin, concernant le parc de logement, la durée de vie augmentée permet à moyens constant, soit l'augmentation de son volume, soit l'utilisation des ressources à d'autres usages. La durée de vie a donc bien un impact social délicat à quantifier mais sans doute essentiel.

III.3.5. Synthèse des résultats et limites

L'importance de la durée de vie

L'étude de l'indicateur de GES, soit d'une dizaine d'indicateurs environnementaux corrélés, et de l'indicateur économique, démontre l'importance du facteur de durée de vie du bâtiment de logement. Ce résultat est valable quelle que soit la solution technique choisie des murs porteurs. Nous avons démontré que pour ces indicateurs, la durée de vie est plus importante que le choix même du produit. L'étude de l'impact social de la durée de vie présente l'intérêt d'une durée de vie « longue » principalement dans la mesure où le bâtiment peut se charger de messages culturels et acquérir de la valeur « sociétale ». Il est le symbole des valeurs et des savoirs faire d'un groupe et le vecteur de communication des informations.

La maintenance

Par ailleurs, seuls les indicateurs corrélés à celui de GES et l'indicateur économique sont étudiés. Néanmoins considérant un facteur d'impact, quel qu'il soit, l'évaluation de l'impact se présentera sous la forme d'une fonction inverse du temps. A cette fonction, il est nécessaire d'ajouter celle des impacts du maintien en l'état.

L'absence de classement des produits

Une autre limite réside dans le fait que nos résultats ne permettent pas de présenter réellement un classement des solutions techniques en termes de performance. L'objectif n'est pas ici de désigner une solution technique plus performante. Tout d'abord, un tel objectif, nécessiterait de connaître avec précisions les capacités réelles des produits en terme de durée de vie. Par ailleurs, une solution technique peut présenter la meilleure performance pour un indicateur et la plus mauvaise pour un autre. Ces résultats imposeraient donc l'utilisation d'un outil d'analyse de choix multi-critères.

Le confort d'été

Ensuite, les simulations du confort d'été, visant à comparer l'impact des différences d'inertie d'une solution technique à l'autre, présentent des valeurs faibles au point que nous les avons négligées. Considérant un lieu géographique tel que Toulouse, il est possible que les calculs, basés sur des données météorologiques résultantes de valeurs moyennes, ne permettent pas la mise en évidence des causes justifiant les comportements actuels d'usage croissant de climatisation. De plus, les modèles élaborés sur la base d'une politique de lutte contre le gaspillage d'énergie de chauffage, ne sont pas adaptés à la mesure des consommations liées au confort d'été.

Les produits à base de végétaux

Par ailleurs, les informations de la base de données INIES concernant les émissions de GES des produits bois ont déjà fait l'objet d'observation de notre part. Les valeurs négatives ne permettent pas d'analyser les impacts tout au moins sur la base du protocole utilisé. Les données des autres sources concernant ces produits ne remettent pas en question nos résultats ou seulement de manière très relative.

Les risques

De plus, ces évaluations sont réalisées compte tenu des limites énoncées lors de l'étude de l'unité du mur. Les risques de l'interruption de la durée de vie ne sont pas pris en compte.

L'évolution des technologies

Enfin, une autre limite de la méthode réside dans l'absence de connaissance sur les évolutions technologiques concernant les procédés de fabrication, de mise en œuvre, de maintien, de déconstruction et de recyclage. Les simulations sont donc réalisées avec les connaissances actuelles et disponibles. Cette restriction est d'autant plus importante que la question se place sur une durée longue de temps.

Conclusion

Les résultats impliquent que nous ne devons pas nous arrêter aux performances brutes d'un produit pour le désigner comme respectueux ou non de l'environnement ou performant dans le cadre d'une approche en termes de développement soutenable. Il est nécessaire de connaître d'une part sa durée de vie intrinsèque et d'autre part d'envisager le comportement qu'il induira sur ses usagers et sur les propriétaires dans leurs décisions stratégiques concernant la durée de vie. Les résultats qui présentent les phases de production et démolition comme faiblement impactant en comparaison de la phase d'usage (Osso, 1996) (Liu et al., 2010), (Pulselli,) sont remis en question. Certes les études de ces auteurs portent sur des bâtiments ayant d'autres fonctions d'usage. Mais en ce qui concerne les évaluations présentes, les proportions sont très différentes. La phase de construction déconstruction est devenue tout aussi importante que la phase d'usage en ce qui concerne les impacts.

Dans la lutte contre les impacts négatifs environnementaux, la phase de production du bâtiment prend de l'importance compte tenu du travail et des progrès réalisés pour la phase d'usage. L'objectif de ne pas faire supporter les traces négatives de nos actions aux générations futures, ne nous dispense pas d'une réflexion quant à l'éventuelle importance de transmettre des traces positives, telles que certaines ont pu nous être léguées.

L'EUROCODE 0 définit des durées pour le calcul de dimensionnement des bâtiments sur la base de calculs statistiques de défaillance. Si la durée de vie de 50 ans mentionnée pour les bâtiments courants devenait un objectif des professionnels, nous avons montré qu'elle ne favoriserait pas une optimisation en termes de développement soutenable.

Il résulte de ces observations la nécessité :

- d'obtenir des évaluations techniquement et scientifiquement établies des durées de vie des produits en conditions normales d'utilisation;
- de choisir des produits en vue d'une optimisation de l'impact des GES considérant la durée de vie du bâtiment désirée tout en prévoyant un changement d'objectif ;
- de concevoir le bâtiment permettant de répondre au mieux à l'évolution des besoins et donc de retarder l'arrivée de l'obsolescence annonciatrice de la démolition ;
- de sensibiliser le maître de l'ouvrage dans ses choix lors de la construction neuve ou dans ses décisions entre les possibilités de rénovation ou de démolition ;
- de mieux mesurer l'intérêt du développement du recyclage des produits et de faciliter les actions qui la facilite ;
- d'engager une réflexion collective sur ce qu'une société désire transmettre aux générations futures en termes d'images et de valeurs.

CHAPITRE IV : ENRICHISSEMENT DU CADRE D'ANALYSE INITIAL POUR UNE PRISE EN COMPTE DE LA DUREE DE VIE DANS LE PROJET

Dans le sous-chapitre I.3, nous avons analysé le projet architectural et positionné les phases impactées par la durée de vie des éléments du bâtiment ou du bâtiment lui-même. Nous avons vu qu'il est important d'obtenir les informations permettant de prendre des décisions dans la phase de conception.

Dans ce chapitre, nous allons tenter de répondre aux contraintes qu'impose un outil dont l'objectif est l'exploitation des connaissances produites au travers de notre thèse.

Cet outil a pour fonction de présenter aux concepteurs et aux maîtres d'ouvrage les performances de leurs décisions. En ce qui concerne les performances de développement soutenable, l'outil doit permettre, d'une part, d'arbitrer la décision entre la démolition ou la rénovation et d'autre part de comparer les solutions techniques envisagées. Compte tenu des incertitudes présentées dans cette thèse, l'outil se limite aux indicateurs environnementaux et économiques tels qu'établis et disponibles. Les résultats doivent permettre de situer la performance de la décision envisagée en rapport des solutions extrêmes plus et moins performantes.

Ce chapitre comprend donc deux parties. La première partie vise à présenter schématiquement le fonctionnement de l'outil qui exploiterait ces connaissances, en le situant par rapport au fonctionnement des outils actuels. La seconde partie fournit les informations permettant de réaliser cet outil en proposant une nomenclature, un cas d'utilisation, un arbre de déroulement et un diagramme de séquence.

IV.1 – Propositions pour une amélioration des outils existants

Afin de proposer des pistes d'amélioration des outils existants, nous allons utiliser les schémas de fonctionnement. Ceux-ci permettent de modéliser le processus interactif global de l'outil. Il facilite une représentation graphique des fonctions que l'on affine d'étape en étape.

IV.1.1 Présentation schématique de fonctionnement des outils d'évaluation

L'objectif de l'outil est de présenter, selon les choix de solutions techniques et la durée de vie estimée, l'évaluation de l'impact d'un indicateur choisi.

Les outils d'évaluations existants fonctionnent sur le principe schématique suivant :

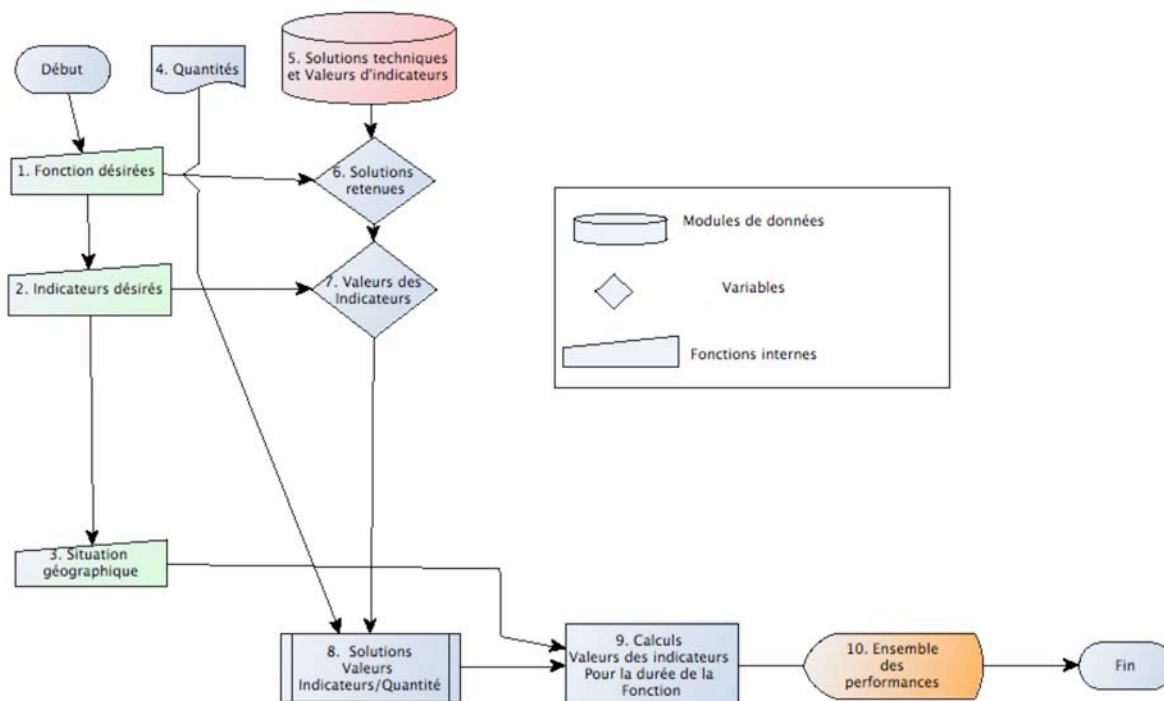


Figure 20 : Schéma de fonctionnement schématique des outils d'évaluation

Description

Fonction désirée

Les outils existants proposent des éléments particuliers du bâtiment ou un bâtiment complet.

Par exemple, l'outil COCON propose l'évaluation de produits spécifiques, un ensemble de produits constituant une solution technique ou encore un bâtiment complet hors système de chauffage. L'outil EQUER lui propose l'évaluation d'un bâtiment complet.

Indicateurs désirés

Les évaluations peuvent concerner la consommation d'énergie, les émissions des GES, d'autres indicateurs ou un bilan environnemental complet. Les évaluations étaient réalisées pour la phase d'usage par le passé mais aujourd'hui, la règle est le cycle de vie complet avec le détail des impacts précisés phase par phase. Les indicateurs sont ceux du domaine environnemental.

Exemples : Les évaluations étaient spécifiquement énergétiques au travers du développement de programmes tels que TRNSYS ou Pleiade+Comfie. Aujourd'hui, des logiciels tels que EQUER, associe les logiciels de calculs thermiques dynamiques à des analyses de cycle de vie complet.

Situation géographique

Afin de tenir compte des impacts d'usage liés au confort d'été et d'hiver, l'utilisateur doit situer géographiquement le projet. Cette information est nécessaire pour le calcul des besoins énergétiques liés aux facteurs climatiques.

Quantités

En particulier, lorsque l'évaluation attendue porte sur un bâtiment complet, il est nécessaire de rentrer, pièce par pièce, les quantitatifs de surfaces, de linéaires et de volumes, ainsi que les orientations.

Solutions techniques proposées

Les solutions techniques sont listées dans des bases de données. Elles sont soit des produits désignés (INIES) soit des produits « génériques » (KBOB-ECOINVENT). Une évaluation complète de bâtiments implique que toutes les solutions techniques soient répertoriées tout au moins par groupe de famille.

Exemples : COCON et Elodie utilisent INIES, EQUER utilise ECOINVENT

Solutions retenues

Pour chaque élément participant au bâtiment, l'utilisateur doit préciser les produits désirés ou le type de solutions techniques retenues.

Valeurs des indicateurs retenus

Le logiciel reprend pour chaque produit ou chaque solution technique retenue, les valeurs des indicateurs désirés dans la base de données associées.

Exemples : pour le changement climatique provoqué par 1m² de béton banché de 20 cm d'épaisseur

COCON retient 61 kgéqCO₂ pour une durée de vie de 100 ans

EQUER retient 58 kgéqCO₂ pour une durée de 90 ans

Solutions/Valeurs des indicateurs/ Quantités

Le logiciel reprend les quantités désirées et associe la valeur des indicateurs dont l'opérateur désire le calcul

Calculs.

Le logiciel calcul la valeur des différents indicateurs d'impacts sur le cycle de vie complet. Exemples : si la quantité nécessaire de béton banché est de 100 m², COCON retient une valeur de 6100 kgéqCO₂ et EQUER 5800 kgéqCO₂ pour l'ensemble du cycle de vie quel que soit l'outil.

Rappel : La durée de vie des produits utilisés est souvent ignorée. Lorsqu'elle est prise en compte, il s'agit, soit de la Durée de Vie Typique, par exemple COCON avec INIES, soit de durées de vie forfaitaires, par exemple 50 ans BEES et 90 ans pour EQUER.

Présentation des performances

Les performances sont présentées sous forme de graphiques. Les résultats obtenus pour les différents indicateurs sont ensuite pondérés afin de pouvoir les présenter de manière homogène. Le type de graphique privilégié est le graphique « radar ». Souvent un projet de référence permet de comparer la performance du projet envisagé à un projet optimum. Les outils peuvent aussi être utilisés pour l'évaluation d'un choix entre une démolition – reconstruction et une rénovation.

Remarque : la présentation permet de comparer des solutions entre elles mais les différentes évaluations des indicateurs ne font pas l'objet d'une hiérarchisation ni d'une pondération.

Exemple de présentations de résultats :

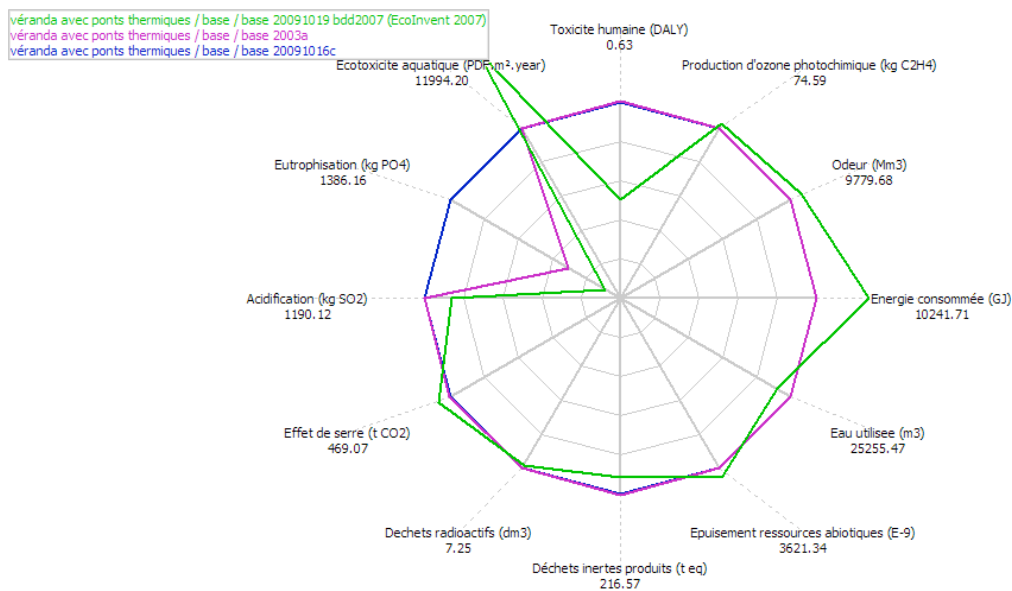


Figure 21 : Résultats d'évaluation environnementale de l'outil EQUER

Nos travaux ont montré comment les durées de vie des produits utilisés peuvent être importantes en terme d'efficacité et de performance. Aussi, il nous est apparu important de proposer aux concepteurs de bâtiments des modifications des outils actuels sur la base de ce qui suit.

IV.I.2. Proposition d'amélioration des outils actuels d'évaluation

Pour une meilleure prise en compte de la durée de vie des produits constituant le bâtiment et les bâtiments eux-mêmes, nous proposons de modifier schématiquement les outils actuels sur la base du schéma ci-dessous.

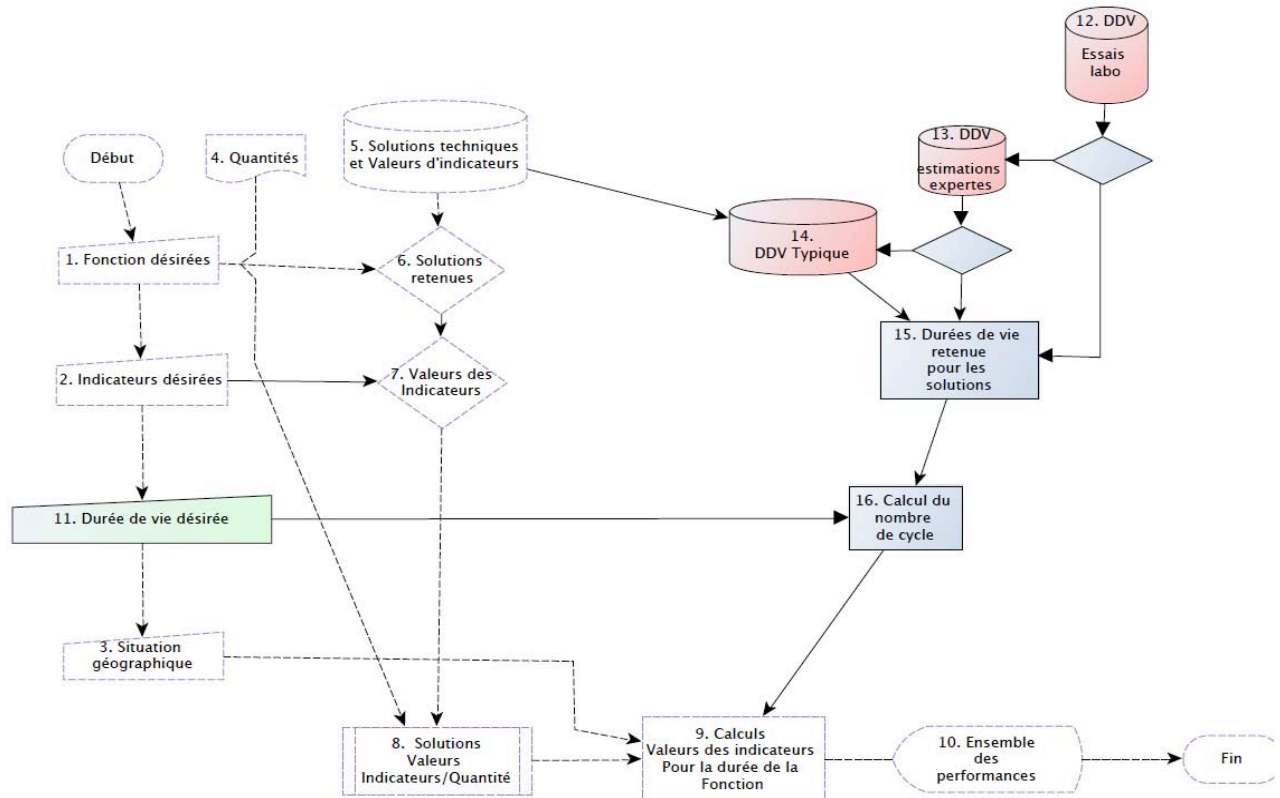


Figure 22 : Schéma de la proposition de modification des outils d'évaluation

Afin d'évaluer précisément et le plus réellement possible la performance d'un bâtiment, il est nécessaire de préciser la durée de vie désirée du bâtiment et de connaître la durée de vie des produits dans les conditions d'usage prévu. Le principe est schématisé ci-dessus. Le bloc 11 correspond à la durée de vie envisagée.

Durée de vie désirée

Dans le cadre d'une optimisation, il est nécessaire de connaître la durée de vie désirée. Cette durée est celle qui est connue au début du projet. Elle peut être aussi celle projetée dans le cadre d'un choix à faire entre la démolition-reconstruction d'un bâtiment existant ou encore de sa rénovation. Dans ce dernier cas, les impacts du projet initial peuvent être réduits à zéro tandis que ne seront pris en compte que ceux concernant la remise en état.

Pour la durée de vie des produits, nous proposons une prise en compte avec trois niveaux de précision en fonction du niveau d'avancement des connaissances concernant les produits. Les niveaux sont « Essais labo », « Estimations expertes » et « Durée De Vie Typiques ». Ces niveaux correspondant aux blocs 12, 13 et 14 sont décrits ci-dessous.

Essai labo

Ce niveau correspond niveau élevé, idéal. Il correspond à la connaissance de la durée de vie des produits proposés sur le marché. Cette durée est établie à l'aide de modèle probabiliste et vérifiée par des essais de vieillissement en laboratoire. Ces évaluations sont compliquées et coûteuses à réaliser. Ces connaissances sont donc longues à obtenir.

Estimations expertes

Ce deuxième niveau de précision, consiste à obtenir des estimations dites expertes, basées sur les observations des produits exploités. Ce deuxième niveau laisse néanmoins une part à la subjectivité attachée au facteur humain. De plus, nous n'avons aucune garantie que les conditions de production, de mise en œuvre et d'exploitation des produits en place soient les mêmes que ceux pour lesquels nous voulons réaliser les évaluations.

Durée de vie typique

Ce dernier niveau est le moins précis et le plus théorique. Il est davantage associé à une durée d'usage établie *a priori*, par précaution à la recherche d'un moindre risque d'erreur sur la donnée, plutôt qu'à une capacité intrinsèque du produit. Cette donnée est établie au sens de la norme NF P01-010.

Durée de vie retenue pour les solutions techniques

La durée retenue est celle obtenue du niveau le plus élevé au moins élevée par défaut.

Calcul du nombre de cycles

Le nombre de cycle complet est obtenu par le rapport de la durée de vie désirée par celle des produits sous réserve des dépendances déterminée dans le paragraphe II.2.1 B page 91.

Remarque : les coûts globaux constituent un indicateur au même titre que les indicateurs environnementaux.

Prise en compte de la sensibilité aux conditions d'utilisation

Bien que situé hors du champ de notre recherche, il apparaît évident que les outils d'évaluations actuels négligent deux facteurs. Il s'agit des conditions climatiques autres que thermiques et de la politique d'entretien qui influencent la durée de vie des produits. Le développement de la prise en compte de ces deux facteurs est schématisé ci-dessous (schéma 3).

Durées de vie résultantes

L'objet ici consiste à calculer, à partir des durées de vie obtenues pour chaque produits des blocs 12, 13, et 14 et après imputation des coefficients de sensibilité à l'entretien et aux conditions climatiques les durées de vie les plus probables.

Remarque : la proposition concerne un outil qui évalue les impacts sur la durée de vie des produits et du bâtiment. La prise en compte des impacts comprenant la phase d'usage, nécessite l'entrée de données supplémentaires telles que l'orientation, les ouvertures et le type de chauffage.

Afin d'élaborer l'outil proposé, nous fournissons à la suite les éléments structurant le cahier des charges qui permet son élaboration.

IV.2 Eléments du cahier des charges

Le paragraphe précédent montre la difficulté d'une prise en compte précise de la durée de vie des produits et du bâtiment. Néanmoins, Il paraît important de fournir les pistes concrètes qui permettent l'élaboration d'un outil exploitant les connaissances fournies. Ce sous-chapitre comprend donc pour cet outil, l'arbre de déroulement et l'interface homme-machine.

IV.2.1 L'arbre de déroulement

L'arbre de déroulement consiste en une représentation séquentielle de déroulement des traitements et des interactions entre les éléments de l'outil et les utilisateurs (acteurs). Le diagramme constitue une étape très importante de la conception du logiciel.

L'arbre de déroulement de l'outil proposé est schématisé ci dessous :

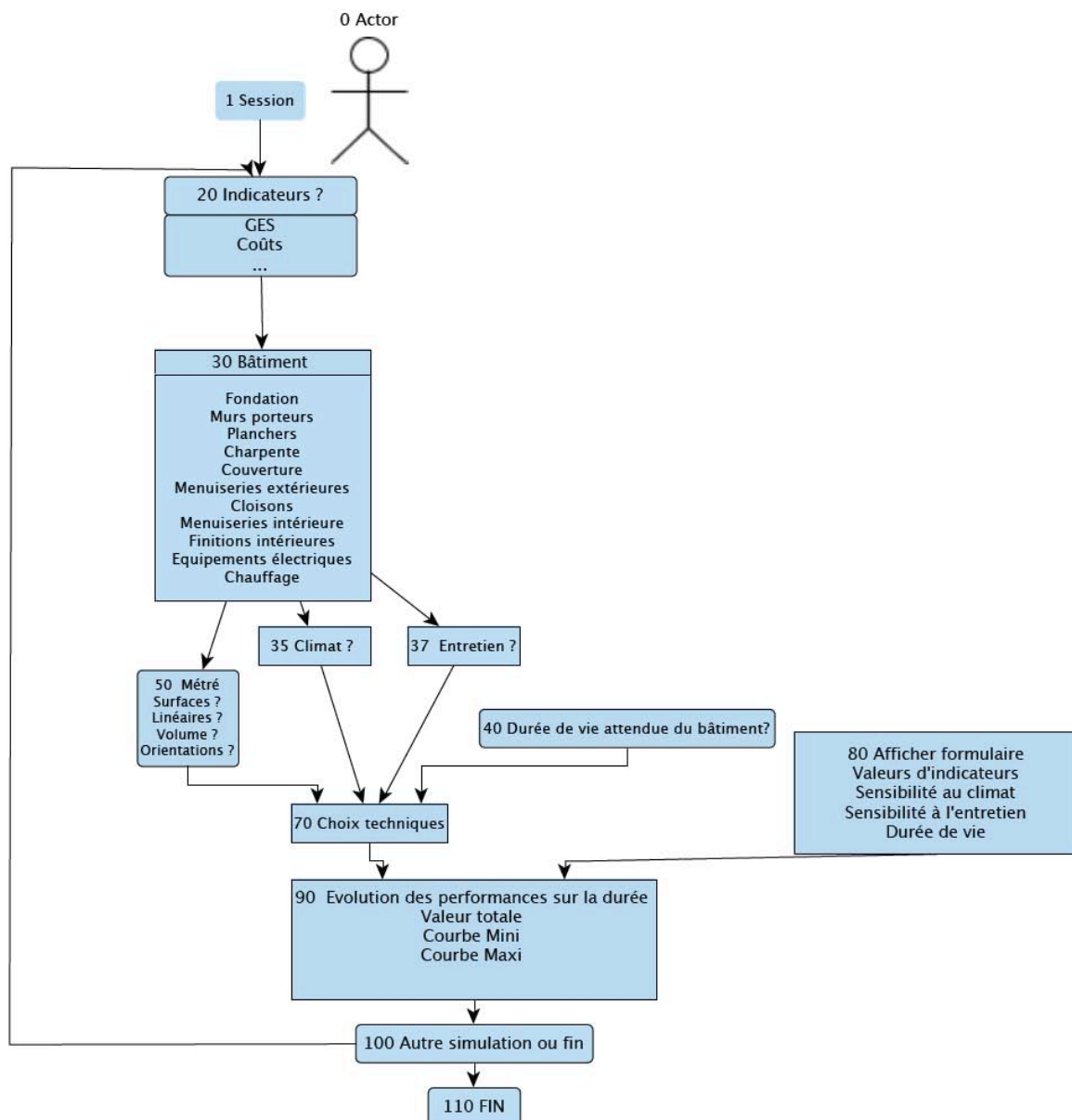


Figure 24 : Arbre de déroulement

Dans le reste de ce document, nous utiliserons les acronymes suivants :

Ind_a	: indicateur retenu
C_{cn}	: Composant n
P_{pn}	: Produit n évalué
Facteur α	: facteur climatique,
Facteur β	: facteur d'entretien
DDS	: durée de service attendue
DDV _{pn}	: durée de vie du produit n
$S\alpha_{pn}$: coefficient de sensibilité du produit au climat
$S\beta_{pn}$: coefficient de sensibilité du produit à l'entretien
$Imp_{pn}(T_t)$: impact du produit n à l'instant t
Ind_{pn}	: valeur de l'indicateur du produit n
Imp_{pnamin}	: impact du produit le moins impactant
Imp_{pnamax}	: impact du produit le plus impactant
t	: temps

VI.2.2 Description de l'interface homme-machine (IHM)

Tel que proposé dans le paragraphe précédent, l'interface utilisateur de l'outil proposé se présente comme suit :

1 - Ouverture de session

L'opérateur ouvre la session

20 - Choix de l'indicateur (Ind_a)

L'opérateur précise l'indicateur dont il désire l'évaluation.

30 - Choix du composant (C_n)

L'opérateur précise le composant (C_n) dont il désire l'évaluation.

Le programme utilise l'arbre des dépendances pour proposer l'évaluation des composants associés. Par exemple, le « corps du mur » est associé aux composants « isolant », « revêtement extérieur »... L'interdépendance impose le choix de solutions techniques à l'étape 70 pour ces composants liés.

35 – Climat

L'opérateur précise le niveau climatique de la situation du composant (facteur α)

37 – Entretien

L'opérateur précise l'entretien envisagé du composant (facteur β)

40 - Durée de vie attendue

L'opérateur précise la durée de service *DDS* attendue pour le ou les composants. La *DDS* peut être renseignée précisément ou précisée au sein de « *DDS* » proposées sous forme d'intervalles. Par défaut la *DDS* est égale à 300 ans.

50 – Métré

L'opérateur précise les surfaces, les linéaires ou les volumes du composant C_n .

70 – Choix de la solution technique

L'opérateur sélectionne le ou les choix de solutions techniques en sélectionnant le produit P_n et les produits associés. La durée de vie du produit P_{pn} , DDV_{pn} , est successivement et par défaut, obtenue :

- Dans une base de données obtenue grâce à des essais en laboratoire ;
- Fournie par une estimation experte sur la base d'observation ou par l'opérateur lui-même ;
- Extraite de la base de durées de vie typique au sens de la norme NF P01-010;

Les sensibilités aux facteurs climat ($S\alpha_n$) et entretien ($S\beta_{pn}$) sont renseignées par type de produit dans la base de données.

Parallèlement, le programme sélectionne les produits de la base ayant l'impact Imp_{pn} mini et maxi. Pour les produits satisfaisant la condition suivante sur la durée de vie

$$DDV_{pn} * S\alpha_{pn} * S\beta_{pn} < DDS,$$

le programme prend en compte les produits ayant le facteur d'impact

$$Imp_{pn} / (DDV_{pn} * S\alpha_{pn} * S\beta_{pn}) * DDS$$

minimum et maximum.

Pour les produits avec

$$DDV_{pn} * S\alpha_{pn} * S\beta_{pn} > DDS,$$

le programme charge les produits ayant le facteur d'impact

$$Imp_{pn} * S\alpha_{pn} * S\beta_{pn}$$

minimum et maximum.

Le programme retient ensuite le plus petit et le plus grand impact des 4 données obtenues.

90 – Résultats

Pour le composant et les composants dépendants, il est établi :

Variable : T_t , avec $T_0 = DDV_{pn} * S\alpha_{pn} * S\beta_{pn}$

Incrémentation : $DDV_{pn} * S\alpha_{pn} * S\beta_{pn}$

$$T_{t+1} = T_t + DDV_{pn} * S\alpha_{pn} * S\beta_{pn}$$

Impact à l'instant T_t : $Imp_{pn}(T_t) = Ind_{pn} * T_n / (DDV_{pn} * S\alpha_{pn} * S\beta_{pn})$

Impact à T_{t+1} : $Imp_{pn}(T_{t+1}) = Imp_{pn}(T_t) + Ind_{pn}$

Parallèlement le programme présente l'évolution des solutions présentant l'impact minimum et l'impact maximum avec :

$$Imp_{pnmin}(T_n) = Ind_{pnmin} * T_n / (DDV_{pn} * S\alpha_{pn} * S\beta_{pn})$$

$$Imp_{pnmax}(T_n) = Ind_{pnmax} * T_n / (DDV_{pn} * S\alpha_{pn} * S\beta_{pn})$$

Le programme présente graphiquement l'évolution des trois fonctions dans le temps.

100 – Autre simulation ?

L'outil intégrera d'autres fonctionnalités en lien ou non avec les précédentes, ainsi l'opérateur peut choisir de réaliser une autre simulation, indépendante ou cumulative de la précédente.

110 - Fin

IV.3 Exemples de résultats de l'outil proposé

Afin de visualiser les résultats, des exemples de simulations, extraits du prototype de l'outil sont présentés ci-dessous.

IV.3.1 Performance actuelle du bâtiment

La figure 24 présente l'état actuel des émissions d'un bâtiment de logement en blocs de béton creux compte tenu de l'ensemble des éléments constitutants.

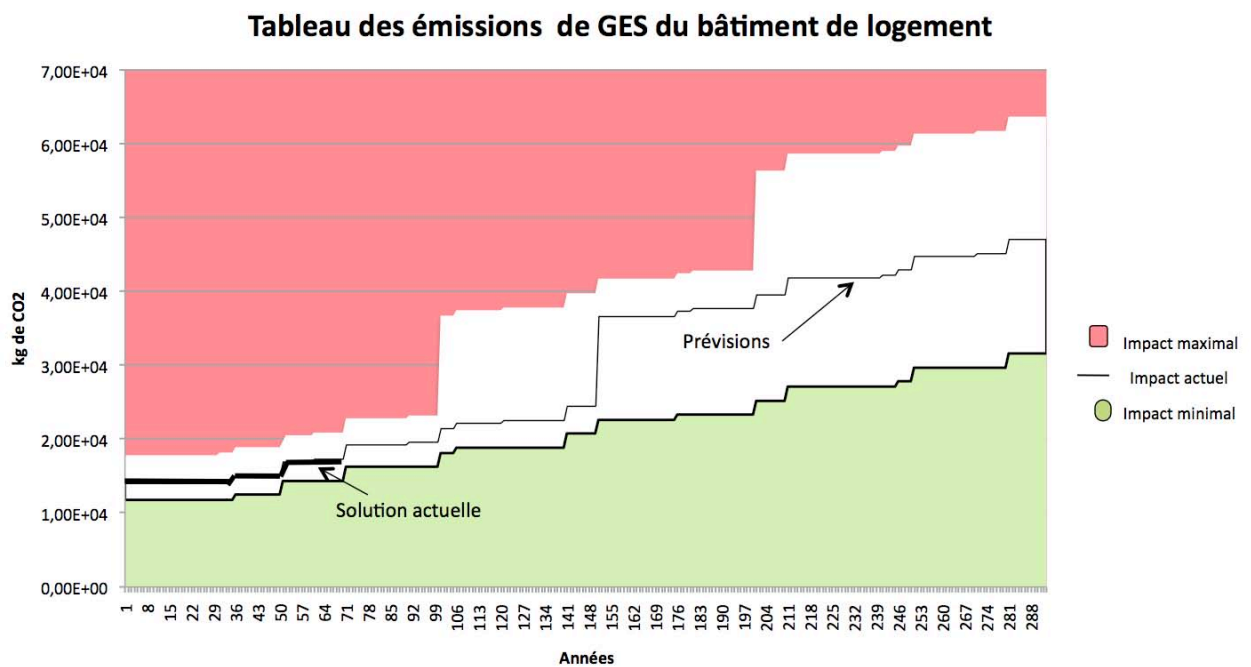


Figure 25 : Performance en termes de GES en l'état actuel du projet

IV.3.2 Impacts de la réalisation d'un projet

Le projet, pris comme exemple, consiste en la démolition du bâtiment actuel et la reconstruction en brique multi alvéoles ou bloc de béton creux.

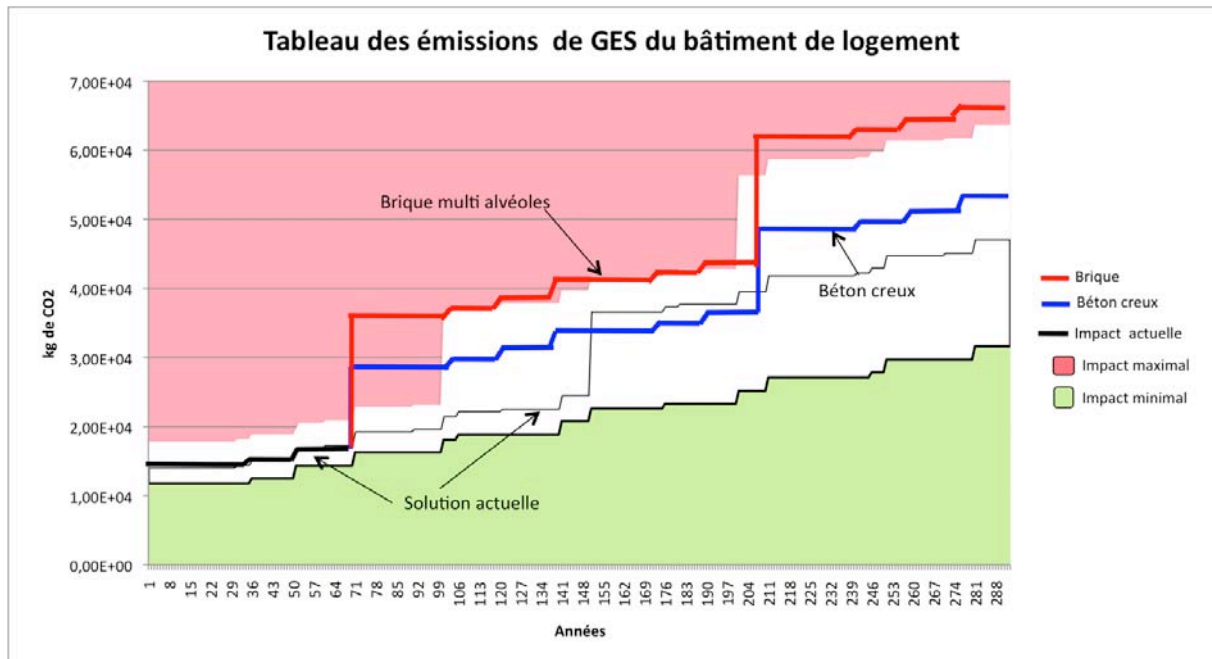


Figure 26 : Impact GES de la réalisation d'un projet de reconstruction

La présentation graphique permet clairement de lire les conséquences de ses décisions. Remarque : il est possible d'additionner les impacts de l'usage qui permet d'obtenir une réelle performance en cycle de vie.

IV.4 Nécessité d'informations et perspectives d'évolution

Notre thèse a montré les lacunes d'information nécessaires pour l'optimisation des décisions en termes de stratégie de rénovation ou reconstruction ainsi que pour le choix de solutions techniques. Ces informations portent sur la connaissance de la durée de vie des produits et de leur mise en œuvre ainsi que sur la constitution d'indices qui réduirait le nombre d'impacts à prendre en compte.

IV.4.1 Connaissance de la durée de vie des produits

La proposition de cet outil appelle le développement de la connaissance de la durée de vie des produits de construction, de l'impact de la conception, de la réalisation, de l'entretien, et de l'exposition aux agressions climatiques. L'investigation et la publication sur ces questions permettront d'obtenir des résultats plus précis et d'éviter des décisions contre performante.

IV.4.2 Dans l'attente de la constitution d'indice

Il manque aux concepteurs et maîtres d'ouvrage des informations concernant l'importance relative des indicateurs. Par exemple, entre deux solutions, l'une plus impactante sur le climat, l'autre sur l'acidification, quelle solution doit-elle être privilégiée ? Dans l'attente, l'espoir réside dans une solution la moins impactante pour tous les indicateurs. Mais est-elle la moins coûteuse ?

Le concepteur et développeur d'outil ne peuvent seuls constituer un ou plusieurs indices.

Conclusion

Les outils d'évaluation sont en général de niveau expert. Par manque de temps et compte tenu de leurs difficultés professionnelles, nous le savons, les concepteurs n'investissent pas facilement les nouveaux outils d'évaluation. Ce constat n'est pas spécifique au secteur, il est récurrent. Il existe toujours un décalage, plus ou moins important, entre l'évolution des techniques et sa connaissance par les professionnels. Nous pourrions, par exemple, citer l'installation de pompes à chaleur avec un système d'échange ancien. Quoi qu'il en soit, cette méconnaissance entraîne la contre performance. Concernant notre question, et dans l'attente de l'évolution des outils, de leurs appropriations par les professionnels la prise en compte de l'impact de la durée de vie des solutions techniques en regard des performances peut faire l'objet d'études génériques. La production d'informations générales serait préférable à une absence d'information susceptible de générer des décisions contre-productives.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

I. Synthèse de notre travail

I.1. Contributions pour l'approche de développement soutenable

L'importance de la durée de vie a été démontrée. L'impact de la durée de vie sur les indicateurs de développement soutenable est réel. L'étude de l'indicateur de GES a permis de réaliser simultanément le comportement concernant l'énergie primaire, l'énergie primaire procédé, l'énergie non renouvelable, les déchets valorisés, les déchets radioactifs, la pollution de l'air, l'acidification, l'épuisement des ressources, et la consommation d'eau. L'indicateur économique a permis lui aussi de mettre en évidence le comportement d'un bâtiment en fonction de sa durée de vie. Plus précisément et d'une manière générale, **quelle que soit la solution technique retenue, une durée de vie courte d'un bâtiment de logement, n'optimise pas les performances dans l'approche du développement soutenable. L'allongement de la durée de vie paraît toujours favorable quelles que soit les solutions techniques retenues. A l'inverse, lorsque la durée de vie est fixée, a priori, l'information peut orienter le choix de la solution technique en vue d'une optimisation. Une fois les durées de vie des solutions techniques mieux connues, le concepteur pourra en fonction de la durée attendue du bâtiment, faire le choix de la solution la moins impactante sur le critère retenu.**

L'impact social de la durée de vie n'a pas été approfondi pour les raisons exposées. Néanmoins, les impacts de la durée de vie du bâtiment sur ce dernier « pilier » sont réels. Par définition, une approche en termes de développement soutenable consiste à ne pas réaliser d'actions qui puissent nuire aux générations futures. Les bâtiments anciens sont très souvent des traces positives léguées par les générations précédentes.

Nous avons montré que pour un certain nombre d'indicateurs la durée de vie du produit en situation est plus importante que le choix même du produit. Les résultats impliquent qu'il ne faille pas observer uniquement les performances brutes d'un produit pour le désigner comme respectueux ou non de l'environnement. Il est nécessaire de connaître sa durée de vie intrinsèque et le comportement qu'il induira de la part des usagers et des propriétaires.

Les gains, tout au moins théoriques, des consommations d'énergie en phase d'usage, ont accru l'importance relative de la phase de production/démolition... Pourtant, cette dernière n'a été que peu étudiée en ce qui concerne ses impacts en comparaison des travaux concernant la phase d'usage.

L'EUROCODE 0 définit des durées pour le calcul de dimensionnement des bâtiments sur la base de calculs statistiques de défaillance. **Bien que concernant uniquement la statistique du domaine de la mécanique et n'ayant pas vocation à préciser les durées de vie des bâtiments, si la durée de vie de 50 ans mentionnée pour les bâtiments courants devenait un objectif des professionnels, il est montré que les performances en termes de développement soutenable seraient très dégradées.**

Par ailleurs, les durées de vie typiques mentionnées dans les très intéressantes FDES induisent en erreur. La pertinence de l'information présupposerait que :

- le produit n'influence pas le comportement de l'utilisateur et du propriétaire
- les produits aient tous la même durée de vie physique

La remise en question des durées de vie typiques entraîne la remise en question des informations relatives aux unités fonctionnelles (UF). Seules les valeurs des indicateurs évaluées en analyse de cycle de vie complet, phase par phase ou globalement, sont réellement exploitables.

Les outils d'évaluation des performances en termes de développement soutenable ne prennent pas en compte la durée de vie avec pertinence. Basés sur des durées de vie forfaitaires, théoriques ou « typiques », ces outils fournissent des résultats plus ou moins éloignés de la réalité. De plus, sans mise en garde sur l'importance du paramètre de la durée de vie, ils sont susceptibles d'entraîner des décisions aux effets contre-productifs. Il est donc nécessaire d'organiser une réflexion méthodologique sur la prise en compte de la durée de vie. Une première piste de réflexion réside dans le cahier des charges proposé dans le chapitre IV de cette thèse.

I.2. Les limites

La durée de 300 ans de la fonction de logement, sur laquelle s'appuient les simulations, se justifie par l'observation de bâtiment de logements existants. Il est évident que, quelle que soit la solution technique, la valeur de la durée de vie est limitée. La valeur de 300 ans pour certaines solutions est peut-être une utopie. Il existe probablement une durée au-delà de laquelle, les coûts économique et environnemental de maintien en service présenteraient une préférence en faveur d'un remplacement dans le cadre d'une recherche d'optimisation. Concernant cette question, il est nécessaire de connaître d'une part les durées de vie physique des solutions et les conditions nécessaires pour les atteindre.

Seuls les bâtiments de logement ont fait l'objet d'une analyse dans cette thèse. Il est probable que des bâtiments d'autres secteurs, mécaniquement plus sollicités, nécessitant rapidement des entretiens de plus en plus coûteux, répondent à des lois de comportement différentes.

D'autres impacts environnementaux, tels que les déchets dangereux, l'énergie renouvelable, les déchets non dangereux, les déchets inertes et la pollution de l'eau, doivent être évalués au travers de cette question d'influence de la durée de vie. Les conclusions des performances des solutions techniques valent pour les indicateurs retenus. Les performances des solutions sont parfois contradictoires. C'est le cas, par exemple, avec la structure bois qui est l'une des plus performantes pour les GES et la plus défavorable en ce qui concerne les coûts. C'est aussi l'exemple d'une rénovation qui serait plus coûteuse économiquement que la démolition/reconstruction pourtant cette dernière est probablement préférable sur le plan environnemental. Des solutions évaluées au travers de différents indicateurs peuvent donc présenter des performances contradictoires. Ces contradictions interdisent toutes conclusions basées sur la comparaison des solutions techniques. Comparer les solutions techniques imposerait dans ce cas l'utilisation d'outils multi-critères d'aide à la décision.

Sans remettre en question les tendances, les résultats sont limités dans le temps car l'évolution fréquente des valeurs d'indicateurs impose une information en temps réel pour les évaluations et les comparaisons. Cette limite vaut pour les outils d'évaluation des performances des produits. Comment espérer encourager les producteurs à améliorer les performances de leurs produits si les outils d'évaluation utilisent des données figées ?

Les limites de ces résultats résident aussi dans le fait qu'ils ne prennent pas en compte le facteur de l'innovation technologique. Certes, le domaine du bâtiment, en dehors des constructions spécifiques telles que celles sismiques, n'est que peu sensible à l'évolution technologique. La sensibilité s'exerce davantage sur des questions d'équipements dont

l'accommodation n'appelle pas ou peu de prise en compte pour la structure. Rappelons de plus que les résultats sont ceux obtenus avec les connaissances actuellement disponibles.

La prise en compte des risques d'accident réduisant la durée de vie ou de décisions entraînant le prolongement de l'utilisation n'a pas été envisagée dans ce rapport.

Compte tenu de leur caractère complexe et nécessitant des approches pluridisciplinaires, les impacts sociaux de la durée de vie doivent faire l'objet d'études spécifiques.

Enfin, les analyses réalisées n'ont pu mettre en évidence l'importance du facteur de recyclage sur les impacts qui pourtant, indirectement, prolonge la vie des produits objets de ces actions.

II. Perspectives et prolongements envisagés

Les conclusions de notre rapport thèse mettent en lumière la nécessité de nombreux approfondissements et prolongements.

Tout d'abord, concernant les rapports du bâtiment et du développement soutenable, il paraît nécessaire de réaliser certains approfondissements.

Des réflexions multidisciplinaires

Il paraît nécessaire d'organiser des réflexions pluridisciplinaires sur les caractéristiques d'un bâtiment respectant une approche en termes de développement soutenable. Si l'approche environnementale paraît faire l'objet d'un relatif consensus, les approches économique et sociale présente un degré de maturité moindre. Dans ce sens, de nombreuses actions et réflexions sont en cours (Cf création de l'Institut De la Ville à Toulouse). Certaines réflexions doivent permettre la publication de travaux qui préciseront le contenu d'une approche intégrée en termes de développement soutenable.

Les indicateurs et outils d'évaluation

Des indices ou outils intégrés d'évaluation de la performance en termes de développement soutenable doivent être développés afin d'aider la prise de décision. Des études doivent être engagées afin de définir les possibilités d'intégrations des indicateurs. Leur définition nécessite une réflexion sur la base d'un travail d'analyse permettant le développement d'outils d'aide à la décision sur la base de choix multicritères. Les outils d'évaluation des performances en termes de développement soutenable doivent considérer plus efficacement la question de la durée de vie.

L'approfondissement des connaissances des liens entre les composantes du développement soutenable

L'état des connaissances actuelles concernant les liens entre les facteurs économiques et les conséquences environnementales est insuffisant pour un processus de développement d'outils d'aide à la décision. Le développement d'outils intégrés visant l'efficacité de la consommation des moyens consommés au travers d'une approche de développement soutenable nécessite ces connaissances.

L'approfondissement des connaissances des parts relatives des composants du bâtiment

L'étude des parts relatives des différents composants d'un bâtiment dans les impacts de l'approche en termes de développement soutenable permettrait une plus grande efficacité de l'action et des moyens consommés par les investigations.

Le recyclage

La part du recyclage et les possibilités de réutilisation paraissent encore faibles dans le secteur du bâtiment. Pourtant l'efficacité de cette caractéristique et un facteur déterminant de la performance et des impacts en termes de développement soutenable. Cette connaissance implique que soient approfondies celles concernant les difficultés et les gains des actions. Quelle durée de vie supplémentaire permettrait de compenser une moindre capacité de recyclage ? Quels matériaux et quels systèmes constructifs favorisent le domaine ? Dans quel état de performance sont les filières de recyclage ? Quels sont les réseaux de collectes des déchets professionnels ? Quels sont les savoir-faire des professionnels ? Quels en sont les coûts et les gains ?

Cette thèse s'est attachée à étudier les conséquences de la durée de vie d'un bâtiment sur le développement soutenable. Néanmoins il est important aussi d'étudier les causes qui peuvent affecter la durée de vie :

- les causes influençant la durée de vie des bâtiments ;
- les caractéristiques d'un bâtiment susceptibles de l'adapter à l'évolution des besoins et donc de retarder le moment de son obsolescence ;
- la corrélation entre la durée de vie des bâtiments et la qualité d'intégration à leur environnement ;
- de sensibiliser et d'aider le maître de l'ouvrage dans ses choix lors de la construction neuve ou dans ses décisions entre les possibilités de rénovation ou de démolition ;

L'adaptabilité

Les concepteurs et maîtres d'ouvrage doivent pouvoir connaître les causes favorisant l'adaptabilité. Cette connaissance est nécessaire afin de pouvoir en mesurer le coût global et l'intérêt. Cette nécessité implique que soient étudiées les caractéristiques qui ont permis à certains bâtiments d'être pérennes au travers d'une adaptation continue ou ponctuelle aux besoins. La connaissance acquise implique qu'elle soit projetée dans un temps long. La difficulté attachée à l'incertitude des données et des contraintes futures implique un haut niveau d'expertise et de sensibilité de la part des concepteurs et décideurs.

Le parc de bâtiment et la demande

Il paraît nécessaire d'étudier l'existence de liens entre la densité démographique et la durée de vie des bâtiments ainsi que l'impact sur le bâtiment de logement. La durée de vie des bâtiments n'est pas sans incidence sur le volume du parc. Quelle soit subie ou décidée, à moyen constant, une durée de vie plus longue des bâtiments augmente la taille du parc de logement et vice versa. Par ailleurs les besoins quantitatifs, tout au moins correspondant à la fonction primaire au sens de Maslow, sont proportionnels à l'état démographique. Les prévisions démographiques existent, elles pourraient permettre les simulations permettant

d'évaluer la demande, d'étudier les probables besoins et la taille du parc nécessaire en fonction de la durée de vie.

La question de l'impact de la durée de vie sur le développement soutenable doit aussi être étendue au travers de l'étude :

- des liens entre le bâtiment, le quartier, la ville, l'agglomération et le territoire en général. Le bâtiment n'est pas un produit comme un autre. C'est probablement l'objet qui dépasse le lien entretenu avec son propriétaire et son usager en s'imposant avec hégémonie à d'autres individus, passants et à la société entière. De plus, cette relation spécifique s'inscrit dans la durée. Il est l'élément dont les associations permettent de générer les quartiers et par là, la ville. Les rapports entretenus ont-ils fait l'objet d'une étude au travers du prisme du développement soutenable ?

- des bâtiments des autres secteurs. Les bâtiments de services, commerciaux ou industriels ont-ils un comportement similaire en regard des impacts de la durée de vie ?

Pour évaluer avec précision les performances en termes de développement soutenable, le technicien a nécessairement besoin de mieux connaître la durée de vie des produits utilisés en situation. Il est donc important :

- de réaliser des évaluations, techniquement et scientifiquement établies, des durées de vie des produits en conditions normales d'utilisation;
- d'étudier les conséquences d'éventuels prolongements de l'utilisation qui n'auraient pas été inscrits dans le programme initial. Pour cela, il est nécessaire d'élaborer les outils d'évaluation sur la base des facteurs énoncés précédemment.
- d'étudier les conséquences de la réalisation des risques accidents engendrant les écarts en rapport des prévisions initiales;
- d'approfondir la question des informations contradictoires concernant les produits à base de matériaux végétaux. Ces informations, s'opposant dans l'esprit, d'une base de données à l'autre, engendrent des incertitudes et peut provoquer des décisions contre-productives. Ces matériaux ont un grand intérêt dans la mesure où ils sont utilisés pour leur qualité. Il paraît donc urgent d'étudier un moyen de mettre en valeur leurs qualités aux différents stades du cycle de leur vie. Peut-on réellement imaginer que le CO₂ stocké ne soit pas libéré en fin de vie ? A l'opposé, le bilan sur le cycle de vie ne permet pas de mettre en évidence cette fonction de stockage. Comment la mettre en valeur ?

III Conclusion

Dans nos échanges avec différents chercheurs, la question de la durée de vie du bâtiment était parfois perçue comme triviale au travers des réponses immédiatement et logiquement imaginées, ou parfois rejetées pour la complexité qu'elle présente dès lors qu'elle est mécaniquement et statistiquement envisagée ou encore parfois évoquée pour la gravité de ce qu'elle pourrait engendrer en terme de responsabilités. A aucun moment, notre travail n'a nié ces points de vue parfaitement recevables. L'objectif de cette thèse, a été d'engager une réflexion et de produire de la connaissance sur la base d'arguments techniques, susceptibles de modifier les comportements dans l'approche des projets de construction. Nous espérons avoir contribué à l'idée que, d'une part, la durée de vie a un impact direct sur les performances en termes de développement soutenable et que d'autre part, ce facteur est trop souvent ignoré ou négligé dans les travaux réalisés et outils développés.

Dans le domaine de la conception et production de produit, le bâtiment a un statut particulier en ce sens qu'il dépasse l'objet technique qui le matérialise. Il est l'un des vecteurs ou peut-être le vecteur de communication envers les générations à venir, porteur des messages de style de vie, de culture et de principes sociétaux les plus soutenables. Cette réflexion, engagée, doit aussi être prolongée par un questionnement sur l'existence, la nature et les objectifs des messages que nous désirons transmettre aux générations futures.

Si l'on prend en considération la définition du développement soutenable liant les responsabilités intergénérationnelles, les questions du temps et de la durée de vie de nos objets bâtis sont trop souvent ignorées. Notre question pourrait être posée pour tous les autres secteurs d'activité industrielle et artisanale. Quel est l'impact de la durée de vie des produits de consommation sur le développement soutenable ? La durée de vie des objets qui nous entourent nous paraît fondamentale dans la responsabilité intra et inter-générationnelle. En effet, la durée de vie des biens, qui consomment des moyens pour leur production, induit directement le volume de moyens nécessaires pour répondre au besoin fonctionnel. Plus la durée de vie est courte, plus les moyens consommés sont importants et moins les moyens sont disponibles pour d'autres fonctions, éventuellement plus vitales. Certes, l'équation doit comprendre la réduction des moyens consommés à l'usage grâce à l'amélioration technologique... Il s'agit là d'une question de société dans laquelle le technicien doit jouer un rôle.

Références bibliographiques

Bibliographie « Durée de vie »

Arslan, H., et N. Cosgun. 2008. Reuse and recycle potentials of the temporary houses after occupancy: Example of Duzce, Turkey. *Building and Environment* 43, no. 5: 702–709. ;

Babey N., 2003, "Faut-il construire pour 30 ans?", in *Projections*, magazine de l'Association Ecoparc, juin 2003.

Baroghel-Bouny V., 2009 , PLATEFORME OUVRAGES D'ART , « Développement d'une approche globale, performantielle et prédictive de la durabilité des structures en béton (armé) sur la base d'indicateurs de durabilité. » Publication LCPC http://www.piles.setra.equipement.gouv.fr/article.php3?id_article=564;

Bernard J.F, Dillmann P., 2008 « Il reimpiego in architettura : recupero, trasformazione, uso », Collection de l'École française de Rome, N°418 ;

Bonetto R., Sauce G., 2006, "Gestion de patrimoine immobilier - Les activités de références CSTB – Département Technologies de l'Information et Diffusion du Savoir - Université de Savoie – Polytech'Savoie – LOCIE ;

Cooper T., 2004 « Inadequate Life? Evidence of Consumer Attitudes to Product Obsolescence » *Journal of Consumer Policy* 27: 421–449, . Netherlands. ;

Cremona C. , 2003, Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants. Paris : Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, 448 p ;

Da Rocha, C. G, et M. A Sattler. 2009. « A discussion on the reuse of building components in Brazil: An analysis of major social, economical and legal factors ». *Resources, Conservation and Recycling* 54 (2): 104–112. ;

Dupuy J-P., Gerin F., 1975, »Société industrielle et durabilité des biens de consommation », *Revue Economique*, Vol. 26, pp. 410-446 ;

Emmanuel R. 2004 J. G Vogtländer, P. C.F Hendriks, et P. H.C Brezet, "The EVR model for sustainability—A tool to optimise product design and resolve strategic dilemmas," *The Journal of Sustainable Product Design* 1, n°. 2 (2001): 103–116. ;

Haapio, A., et P. Viitaniemi. 2008. A critical review of building environmental assessment tools. *Environmental impact assessment review* 28, no. 7: 469–482 ;

Hendriks, C. F, et G. M.T Janssen. 2003. Use of recycled materials in constructions. *Materials and structures* 36, no. 9: 604–608. ;

Hendricks, C. F, J. G. Vogtlaender, et M. JANSSEN. , 2006,« THE ECO-COSTS/VALUE RATIO, a tool to determine the long-term strategy of de-linking economy and environmental ecology » ;

Kohler, N. (1999) The relevance of the Green Building Challenge: An observer's perspective. *Building Research and Information*, 27(4/5), 309± 320. ;

Lair J. et al, 2003, « Ingénierie du développement durable : Vers la formalisation d'une doctrine française », CSTB, Département XXIEMES RENCONTRES UNIVERSITAIRES DE GENIE CIVIL 2003 ;

Langston, C., F. K.W Wong, E. Hui, et L. Y Shen. 2008. Strategic assessment of building adaptive reuse opportunities in Hong Kong. *Building and Environment* 43, no. 10: 1709–1718. ;

Le Bras H., 1976 « Cycle de l'habitat et âge des habitants », INED ;

Lemer AC., 1996 Infrastructure obsolescence and design service life. *J Infrastruct Syst*, 2(4):153–61. ;

Levy J-P, Saint Raymond O., 1992, Profession propriétaire. Logiques patrimoniales et logement locatif en France, Toulouse, PUM, collection "État des lieux", 1992. ;

Miller R., 2002, Biologie du vieillissement lettre n°3/printemps2002 de l'Académie des sciences;

Mora, P., 2007. Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials. *Building and Environment* 42, no. 3: 1329–1334 ;

Procaccia H., Suhner M-C. , 2003, Démarche bayésienne et applications à la sûreté de fonctionnement. Paris : Lavoisier, 411 p;

Re Cecconi F., 2003, Service life planning: further developing of the factor method. In : Daniotti B. International Workshop on Management of Durability in the Building Process, 25–26 juin 2003, Milan. Milan: Politecnico di Milano, ref n° 66 ;

Reche M. 2004, Effet des travaux d'entretien sur les lois d'évolution des dégradations de chaussées. Thèse Génie Civil. Clermont-Ferrand : Université Blaise Pascal, LGC et LCPC, 2004, 172 p.;

Sarja A., 2009. Reliability principles, methodology and methods for lifetime design. *Materials and Structures* 43, no. 1-2 (2): 261-271. doi:10.1617/s11527-009-9486-y.

Wang K.M., Lorente S., Bejan A., 2006, Vascularized networks with two optimized channel sizes, *Journal of Physics D*, Vol. 39, pp. 3086-3096. ;

Zaoui A, 2002, Les matériaux vieillissent aussi. lettre n°3/printemps2002 de l'Académie des sciences ;

Bibliographie économique

Ambrosi, P., Hourcade, J_C., 2003, « Evaluer les dommages, une tâche impossible ? » Rapport KYOTO ET L'ECONOMIE DE L'EFFET DE SERRE Complément B, Les enjeux économiques de l'effet de serre", in *Kyoto et l'économie de l'effet de serre*, La Documentation Française, 2003, p.117-144 ;

Catarina O., 2006, « *Le développement durable dans la gestion immobilière du secteur tertiaire* », CSTB, Paris, 117p, Avril 2006 ;

Charron F., 2000, Article « *Évaluation économique : implications éthiques de l'actualisation* », P227-236, Ouvrage « Les temps de l'environnement » Ed PUM, Toulouse, 2000 ;

Clift, M., Bourke, K (1999). Study on Whole Life Costing. Report prepared for DETR, Report Number CR 366/98. UK ;

CIREN, 2006, « Imaclim - Modèles pour l'étude des trajectoires de développement durable », <http://www.imaclim.centre-cired.fr/spip.php?article111>;

Coase, R.H., 1960, – The problem of social cost – *Journal of Law and Economics*, Vol. 3 – octobre 1960 ;

Criqui, Vielle, Viguier, 2002 « *Les coûts des politiques climatiques* » Rapport « KYOTO ET L'ECONOMIE DE L'EFFET DE SERRE », Complément C "Les enjeux économiques de l'effet de serre", in *Kyoto et l'économie de l'effet de serre*, La Documentation Française, 2003, p.145-176 ;

Dumas P. , « L'économie de l'environnement », Extrait de cours 2004-2005, Enseignement de l'ENS Cachan Paris ;

Ellis B. A., "Life Cycle Cost," dans *International Conference of Maintenance Societies*, 2007 ;

El-Haram, M. A., Marenjak, S., & Horner, M. W. (2002). Development of a generic for collecting whole life cost data for the building industry. *Journal of Quality Maintenance Engineering*, 8(2), 144-151 ;

Flanagan, 1989, life cycle costing. Theory and practice. Oxford (UK): BSP Professional Books 1989. ;

- Frame B., 2009, et Cavanagh J., "Experiences of sustainability assessment: An awkward adolescence," dans *Accounting Forum*, vol. 33, 2009, 195–208. ;
- Guesnerie P., 2003, « Kyoto et l'économie de l'effet de serre » La documentation française, Paris, 2003 ;
- Hotelling, H., 1931. The economics of exhaustible resources. *Journal of Political Economy* 39, 137–175 ;
- Jones, J. V. (1994). *Integrated logistic support handbook*: New York, NY. McGraw Hill ;
- Junnila S, Saari A. Material and energy flow estimation for building elements in the context of LCA. Helsinki University of Technology, Report 150, 1997 ;
- Harribet J-M., Article « [Temps de travail et travail du temps.](#) » Ouvrage « les temps de l'environnement », Ed PUM, Toulouse, page 237-255, 2000 ;
- Lecocq F., Hourcade, J_C., 2003, « Incertitude, irréversibilités et actualisation dans les calculs économiques sur l'effet de serre » Rapport KYOTO ET L'ECONOMIE DE L'EFFET DE SERRE Complément D, Les enjeux économiques de l'effet de serre", in *Kyoto et l'économie de l'effet de serre*, La Documentation Française, 2003, p.117-144 ;
- Levarlet F., 2000, Article « *L'économiste face à la multiplicité des temps à l'interface Economie-environnement : une illustration des pb rencontrés et des solutions proposées* », Ouvrage « les temps de l'environnement », p163-175, Ed PUM, Toulouse, 2000 ;
- Marshall Alfred., 1906 , – Principes d'Economie Politique – Ed. Giard et Brière – Paris ;
- Mearig, T., Coffee, N., and Morgan, M. (1999). *Life cycle cost analysis handbook*. Juneau, Alaska: Department of Education & Early Childhood Development Education Support Services/Facilities ;
- Meyerhoff J., Ohl C., et V. Hartje, "Landscape externalities from onshore wind power," *Energy Policy* 38, n°. 1 (2010): 82–92 ;
- Oberg M, 2005, « Integrated Life Cycle Design-applied to concrete multi-dwelling buildings » (2005) ;
- Osso A., 1996, « *Sustainable Building Technical Manuel - Green Building Design, Construction, and Operations* », Public Technology Inc, USA, 292p ;
- Ravignan A., 2010, « Que peut faire la technique », *Revue Alternatives Economiques*, n° 295 (2010) : 50-132 ;
- Rotillon G. 2007, « Les différentes approches » Art de « cahiers français » numéro 337 mars avril 2007 ;
- Stern N. (dir.) (2006), *The Stern Review Report: the Economics of Climate Change*. London, HM Treasury, 30 Octobre, 603 p ;
- Stiglitz, 2009, Rapport Stiglitz. Du développement durable à la soutenabilité. 17 septembre 2009 ;

Bibliographie environnement

- Dufresne J-L, D. Salas Y Mélia, S. Denvil, S. Tyteca, O. Arzel, S. Bony, P. Braconnot, et al. 2006. Simulation de l'évolution récente et future du climat par les modèles du CNRM et de l'IPSL (Recent and futur climate change as simulated by the CNRM and IPSL models). November. <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00423543/>.
- Häkkinen T. et al., "Environmental Impact of Coated Exterior Wooden Cladding," VTT Technical Research Centre of Finland, Finland (1999). ;
- Gustavsson, Leif, Kim Pingoud, et Roger Sathre. 2006. « Carbon Dioxide Balance of Wood Substitution: Comparing Concrete- and Wood-Framed Buildings ». *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11 (3) (mai): 667-691. doi:10.1007/s11027-006-7207-1 ;

Junnila S., 2004, « The environmental impact of an office building throughout its life cycle », Helsinki University of Technology Construction Economics and Management ;

Liu, M., B. Li, et R. Yao. 2010. A generic model of Exergy Assessment for the Environmental Impact of Building Lifecycle. *Energy and Buildings* 42, no. 9: 1482–1490. ;

Petit M. , 1999 , « Le changement climatique d'origine humaine. Rappel de quelques résultats généraux » C

Thormark, C. 2006. « The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building ». *Building and Environment* 41 (8): 1019–1026 ;

Werner Frank., Klaus Richter, 2007. « Wooden building products in comparative LCA ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 12 (7) (avril): 470-479. ;

Zhang Z, 2005, « BEPAS—a life cycle building environmental performance assessment model », *Building and environment* ;

Bibliographie Sociologie

Déoux, Suzanne, et Pierre Déoux. 2004. *Le guide de l'habitat sain*. 2 éd. Medieco, Septembre 30 ;

Dethier J., 2008 « Habiter la terre », *Patrimoine Mondial N°48*, janvier 2008, Edition UNESCO ;

Duchemin S., 2010 ; « Vers une écologie spirituelle de la ville. Pour une critique du développement durable urbain, approches philosophique et psychanalytique » ; Rapport de thèse ;

Gadrey J., 2007, « Evaluation des biens environnementaux et nouveaux indicateurs de richesse », *Cahier Français n°337*, Article, 55p, mars avril 2007 ;

Hetzel J., 2009, « Indicateurs du développement durable dans la construction » Edition AFNOR ;

Merz, C. 2000, *ARCHITECTURE ET DEVELOPPEMENT DURABLE A practical CD-ROM guide on Architecture and Sustainable Development*, EPFL ;

Moffatt S., Kohler N., 2008, “Conceptualizing the built environment as a social-ecological system,” *Building Research & Information* 36, n°. 3 (5, 2008): 248-268.

Riboulet P., 1998, *Onze leçons sur la composition urbaine* (Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1998). ;

Turgeon, Laurier, Jocelyn Létourneau, et Khadiyatoula Fall. 1997. *Les espaces de l'identité*. P : 37-52 par Luc Noppen et Lucie K. Morisset - Presses Université Laval ;

Bibliographie « Développement soutenable »

Adolphe Luc, « Vers la Ville de Haute Qualité Environnementale ? développement durable et VHQE » Cours à l'Université Paris VIII ;

Adolphe, Luc. 1998, *Ambiances architecturales et urbaines*. Editions Parenthèses, Novembre 1. ;

Alwaer H. et D. J. Clements-Croome, “Key performance indicators (KPIs) and priority setting in using the multi-attribute approach for assessing sustainable intelligent buildings,” *Building and Environment* 45, n°. 4 (2010): 799–807. ;

Arrhénius S. 1896. On influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground, in *Philos. Mag. S. 5*. Vol 41, no. 251:237-276, 1896. ;

- Baneth J. (1998). Les indicateurs synthétiques de développement. *Futuribles*, (231), mai, p. 5-27. ;
- Bernstein, Daniel, Jean-Pierre Champetier, Loïc Hamayon, Jean-Pierre Traisnel, et Thierry Vidal. 2006. *Traité de construction durable : Principes et Détails de construction*. Le Moniteur Editions, 2006 Décembre 15. ;
- Boothroyd, P. 1990. L'évaluation environnementale, un outil de développement durable équitable. Dans *développement durable et évaluation environnementale: perspectives de planification d'un avenir commun*, Jacobs et Sadler, (dir.). Pages 159-172. ;
- Boulanger J-M., 2004, « Les indicateurs de développement durable : un défi scientifique, un enjeu démocratique », Institut pour un développement durable, Belgique 1 Juillet 2004, Séminaire développement durable et économie de l'environnement, Séminaire de l'IDRRI ;
- Clift, Roland. 2003. "Metrics for supply chain sustainability." *Clean Technologies and Environmental Policy* 5 (October 1): 240-247. doi:10.1007/s10098-003-0220-0.
- Curran M. A, "LIFE CYCLE ASSESSMENT: PRINCIPLES AND PRACTICE" (2006). ;
- Emmanuel, R. 2004. Estimating the environmental suitability of wall materials: preliminary results from Sri Lanka. *Building and Environment* 39, no. 10: 1253–1261. ;
- Enghoff M.B., Svensmark H., « The role of atmospheric ions in aerosol nucleation ? a review », avril 17, 2008, <http://hal-insu.archives-ouvertes.fr/hal-00304109/>;
- Eshet T., Ayalon O., et Shechter M., "Valuation of externalities of selected waste management alternatives: A comparative review and analysis," *Resources, Conservation and Recycling* 46, n°. 4 (2006): 335–364. ;
- Habert, G., Y. Bouzidi, C. Chen, and A. Jullien. 2010. "Development of a depletion indicator for natural resources used in concrete." *Resources, Conservation and Recycling* 54 (6): 364–376.
- Hendricks, C. F, J. G. Vogtlaender, et M. JANSSEN. , 2006, « THE ECO-COSTS/VALUE RATIO, a tool to determine the long-term strategy of de-linking economy and environmental ecology ». ;
- HQE²R, 2000, Programme de recherche européen dont l'objectif était l'étude et l'élaboration d'outils visant le développement de quartiers durables, Commission Européen ;
- IFEN, 2001, Propositions d'indicateurs de développement durable pour la France IFEN Indicateurs, Collection « Etudes et travaux », n° 35, Novembre 2001 ;
- Jevons, William Stanley. 1866. *The coal question: an enquiry concerning the progress of the Nation, and the probable exhaustion of our coal-mines*. Macmillan. ;
- Le Treut H. et al, 2008 , « incertitudes sur les modèles climatiques ». *Géosciences*. <http://france.elsevier.com/direct/CRAS2A/>;
- Liébard, A. et André De Herde. 2006. *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. Le Moniteur Editions, Mars 30. ;
- Lorius, C. 2003. Effet de serre: les lacunes du savoir et de la perception: Greenhouse effect: gaps of knowledge and perception. *Comptes Rendus Geosciences* 335, no. 6-7: 545–549. ;
- Ness B., 2006, "Categorising tools for sustainability assessment.pdf," *Ecological economics* ;
- OCDE, 2006, *Mesurer le développement durable* , Cahiers statistiques, OCDE, Paris.
- Peuportier, Bruno. 2008. *Eco-conception des bâtiments et des quartiers*. Presses de l'Ecole des mines, Novembre 14. ;

Pulselli, R. M., E. Simoncini, F. M. Pulselli, et S. Bastianoni. 2007. Energy analysis of building manufacturing, maintenance and use: Em-building indices to evaluate housing sustainability. *Energy and buildings* 39, no. 5: 620–628. ;

Svensmark et Eigil Friis-Christensen, « Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage--a missing link in solar-climate relationships », *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 59, n°. 11 (juillet 1997): 1225-1232. ;

United Nations, 1992a. The Rio Declaration and Agenda 21. New York, NY. ;

Vogtländer J. G, P. C.F Hendriks, et P. H.C Brezet, “The EVR model for sustainability–A tool to optimise product design and resolve strategic dilemmas,” *The Journal of Sustainable Product Design* 1, n°. 2 (2001): 103–116. ;

Vogtländer, J.G., Bijma, A. (2000) *The “virtual pollution costs ‘99”, a single LCA-based indicator for emissions*, Int. J. LCA, 5 (2), 113 -124 ;

WCED – Our Common Future – Oxford University Press – 1987. ;

Bibliographie « Générale »

Adolphe Luc, 1991, L’aide à la décision technique dans la conception architecturale : application à l’énergie du bâtiment, Thèse de doctorat en énergétique de l’Ecole de Mines de Paris. ;

Adolphe Luc, 1995, “L’intégration des contraintes techniques dans le processus de conception architecturale”, Habilitation à diriger des recherches, Université Paul Sabatier (Toulouse-F)

Bertalanffy, Ludwig von. 1968. *Théorie générale des systèmes*. 2^e éd. Dunod, septembre 25 2002 ;

Bertalanffy, Ludwig von. 2002. *Théorie générale des systèmes*. 2^e éd. Dunod, septembre 25. ;

Boudet, A-M., 2009 Les Ouvertures de l’université Paul Sabatier. *Le croisement des savoirs : nécessité, opportunités, bizarreries. : Conférence* (Toulouse, 2009/11/26) Toulouse : UPS ;

Bourdieu P. (1995), “ La cause de la science ”, Actes de la Recherche en Sciences sociales, n°106-07, 3-10.

Bourdieu P. (2001), *Science de la science et réflexivité*, Raisons d’Agir Editions, Paris, octobre.

Bretesch, Bertrand de La. 2000. *La Méthode APTE : analyse de la valeur, analyse fonctionnelle*. Pétrelle. ;

Caye P. et Choay, 2004, F.Alberti, Leon-Battista. *L’Art d’édifier*. Seuil, septembre 10. ;

Choay F. (sous la direction de) et Pierre Merlin, Dictionnaire de l’urbanisme et de l’aménagement, 3 éd. (Presses Universitaires de France - PUF, 2010) ;

DeMarco, T., 1978. *Structured Analysis and Systems Specification*, Prentice Hall ;

Deming W.E, *Out of the Crisis*, MIT Center for Advanced Engineering Study, 1986 ;

Flores-Colen, Inês, et Jorge de Brito. 2010. « A systematic approach for maintenance budgeting of buildings façades based on predictive and preventive strategies ». *Construction and Building Materials* 24 (9) (septembre): 1718-1729. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.02.017. ;

Gao, W., T. Ariyama, T. Ojima, et A. Meier. 2001. « Energy impacts of recycling disassembly material in residential buildings ». *Energy and Buildings* 33 (6): 553–562. ;

Georgescu-Roegen N., 1971, *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts ;

Godard, O. ed. (1997a), *Le principe de précaution dans la conduite des affaires humaines*.

Paris: Maison des sciences de l'homme et INRA.

Habert, G., Y. Bouzidi, C. Chen, et A. Jullien. 2010. « Development of a depletion indicator for natural resources used in concrete ». *Resources, Conservation and Recycling* 54 (6): 364–376. ;

Jahn, T., *Sustainability and the Social Sciences: A Cross-disciplinary Approach to Integrating Environmental Considerations into Theoretical Reorientation*, London, Zed Books, 267-273. ;

Kuhn, T., 1983. *La Structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion. ;

Laberge J., 1999, *RAPPORT DU COMITÉ AD HOC SUR LA POLITIQUE DU PATRIMOINE BÂTI Conseil des monuments et sites du Québec (CMSQ), 1999* ;

Lynch, Kevin. 1998. *L'Image de la cité*. Dunod, January 7.

Maslow A., (1954). *Motivation and Personality*. New York: Harper.

Morin, E., 1973. *Le Paradigme perdu : la nature humaine*, Paris, Le Seuil. ;

Panerai Ph., 1999, *Analyse urbaine, Parenthèses*, Juin 12. ;

Perez, J-P ; Romulus AM, 2001, *Thermodynamique : Fondements et applications - Exercices et problèmes résolus*. Dunod, octobre 19 ;

Peuportier, B. « Training for Renovated Energy Efficient Social housing - Section 2 Tools », *Intelligent Energy - Europe* programme, contract n° EIE/05/110/SI2.420021 ;

Marcel Poëte, 1930. "Introduction à l'Urbanisme" *Annales de Bretagne* 39 (3): 407.

Rak I., 1992, Teixido C., Favi., *Démarche projet industriel*. Foucher. ;

Redclift, M., 1999. *Dance with wolves? Sustainability and the social sciences*, in Becker, E., ;

Rossi, Aldo, Diane Ghirardo, and Peter Eisenman. 1984. *The architecture of the city*. MIT Press, September 13.

Sacadura. 1993. *Initiation aux transferts thermiques*. 4^e éd. Tech.& Doc./Lavoisier, janvier 1. ;

Simos, Jean. 1997. *Evaluer l'impact sur l'environnement*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), mars 11. ;

Solow, R., 1993. *An almost practical step towards sustainability*. *Resources Policy* 19, 162–172. ;

United Nations. 1987. *Report of the World Commission on Environment and Development*,

General Assembly Resolution 42/187, 11 December 1987 ;

Wixson, J. R, et C. M.E CVS. 1999. *Function analysis and decomposition using function analysis systems technique*. Dans *Proceedings of the International Council on Systems Engineering Annual Conference, INCOSE, June*, 6–10. ;

Zaccai, Edwin. 2008. « Développement durable et disciplines scientifiques ». *Natures Sciences Sociétés* 15 (4) (mars): 379-388. doi:10.1051/nss:2008004. ;

Thèses

Adolphe Luc, 1991, *L'aide à la décision technique dans la conception architecturale : application à l'énergie du bâtiment*, Thèse de doctorat en énergétique de l'École de Mines de Paris.

AGUEB Ibtissem.,; "Economie du patrimoine immobilier des ménages en France"; Thèse science économiques : Université Toulouse 1 Capitol ; 2005 ;

Ha Duong Minh, 1998, « Comment tenir compte de l'irréversibilité dans l'évaluation intégrée du changement climatique ? » Thèse, EHESS, Paris, 259p+150p

LAIR J. 2000 « Evaluation de la durabilité des systèmes constructifs du bâtiment. Thèse Génie Civil. Clermont-Ferrand : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment – service Matériaux et Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Mécaniques des Structures », 2000, 213 p. ;

Rojas Arias J.C, 2007 Thèse « La politique de la démolition : Rénovation urbaine et habitat social en France et en Colombie » ;

Talon A., 2006, « Evaluation des scénarii de dégradation des produits de construction » Thèse Génie Civil. Clermont-Ferrand : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment – service Matériaux et Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Mécaniques des Structures », 2006, 240 p. ;

Normes

NF X50-150 - Septembre 2007 : Management par la valeur - Expression Fonctionnelle du Besoin et cahier des charges fonctionnel - Exigences pour l'expression et la validation du besoin à satisfaire dans le processus d'acquisition ou d'obtention d'un produit

NF P01-010- 2004 Qualité environnementale des produits de construction - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction

NF EN 15643-3 : Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Evaluation des bâtiments - Partie 3 : cadre pour l'évaluation de la performance sociale

EUROCODE 0 : Base de calcul de structure – Norme européenne

EN 15643-1, 2 :2010 - Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la contribution au développement durable des bâtiments – Cadre méthodologique

ISO 9000:2008_ Systèmes de management de la qualité -- Exigences

ISO 14025 : 2006 Marquages et déclarations environnementaux -- Déclarations environnementales de Type III -- Principes et modes opératoires

ISO 14040:2006_ : Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Principes et cadre

ISO 14044:2006_ Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Exigences et lignes directrices

ISO 15392 : 2008 développement durable dans la construction -- Principes généraux

ISO 15686- 1 ISO . Bâtiments et biens immobiliers construits -- Conception prenant en compte la durée de vie -- Partie 1: Principes généraux et cadre, 2005, 39 p.

ISO 15686-5:2008 International Organization for Standardization. Bâtiments et biens immobiliers construits -- Prévission de la durée de vie -- Partie 5: Approche en coût global

ISO 15686 -8 International Organization for Standardization. Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 8 : Reference service life. ISO/DIS 15686-8, 2005, 23 p.

ISO 21929-1 - développement durable dans la construction - développement durable dans la construction - Indicateurs de développement durable - Partie 1: Bâtiments - Partie 1 : cadre pour le développement d'indicateurs et d'un ensemble d'indicateurs pour le bâtiment

ISO 21929-2 développement durable dans la construction - Indicateurs de développement durable - Partie 2: Cadre pour le développement d'indicateurs pour le génie civil en cours d'élaboration ne sera publiée qu'en 2013

ISO 21930 : 2007 - Bâtiments et ouvrages construits - développement durable dans la construction - Déclaration environnementale des produits de construction

ISO 21931-1:2010 - développement durable dans la construction – Cadre méthodologique de l'évaluation de la performance environnementale des ouvrages de construction -- Partie 1: Bâtiments

Rapports

ADEME ; 2009, Guide de l'habitat durable en Seine Saint Denis – ADEME- http://ile-de-france.ademe.fr/IMG/pdf/guide_habitat_durable_en_seine_st_denis_2009.pdf

ANR, 2011, « Bâtiments et Villes Durables », http://www.agence-nationale-recherche.fr/fileadmin/user_upload/documents/aap/2011/aap-bvd-2011.pdf

CAE – Conseil des Architectes d'Europe, 2009, « Politique du CAE en matière d'architecture et de développement durable » - Mai 2009, http://www.ace-cae.org/public/contents/index/category_id/121

CMSQ, 1999, « Eléments pour une politique du patrimoine bâti au Québec » Rapport du comité ad hoc - Comité des monuments et sites du Québec - Août 1999

CNOA- Conseil National de l'Ordre des Architectes, 2007, « développement durable et architecture responsable »- Novembre 2007, <http://www.architectes.org/connaître-l-ordre/les-publications-de-l-ordre/developpement-durable-et-architecture-responsable/>

MEEDDM - Ministère de l'écologie, du développement durable des transports et du logement
http://www.developpementdurable.gouv.fr/spip.php?page=article&id_article=19574

VNF – Voies Navigables de France – Service des archives - Direction du Sud Ouest 2 port Saint Etienne à Toulouse.

Index des tableaux

Tableau 1	: <i>Analyse des risques techniques des éléments du bâtiment</i>
Tableau 2	:: <i>Comparatif des méthodes de traitement des données de durée de vie</i>
Tableau 3	: <i>Tableau fonctionnel – Risques d’obsolescence</i>
Tableau 4	: Risques extérieurs susceptibles d’entraîner la démolition
Tableau 5	: <i>Exemples de durées de vie typiques mentionnées au sein des FDES</i>
Tableau 6	: Durées de vie pour le calcul du dimensionnement des ouvrages
Tableau 7	: Propriétés des éco-matériaux
Tableau 8	: Emissions des secteurs résidentiel et tertiaire en 2008
Tableau 9	: Liste des groupes d’impacts environnementaux dans le bâtiment
Tableau 10	: Synthèse des indicateurs de « l’habitat sain » (Déoux, 2004)
Tableau 11	: Liste des émissions polluantes
Tableau 12	: Propositions de clés de répartition d’impacts
Tableau 13	: évaluation des coûts d’impacts environnementaux
Tableau 14	: Base de données de développement soutenable
Tableau 18	: Inventaire des produits et des FDES correspondantes produits
Tableau 14	: Matrice de corrélation
Tableau 15	: Comparaison des valeurs des indicateurs GES (kg éq CO ₂) des bases INIES et KBOB- ECOINVENT
Tableau 16	: Ecart sur 300 ans des bases INIES et ECOINVENT-KBOB
Tableau 17	: Solutions techniques répondant au cahier des charges
Tableau 18	: Inventaire des produits et des FDES correspondantes produits
Tableau 19	: Valeurs des indicateurs contenues dans le volet environnemental des FDES
Tableau 20	: Matrice de corrélations
Tableau 21	: Cahier des charges du mur extérieur
Tableau 22	: Solutions techniques répondant au cahier des charges
Tableau 23	: Durées de vie retenues en hypothèse – Unité de mur
Tableau 24	: Valeurs des indicateurs de GES des produits
Tableau 25	: Prix des fournitures en euros (Source Batiprix-2010- Ed Le Moniteur)
<i>Tableau 26</i>	: <i>Nomenclature des résultats</i>
<i>Tableau 27</i>	: <i>Emissions de GES à 50 ans et 300 ans</i>
<i>Tableau 28</i>	: <i>Parts relatives détaillées des émissions des solutions techniques</i>
<i>Tableau 29</i>	: <i>Classement des solutions techniques par ordre croissant d’émissions de GES cumulés</i>
<i>Tableau 30</i>	: <i>Classement des solutions technique par ordre croissant des indicateurs officiels de GES</i>
<i>Tableau 31</i>	: <i>Durées de vie des solutions techniques pour des émissions équivalentes</i>
Tableau 32	: Corrélation Prix matière/ Eq kg CO ₂ à la construction des solutions techniques
Tableau 33	: Corrélation Prix matière/ kg éq CO ₂ à la construction des solutions techniques (hors Terre crue, pierre, ossature bois)
Tableau 34	: Besoins énergétiques de chauffage et rafraîchissement des solutions à l’usage – Logiciel Pleiades
Tableau 35	: Durées de vie prises en hypothèse – Logement type
Tableau 36	: Gain fourni par la solution « Pierre »
Tableau 37	: Émission de GES pour la production/déconstruction à 50 ans et 300 ans en kg éq CO ₂ – Part relative en rapport de la phase d’usage
Tableau 38	: Emissions en équivalent d’une distance parcourue avec une automobile (base 120g/km parcouru)
Tableau 39	: Variation des émissions de GES des solutions en fonction de leur durée de vie
Tableau 40	: Gains relatifs résultant de l’allongement de la durée de vie de 50 à 100 et 300 ans
Tableau 41	: Durée de vie pour une équivalence d’émission
Tableau 42	: Parts relatives des émissions des composants regroupés

Tableau 43	: Emission des GES avec conservation des fondations à chaque reconstruction	
Tableau 44	: Gain fourni par le découplage des fondations	
	: gain lié aux choix de solutions techniques	
		Choix de l'ossature Bois (KBOB)/Bloc béton creux
	Gain (kg éq CO2)	2,37 ^{E+04}
	Emission totale (kg éq CO2)	6,07 ^{E+04}
Tableau 45		
Tableau 47	: Coût initial et de grosses réparations	

Index des graphiques

Graphique 1	Graphique 1 : GES cumulé des solutions « bois » en fonction de la source de données et de la durée de vie
Graphique 2	Graphique 2 : Evolution des GES sur la durée de la fonction d'usage
Graphique 3	: Evolutions des émissions de GES du corps en fonction de la durée de vie des solutions
Graphique 4	: GES cumulé des solutions « bois » en fonction de la source de données et de la durée de vie
Graphique 5	: Tendances économiques de l'ensemble des solutions et de la solution pierre
Graphique 6	: GES cumulé des solutions « bois » en fonction de la source de données et de la durée de vie
Graphique 7	: Evolution du coût du corps des solutions techniques en fonction de leurs durée de vie
Graphique 8	: Evolution des émissions de GES dans le temps des solutions techniques
Graphique 9	: Evolution des émissions de GES en fonction de leurs durées de vie
Graphique 10	Graphique 10 : Répartition des GES selon les composants
Graphique 11	: Evolution du coût du logement
Graphique 12	: Evolution du coût des murs porteurs en fonction de la durée de vie

Index des figures

Figure 1	: <i>Modèle de dégradation pour une façade d'enduit minéral.</i>
Figure 2	: <i>Modèle de Jacobs et Sadler (Boothroyd, 1990)</i>
Figure 3	: <i>Etapas d'une ACV – ISO 14040 - 2006</i>
Figure 4	: Comparaison des indices de PIB et d'ISS moyen par tête aux Etat-Unis
Figure 5	: <i>Schéma de constitution d'un indice d'impact environnemental (Oberg, 2005)</i>
Figure 6	: <i>Etapas du projet</i>
Figure 7	: <i>Schématisation de la démarche du projet</i>
Figure 8	: Roue de Deming – 1986
Figure 9	: <i>Modèle de dégradation pour une façade d'enduit minéral.</i>
Figure 10	: <i>Schéma de dépendance des éléments pour la durée de vie.</i>
Figure 11	: Exemple de résumé d'une FDES de brique multi alvéoles
Figure 12	: <i>Extrait de la base ECOINVENT-KBOB</i>
Figure 13	: <i>Extrait de la présentation des données fournies par la base de prix Batiprix- Ed Le Moniteur</i>
Figure 14	: Schéma de la méthode appliquée à l'unité de mur
Figure 15	: <i>Modèle de dégradation pour une façade d'enduit minéral.</i>
Figure 16	: <i>Coupe du mur</i>
Figure 17	: <i>Référencement des résultats</i>
Figure 18	: <i>Plan du logement type</i>
Figure 19	: Extrait de l'entretien M. Plouchard, Directeur technique SA-Languedocienne, responsable des actions de développement durable.
Figure 20	: Schéma de fonctionnement schématique des outils d'évaluation
Figure 21	: Résultats d'évaluation environnementale de l'outil EQUER
Figure 22	: Schéma de la proposition de modification des outils d'évaluation
Figure 23	: Proposition d'une stratégie pour une plus grande sensibilité des outils d'évaluation aux conditions
Figure 24	: <i>Arbre de déroulement</i>
Figure 25	: Performance en termes de GES en l'état actuel du projet
Figure 26	: Impact GES de la réalisation d'un projet de reconstruction

Index des Annexes

Annexe 1	: Référentiels
Annexe 2	: Outil d'évaluation des performances en termes de développement durable
Annexe 3	: Définitions des indicateurs environnementaux (Extrait des normes EN 15643-1:2010 et NF P01-010)
Annexe 4	: Principaux indice à l'intersection du SOCIAL-ECONOMIE-ENVIRONNEMENTAL
Annexe 5	: Extraits du protocole relatif à la structure provisoire de gestion de la base de données sur les déclarations environnementales et sanitaires des produits de
Annexe 6	: Evolution des coûts de la construction et des prix à la consommation (source INSEE)
Annexe 7	: Guide d'emploi de Batiprix
Annexe 8	: Solutions techniques pour les murs
Annexe 9	: Sources des produits - solutions techniques
Annexe 10	: Produits utilisés pour les composant du bâtiment autre que le mur
Annexe	: Quantitatif du logement

11	
Annexe 12	: Simulation des comportements thermiques à l'usage (Pleiades+COMFIE)
Annexe 13	: Extrait du fichier obtenu pour la solution bois

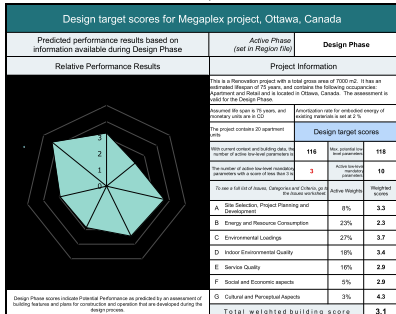
Abréviations

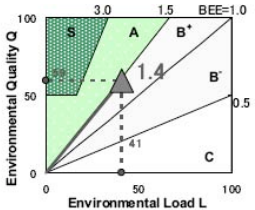
ACV	Analyse en Cycle de Vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ADP	Abiotic Depletion Potential
ANR	Agence Nationale de la Recherche
ASTM	organisme de normalisation international
CAE	Conseil des Architectes d'Europe
CE	Communauté Européenne
CITEPA	Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique
CIRED	Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement
CNOA	Conseil Nationale de l'Ordre des Architectes
COV	Composés Organiques Volatils
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DTU	Document Technique Unifié est un document contenant des règles techniques
EPFL	l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
EPS	méthode d'évaluation des externalités mise à jour par Stenn
SIKA	méthode d'évaluation des externalités
EUROCODE	normes européennes de conception, de dimensionnement et de justification des structures de bâtiment et de génie civil.
DALY	Disability Ajusted Life loss
DDVT	Durée de vie technique
EN	Norme Européenne
EVR	Eco-cost Value Ration
FDES	Fiche Déclarative Environnementale et Sanitaire
GES	Gaz à Effets de Serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
HQE ®	Haute Qualité Environnementale est une marque commerciale et une certification développée par une
HQE ² R	démarche intégrée pour l'approche de développement durable dans le bâtiment. Elle est le résultat d'un groupe de travail européen.
Iddri	<i>Institut du développement durable et des relations internationales</i>
IFEN	Institut Français de l'Environnement
INSEE	Institut national de la statistique et des études économiques
ISO	International Organization for Standardization est un organisme international de normes
LCC	Life Cycle Cost
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
LIFETIME	Groupe de travail constitué par la Communauté Européenne et chargé d'étudier la question du bâtiment dans l'approche du développement soutenable
MEEDDM	Ministère de l'écologie, du développement durable des transports et du logement
NF	Norme française
OCDE	Organisation de coopération et de développement économique
PIB	Produit Intérieur Brut
PNUD	Programme des Nations Unis pour le Développement
UF	Unité Fonctionnelle
VNF	Voies Navigables de France
WCED	World Commission on Environment and Development

ANNEXES

Annexe 1: Référentiels

Intitulé	Description	Qualités	Défauts	Prise en compte de la durée de vie
HQE®/QEB France http://assohqe.org/hqe/	Présentation sous forme de 14 cibles auxquels il faut prêter attention : Bâtiments neufs/ Réhabilitation Relation du bâtiment avec son environnement Choix intégré des produits, systèmes et procédés de construction Chantier à faible impact environnemental Gestion de l'énergie Gestion de l'eau Gestion des déchets d'activité Maintenance, pérennité des performances environnementales Confort hygrothermique Confort acoustique Confort visuel Confort olfactif Qualité sanitaire des espaces Qualité sanitaire de l'air Qualité sanitaire de l'eau	- Système souple et « suggestif » - Incitation à la prise en compte de l'adaptabilité	- Aucune évaluation des coûts - Aspect économique n'est pas réellement abordée	Pas de prise en compte de l'impact de la durée de vie sur les indicateurs de DD Aucune valorisation de l'adaptabilité et la capacité d'évolution
LEED/ USGBC Canada http://www.usgbc.org/	- Comprend une liste des éléments de prise en compte de l'environnement permettant de « marquer » des crédits unitaires - Destinés au professionnels ou collectivités. - Bâtiments neufs Réhabilitation Quartiers Bâtiments tertiaires - Optimisation de la performance énergétique Valorisation : - Protection de la couche d'ozone (matériaux sans HCFC) - Réduction des déchets, des matériaux recyclables - Réutilisation de l'existant, des matériaux à base de recyclage, facilement recyclable, dont	- Etablit un manuel de référence qui énonce l'ensemble des exigences canadienne - Permet des certifications de projets et des accréditations professionnelles - Prise en compte de l'effet d'îlot de chaleur (sauf toiture) par rapport à la proximité.	- pondération des critères discutable : ex : la gestion de la qualité de l'air pendant les travaux (1point) a une valeur équivalente à la « réutilisation de 75% de la structure -Pas d'étude et d'indicateur économique.	- Bien qu'il ait une petite prise en compte de l'allongement de la durée de vie, pas de réelle évaluation de l'impact de la durée de vie, pas de pondération de ces critères d'allongement de vie par rapport aux autres critères ;

	<p>la fabrication est proche - Coût 300 à 400\$</p>  <table border="1" data-bbox="607 379 792 571"> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Design target score</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>116</td> <td>118</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>A. Site Selection / Project Planning and Development</td> <td>8%</td> <td>3.3</td> </tr> <tr> <td>B. Energy and Resource Consumption</td> <td>25%</td> <td>2.3</td> </tr> <tr> <td>C. Environmental Loadings</td> <td>27%</td> <td>3.2</td> </tr> <tr> <td>D. Indoor Environmental Quality</td> <td>16%</td> <td>3.4</td> </tr> <tr> <td>E. Service Quality</td> <td>16%</td> <td>2.9</td> </tr> <tr> <td>F. Social and Economic aspects</td> <td>5%</td> <td>2.9</td> </tr> <tr> <td>G. Cultural and Perceptual Aspects</td> <td>3%</td> <td>4.3</td> </tr> <tr> <td>Total weighted building score</td> <td></td> <td>3.1</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Design target score	116	118	3	10	A. Site Selection / Project Planning and Development	8%	3.3	B. Energy and Resource Consumption	25%	2.3	C. Environmental Loadings	27%	3.2	D. Indoor Environmental Quality	16%	3.4	E. Service Quality	16%	2.9	F. Social and Economic aspects	5%	2.9	G. Cultural and Perceptual Aspects	3%	4.3	Total weighted building score		3.1			
Category	Design target score																																	
116	118																																	
3	10																																	
A. Site Selection / Project Planning and Development	8%	3.3																																
B. Energy and Resource Consumption	25%	2.3																																
C. Environmental Loadings	27%	3.2																																
D. Indoor Environmental Quality	16%	3.4																																
E. Service Quality	16%	2.9																																
F. Social and Economic aspects	5%	2.9																																
G. Cultural and Perceptual Aspects	3%	4.3																																
Total weighted building score		3.1																																
<p>BREEAM UK www.breeam.org</p>	<p>Bâtiments neufs Rénovation Bâtiment existant Aménagement des quartiers</p> <p>Management Santé / Bien être Energie Transports Eau Matériaux Utilisation des sols et écologie Pollution Innovation</p>	<p>- évaluation en coût global</p>	<p>-Pas d'évaluation sociale et culturelle - Evaluation post-construction</p>	<p>Pas de prise en compte de l'impact de la durée de vie sur les indicateurs de développement durable</p>																														
<p>CASBEE Japon http://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/</p>	<p>Outil à modules multiple correspondant à l'aide à la conception, la construction neuve, la gestion de construction existante, la rénovation et l'impact urbain permettant la délivrance de certification exemple 2500 à 7500€ en France. CASBEE évalue le ratio Q/L, avec Q pour Building Environmental Quality & Performance et L pour Building Environmental Loadings - Système de pondération :</p>	<p>Evaluation des projets en termes d'énergie, de ressources et matériaux, d'environnement extérieur du site, d'Environnement intérieur, de qualité de service, Calcule des GES en cycle de vie complet Prise en compte de la</p>	<p>- Outil d'évaluation de l'évolution de la performance environnementale mais peu propice à la comparaison de choix de matériaux et de solutions de conception Pas d'étude et d'indicateur économique</p>	<p>L'extension de la durée de vie au travers de l'entretien est pris en compte mais la difficulté de précision impose de limiter à 30, 60 ou 90 ans la durée de vie des logements qui constitue l'indicateur BEE et indique le résultat global de l'évaluation environnementale des bâtiments. Il s'agit d'optimiser la performance intrinsèque du bâtiment, tout en limitant</p>																														

	<p>Les poids des champs d'évaluation ne sont pas déterminés uniquement par des données scientifiques, ils prennent également en compte les valeurs et perceptions des différentes parties intéressées comme les concepteurs, propriétaires, managers...etc. Ils sont déterminés par vote et études de cas. L'échelle de notation se situe entre 1 et 5</p> 	flexibilité de la construction		<p>les charges et impacts infligés à l'environnement externe. Les durées de vie sont fixées. Pour les logements, les durées sont de 30,60 ou 90 ans selon les contraintes choisies. Celles ci modifie l'un des indices Q2 ce qui semble modifier l'émission CO2 annuel mais pas d'étude spécifique permettant l'optimisation durée.... Et rien sur les autres conséquences donc quelle étude de l'impact de la durée de vie sur les indicateurs ?</p> <p>L'impact de la durée de vie ne semble pas avoir fait l'objet d'une étude spécifique approfondie</p>
HK-BEAM Hong-Kong	<p>Outil d'évaluation d'impacts environnementaux de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bâtiments résidentiels - Bâtiments commerciaux - Bâtiments institutionnels. <p>Associé à un référentiel et certification</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Prend en compte la ré-utilisation et l'adaptabilité - Crédit fourni pour la réduction d'impact de l'air conditionnée - Prise en compte des coûts et de l'impact social et culturel - Tables de calculs fournies <p>Prend en compte :</p> <ul style="list-style-type: none"> - l'emplacement du site la planification et les émissions -Utilisation et la gestion des déchets - Consommation d'énergie - Consommation d'eau et le confort thermique, la qualité de l'air intérieur 		Durée de vie évoquée sans développement

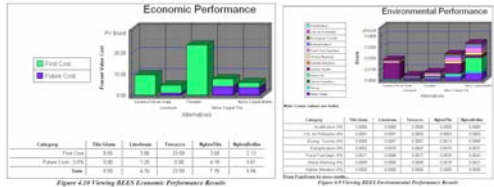
		l'éclairage, le bruit, les vibrations... Développement modulaire débouchant sur l'évaluation sous forme de crédit unitaire		
Green Globes Tools www.greenglobes.com US/Canada	Evaluation de l'impact environnemental des constructions neuves ou grosses rénovations présentées sous forme de modules fournissant des points et un score pour le résultat global.	- Facilité d'utilisation,	- Aucune lisibilité dans le choix de la pondération des modules - Pas de véritable prise en compte de la durée de vie Voir valorisation ci-contre. - La dernière version semble mettre en place une approche en coût global.	Pour la prise en compte de la durée de vie : - Adaptabilité de la construction : 5/1000 - Réutilisation de l'existant 15/1000 - Impact du cycle de vie des matériaux et du système dans son ensemble 40/1000 - Pas de véritable prise en compte de la variable durée de vie, de son impact sur les indices de DD
Céquami http://www.mamaisconcertifree.com/	Constitué par des professionnels de la construction qui prennent en charge l'amélioration d'une maison individuelle après évaluation initiale de la maison existante en respectant les exigences du Référentiel	Certification qui garantie : - Sécurité des occupants - Efficacité Energétique - Confort - Réduction des risques sanitaires - Gestion de l'eau - Matériaux et équipements - Réduction des impacts du chantier - Obtention et conservation de la certification		Pas de prise en compte de l'impact de la durée de vie
Passiv'Haus® Allemagne		Concerne les questions énergétiques	Pas d'évaluation de développement durable	

MINERGIE® ou MINERGIE-P® MINERGI-ECO (Suisse) www.minergie.fr	est un complément au standard MINERGIE® ou MINERGIE-P® - Concerne le neuf et la réhabilitation	Concerne les questions énergétiques	Pas d'évaluation de développement durable	
Eco-Pro Habitat Belgique	- Délivrance d'un certificat suite au respect d'une charte	- Simple et gratuit		- Néant

Annexe 2 : Outil d'évaluation des performances en termes de développement durable

Intitulé	Description	Avantages	Défauts	Prise en compte de la durée de v
ELODIE-CSTB	Outil permettant de calculer la pression exercée par le bâtiment sur l'environnement en termes de : - Épuisement de ressources - Émissions polluantes - Nuisances sur le voisinage	Calcul les impacts environnementaux des produits du bâtiment à partir de INIES	- Outils d'évaluation spécifiquement sur le domaine environnemental - Prise en compte des durées de vie typique des produits	- Prise en compte des durées de vie typique des produits
PAPOOSE –France (Programmation et analyse de Projets d'Ouvrages et d'Opérations Soucieux de l'Environnement)	Outil d'aide à la décision ciblant les propriétaires, développé par le BE TRIBU, concerne la phase de conception	Calculs 13 indicateurs environnementaux	Tient compte des aspects économiques	- Durée de vie forfaitaire
Eco-Quantum Pays-Bas	calcul de l'efficacité environnementale des plans de construction et de nouveaux systèmes énergétiques, l'efficacité et le coût des améliorations à l'environnement. Porte exclusivement sur les bâtiments résidentiels.			Durée de vie prise en compte de 50 ans.
Invest 2 UK http://investv2.bre.co.uk/	Méthode d'évaluation sous forme d'eco-points, avec une note globale pour mesurer la performance environnementale et économique du bâtiment et de l'îlot			-
IISBE/ SBTOOL/ GBTOOL Canada www.sbis.info	Développement modulaire débouchant sur l'évaluation de -1 à 5 des différents points et un score final Débouche sur une certification du projet Module de spécifications des priorités locales	- Adaptation de l'outil aux spécificités locales - Prise en compte des coûts et de l'impact social et culturel - Prise en compte de la flexibilité	- Les paramètres de l'évaluation économique sont laissés à la libre appréciation de l'utilisateur qui doit avoir une expertise dans le domaine - Evaluation à la fin de la construction.	- Pas de véritable étude de l'impact de la durée de vie à l'origine de la prise en compte des durées d'utilisation.

	S'adresse aux nouvelles constructions et rénovations importantes Bâtiments commerciaux et résidentiels	<ul style="list-style-type: none"> - Prise en compte des priorités locales. - Outil évolutif en fonction des phases du projet - Outil précis, seul à s'adapter aux contraintes et priorités locales. - Seul à prendre en compte les questions de coûts , sociales et culturelles de façons sommaires Voir E4, F1, F2, G1 et G2 - Notation : Déficiante (-1) Acceptable (0) Bonne (+3) Meilleure (+5) 		
ATHENA Eco-calculator USA/ CANADA	Évaluation de l'impact des matériaux d'un bâtiment (fabrication, transport, construction, maintenance, démolition)	Outil très synthétique	Absence de prise en compte des coûts Absence d'analyse de l'impact de la durée de vie sur les indicateurs de DD	Absence d'analyse de l'impact de la durée de vie sur les indicateurs de DD
EQUER	EQUER est un outil d'évaluation de la qualité environnementale des bâtiments, ayant pour but d'aider les acteurs à mieux cerner les conséquences de leurs choix. Un tel outil d'analyse est utilisable par l'ensemble des professionnels du bâtiment. Un Architecte peut mieux justifier son projet auprès du Maître d'Ouvrage, en présentant un bilan environnemental rigoureux de son projet. Base de donnée source : ECOINVENT-KBOB	<ul style="list-style-type: none"> - Evalue le bilan énergétique, déchets, effet de serre, épuisement des ressources, acidification, eutrophisation - Distingue et évalue séparément les phases de construction, utilisation, rénovation et démolition - Associé à Pleiade-Comfie 	<ul style="list-style-type: none"> - Matériaux évalués et non les produits. - Durée de vie limitée à 90 ans. 	<ul style="list-style-type: none"> - La durée de vie du bâtiment est limitée à 90 ans. La durée de vie des composants est comptabilisée sur cette durée, exceptés les finitions intérieures et les enduits extérieurs qui sont de 10 ans.
COCON	- Outil de comparaison de solutions	- L'outil est d'une utilisation simple	- Les durées de vie sont	- Durées de vie des produits

	techniques en termes d'impact environnementaux - Base de donnée INIES et données d'expert	- Présentation des performances sous forme de radars	typiques. - Pas de module d'évaluation économique et social	typiques - Pas de prise en compte de la durée de vie des bâtiments
BEES USA	- Méthode d'évaluation de l'impact environnemental des produits 	- Permet réellement de comparer les conséquences des choix de conception tant sur le plan environnemental qu'économique - Algorithmes et pondérations fournis Outil relativement complet. Seul outil à fournir des précisions quant aux coûts initiaux et futurs ainsi qu'une réflexion sur l'actualisation.	- Pas d'étude véritable de l'impact de la durée de vie sur les indicateurs...	L'outil ne laisse cependant pas apparaître une véritable réflexion sur l'impact de la durée de vie sur les indicateurs de DD et les coûts, durée de vie qu'il limite volontairement à 50 ans.
APOGEE-PERIGEE www.apogee-perigee.com/sperigee/pels/lccfr.asp	Logiciel de calcul en coût global		Absence de calcul de coûts étendus Absence d'évaluation des impacts environnementaux et sociaux Durée de vie prise en compte : 30 ans	Durée de vie prise en compte : 30 ans
TEAM France	- modules de matière première, process généralement rencontré. - Développé par ECOBILAN pour tous les secteurs Il inclut sa propre base de données TEAM	- Utilise la base INIES	-TEAM n'est pas un outil spécifique au secteur du bâtiment	- Durées de vie typiques des produits (INIES)

Annexe 3 : Définitions des indicateurs environnementaux (Extrait des normes EN 15643-1:2010 et NF P01-010)

Impacts	Unités	Définitions
Energie primaire totale	MJ	Somme de toutes les sources d'énergie qui sont directement puisées dans les réserves naturelles telles que le gaz naturel, le pétrole, le charbon, le minerai d'uranium, la biomasse, l'énergie hydraulique, le soleil, le vent, la géothermie L'énergie primaire totale est divisée en énergie non renouvelable et énergie renouvelable d'une part ou encore en énergie procédé et énergie matière d'autre part. L'équation suivante illustre cette définition : Énergie primaire totale = énergie non renouvelable + énergie renouvelable. = énergie procédé + énergie matière.
Energie renouvelable		énergie provenant de sources non fossiles renouvelables
Energie non renouvelable	MJ	Energie provenant de sources qui ne sont pas définies comme des sources d'énergie renouvelable. Ressource existant en quantité fixe ne pouvant pas être régénérée dans une échelle de temps humaine.
Energie primaire procédé	MJ	apport d'énergie nécessaire dans un processus élémentaire pour mettre en œuvre le processus ou faire fonctionner l'équipement correspondant, à l'exclusion des entrants énergétiques de production et de livraison de cette énergie
GES	kg éq CO2	évalue la contribution du produit à l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre. L'augmentation de l'effet de serre entraîne des modifications du climat de la Terre, et notamment une augmentation de la température moyenne, d'où le nom de l'indicateur.
Déchets valorisés	kg	tous les déchets, par nature (métal, plastique, biomasse...) et énergie qui sont générés par le cycle de vie du produit mais qui sont récupérés (recyclés ou encore valorisés) par d'autres cycles de vie.
Déchets non dangereux	kg	Déchets classés réglementairement comme non dangereux
Déchets dangereux	kg	Déchets classés réglementairement comme dangereux
Déchets radioactifs	kg	Déchets classés réglementairement radioactifs
Déchets inertes	kg	Déchets classés réglementairement inertes
Pollution de l'air et eau	m3	consiste à calculer le volume fictif d'air ou d'eau exprimé en m3 par lequel il faudrait diluer chaque flux de l'inventaire pour le rendre conforme au seuil de l'arrêté du 2 février 1998 modifié
Acidification	kg éq SO2	émissions dans l'air des substances (NO2, NH3, SO2, HCl, HF, H3PO4) possédant un potentiel d'acidification atmosphérique
Epuisement des ressources	Sb	tient compte des consommations de ressources énergétiques ou non énergétiques (sauf l'eau) en pondérant chaque ressource par un coefficient correspondant à un indice de rareté (l'antimoine a une valeur de 1 par convention).
Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	kg éq CFC 11	cherche à évaluer la contribution du produit à la destruction de la couche d'ozone dite stratosphérique. L'ozone est une molécule

Annexe 4 : Principaux indice à l'intersection du SOCIAL-ECONOMIE-ENVIRONNEMENTAL

Indicateurs	Définition	Intérêts	Limites
IDH indicateur de développement humain	Indice combinant trois indicateurs de base : l'espérance de vie à la naissance ; le revenu ; le niveau d'éducation, lui-même mesuré par le taux d'alphabétisation des adultes combiné au taux de fréquentation scolaire des jeunes.	Permet de mesurer le niveau global de la population en termes de richesse économique et alphabétisation.	N'aborde pas la dimension de la durabilité en tant que telle. Pas de lien avec le bâtiment Echelle macroscopique
ISEW Index of Sustainable Economic Welfare	Indice monétaire corrigeant le PIB sur un certain nombre de points : les coûts sociaux et environnementaux liés aux inégalités de revenus, à la mobilité, aux accidents de roulage, à la pollution de l'air et de l'eau, aux nuisances sonores, à la perte d'écosystèmes naturels, à la diminution des réserves de ressources non renouvelables, à la lutte contre le réchauffement climatique et à l'érosion de la couche d'ozone. En revanche, le travail domestique et les dépenses publiques d'éducation et de santé sont intégrés au titre de contributions positives au bien-être.	Seul indice à tenter d'intégrer la dimension de la durabilité	Pas de précision pour le secteur du bâtiment Echelle macroscopique
GPI Genuine Progress Indicator	Indice dérivé de l'ISEW auquel il apporte quelques modifications, notamment en introduisant la contribution positive du bénévolat, des biens de consommation durables et des infrastructures de transport et en soustrayant un certain nombre de coûts supplémentaires, comme le coût des fractures familiales, du chômage, de la perte de loisirs, de la perte d'espace disponible, etc.	Indicateurs présentant une image différente de l'ISEW.	Pas de précision pour le secteur du bâtiment Echelle macroscopique
MDP Measure of Domestic Progress	Indice dérivé de l'ISEW proche du GPI, dont il constitue une sorte de version britannique.	Réside notamment dans la prise en compte des consommations défensives des ménages en matière de santé et d'éducation et dans des améliorations apportées au calcul des coûts environnementaux.	Pas de précision pour le secteur du bâtiment Echelle macroscopique
IBEED indicateur de bien- être économique et	Indice comprenant : -les flux effectifs de consommation par habitant, qui incluent la consommation de biens et services marchands, les flux effectifs		Les dimensions économiques et sociales y jouent un rôle très important, nettement plus que les

social de Osberg	<p>par habitant de biens et services non marchands et les changements dans la pratique des loisirs ;</p> <ul style="list-style-type: none"> - l'accumulation nette dans la société des stocks de ressources productives, y compris l'accumulation nette de biens corporels et de parcs de logements, l'accumulation nette de capital humain et des investissements en Recherche & Développement (RD), les coûts environnementaux et la variation nette du niveau de l'endettement extérieur ; - la répartition des revenus, selon l'indice de Gini sur l'inégalité, ainsi que l'ampleur et l'impact de la pauvreté ; - la sécurité économique contre le chômage, la maladie, la précarité des familles monoparentales et des personnes âgées. 		<p>questions environnementales ;</p> <p>Pas de précision pour le secteur du bâtiment</p> <p>Echelle macroscopique</p>
IPH Indicateur de pauvreté humaine	<p>Comprend un mixte de trois indicateurs dont un subjectif sur le bien-être obtenu par des enquêtes directes auprès des personnes (monde entier, même protocole). H. pays ne dit rien de la durabilité. HPI = (de les deux satisfactions*espérance de vie) /l'empreinte écologique par habitant. Chacune des trois variables et normaliser sur une échelle de zéro à 100 mais le problèmes est que cet indicateur résumé l'idée d'une vie plus longue est jugée satisfaisante dans le respect des grands équilibres écologiques ou encore « l'efficacité écologique des pays dans la production de vie plus longue et jugée bonne » ;signale les manques, privations ou exclusions fondamentales d'une partie de la population en tenant compte de quatre facteurs : longévité, éducation, emploi et niveau de vie</p>	Comprend un mixte de trois indicateurs	<p>Part de subjectivité sur le bien-être obtenu par des enquêtes directes auprès des personnes (monde entier, même protocole).</p> <p>Pas de précision pour le secteur du bâtiment</p> <p>Echelle macroscopique</p>
HWI Human Well-Being Index	<p>composé d'indicateurs de base relatifs à la santé (espérance de vie) et à la vie familiale (stabilité de la famille), au revenu et au degré de satisfaction des besoins de base, à la santé de l'économie (inflation, chômage, endettement), au niveau d'éducation et aux moyens de communication, aux droits politiques et civiques, à l'état de paix ou de conflit armé (interne et externe), à la criminalité et à l'égalité.</p>		<p>Faible part de prise en compte de l'aspect environnemental</p> <p>Pas de précision pour le secteur du bâtiment</p> <p>Echelle macroscopique</p>
HDI Human Development	<p>L'indice de développement humain (IDH) est une mesure comparative de l'espérance de vie, l'alphabétisation, l'éducation et niveau de vie</p>		<p>Exclue les considérations environnementales.</p>

Index			
IPV ou indicateur de progrès véritable	indicateur de progrès véritable proposé par Redefining Progress, consiste à enrichir la mesure traditionnelle de la consommation des ménages en ajoutant des contributions à la vraie richesse et en lui retranchant les dégradations. Si l'on se fie à ses comptes, la vraie richesse durable par habitant aux États-Unis en 2002 représente seulement 29 % du PIB;	Comprend une tentative d'évaluation des dégradations	IPV ne tient pas compte de la consommation des services publics de santé, éducation etc. Comprend la délicate question de la monétarisation des variations de l'environnement Pas de précision pour le secteur du bâtiment Echelle macroscopique
Empreinte écologique	surface de la planète, exprimée en hectares , dont une population dépend compte tenu de ce qu'elle consomme.	Indicateur global que permet d'appréhender l'impact d'une population sur son territoire	Indicateur synthétique qui ne permet pas d'établir clairement le lien entre le comportement des individus et l'impact climatique Indicateur absolu qui ne prend pas toujours en compte le territoire dont dispose une population Pas de précision pour le secteur du bâtiment Echelle macroscopique

Annexe 5: Extraits du protocole relatif à la structure provisoire de gestion de la base de données sur les déclarations environnementales et sanitaires des produits de construction (INIES)

Dans le contexte :

- des politiques nationales visant à instaurer les conditions d'un développement durable dans le secteur du bâtiment;
- de la généralisation des démarches de qualité environnementale dans le secteur du bâtiment, et des travaux visant à la mise en place de leur certification,
- de la politique intégrée des produits,
- de la directive européenne sur les produits de construction,
- de la norme NF P01-010 portant sur la déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction, référence aux normes ISO 14020 sur les déclarations environnementales et 14040 analyses de cycle de vie,
- des travaux de normalisation européens issus du mandat M366 portant sur les méthodes de mesures d'émissions de substances dangereuses (CEN / TC 351).

La base de données constitue un cadre formel pour la mise à disposition d'informations conformes à la norme NF P01-010 relative aux déclarations environnementales et sanitaires des produits de construction.

Fonctionnement :

Pour la gestion de la base de données, sont maintenus pour la durée du présent protocole :

- ***un conseil de surveillance*** chargé :
- de veiller au bon fonctionnement de la base de données
- de définir les modalités de gestion de la base à mettre en place à l'issue du protocole incluant les modalités d'un financement pérenne, écartant tout recours à la publicité,
- de veiller au maintien de la conformité de la base vis-à-vis des évolutions des différents textes réglementaires et normatifs relatifs aux déclarations environnementales et sanitaires,

Constitué de représentant des signataires suivants :

- le Ministère de la Santé, de la jeunesse et des Sports (DGS),
- le Ministère de la Culture et de la Communication (DAPA),
- le Ministre de l'Economie, de l'Industrie et de l'Emploi (DGE),
- le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du développement durable et de l'Aménagement du territoire (DGUHC),
- le Ministère du Logement et de la Ville (DGUHC),
- l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME),
- l'Association des Industries de Produits de Construction (AIMCC),
- l'Agence nationale de l'Habitat (ANAH),
- la Confédération de l'Artisanat et des Petites Entreprises du Bâtiment (CAPEB),
- le Conseil National de l'Ordre des Architectes (CNOA)
- le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB).
- la Fédération Française du Bâtiment (FFB),
- l'Association QUALITEL,
- l'Union Sociale pour l'Habitat (USH),

Et par cooptation de représentants de :

- un représentant des associations de consommateurs,
- un représentant des associations de protection de l'environnement,

- **un comité technique** tel que défini à l'article 5 chargé de valider et de gérer, en référence à la norme citée à l'article 1, la nature des informations qui sont intégrées à la base INIES. Le comité technique est composé de :

- un représentant du MEEDDAT/DGUHC
- un représentant de l'ADEME
- un représentant de l'AIMCC
- un représentant de l'ANAH
- un représentant de la CAPEB
- un représentant du CNOA
- un représentant du CSTB
- un représentant de la FFB
- un représentant de l'association QUALITEL
- un représentant de l'USH

La présidence du comité technique est assurée par l'AIMCC.

Extrait de la procédure d'admission d'une FDES

Cette procédure a été approuvée par le CT et le CS de la base INIES – 13 Juin 2007

1. L'émetteur d'une Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) doit adresser au secrétariat du comité technique de la base INIES une demande de mise en ligne accompagnée d'un dossier d'admission complet décrit ci-après.

2. Le dossier d'admission d'une FDES dans la base INIES comprend obligatoirement, sauf mention :

- la FDES complète conforme à la norme NF P01-010 (format électronique PDF)
 - les preuves de l'aptitude à l'usage (conformité à des normes, marques de qualité, Agrément technique ...)
 - le libellé des résumés de la FDES proposés pour les informations sanitaires et de confort
- Informations sanitaires
- qualité sanitaire des espaces intérieurs
 - qualité sanitaire de l'eau
 - Informations de confort
- le certificat de vérification de la FDES, délivré dans le cadre du programme de déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction mis en place par AFNOR, dans le cas d'une FDES souhaitant apparaître comme "vérifiée" dans la base INIES,
- le nom et les coordonnées d'une personne physique responsable de la FDES 1

Annexe 6 : Evolution des coûts de la construction et des prix à la consommation (source INSEE)

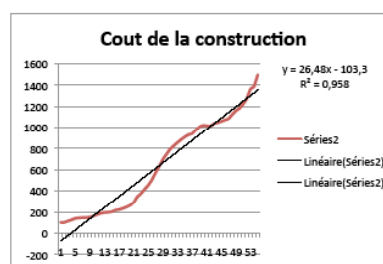
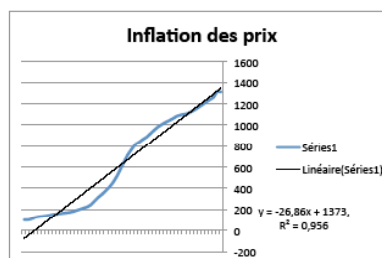
Coût de la construction		Indice des prix à la consommation		
1954	99			
1955	101	2008	23,6	1311,83991
1956	111	2007	23,7	1317,39855
1957	122	2006	22,7	1261,81212
1958	137	2005	22,3	1239,57754
1959	142	2004	21,91	1217,89883
1960	144	2003	21,45	1192,32907
1961	143	2002	21,01	1167,87104
1962	149	2001	20,62	1146,19233
1963	159	2000	20,28	1127,29294
1964	173	1999	19,94	1108,39355
1965	186	1998	19,84	1102,83491
1966	191	1997	19,7	1095,05281
1967	195	1996	19,47	1082,26793
1968	198	1995	19,09	1061,14508
1969	216	1994	18,76	1042,80156
1970	220	1993	18,46	1026,12563
1971	231	1992	18,08	1005,00278
1972	244	1991	17,66	981,656476
1973	262	1990	17,12	951,6398
1974	291	1989	16,56	920,511395
1975	345	1988	15,98	888,271262
1976	375	1987	15,56	864,924958
1977	416	1986	15,09	838,799333
1978	452	1985	14,7	817,120623
1979	502	1984	13,89	772,095609
1980	569	1983	12,93	718,732629
1981	630	1982	11,79	655,364091
1982	697	1981	10,55	586,436909
1983	746	1980	9,3	516,953863
1984	794	1979	8,19	455,252918
1985	826	1978	7,4	411,339633
1986	855	1977	6,78	376,876042
1987	884	1976	6,2	344,635909
1988	908	1975	5,66	314,619233
1989	929	1974	5,06	281,267371
1990	939	1973	4,45	247,359644
1991	972	1972	4,07	226,236798
1992	1006	1971	3,84	213,451918
1993	1022	1970	3,63	201,778766
1994	1016	1969	3,45	191,773207
1995	1011	1968	3,24	180,100056
1996	1038	1967	3,1	172,317954
1997	1047	1966	3,02	167,871039
1998	1058	1965	2,94	163,424125
1999	1071	1964	2,87	159,533074
2000	1083	1963	2,77	153,97443
2001	1125	1962	2,65	147,304058
2002	1159	1961	2,53	140,633685
2003	1183	1960	2,44	135,630906
2004	1225	1959	2,3557	130,944969
2005	1270	1958	2,2234	123,590884
2006	1362	1957	1,9304	107,304058
2007	1385	1956	1,876	104,280156
2008	1497	1955	1,799	100

Augmentation moyenne du Coût de la construction

5,05

Augmentation moyenne inflation

4,9



Indice du Coût de la Construction : depuis 1954, l'ICC mesure tous les trois mois l'évolution du prix de construction des bâtiments neufs à usage principal d'habitation en France métropolitaine. Il exclut ainsi la charge foncière, c'est-à-dire le terrain et sa préparation, le raccordement aux réseaux, les travaux annexes et les honoraires liés à la construction, ainsi que les frais financiers et promotionnels ; il ne couvre pas non plus les opérations d'entretien et d'amélioration. (Courrier des statistiques n° 108, décembre 2003)

Indice des prix à la consommation : l'indice des prix à la consommation (IPC) est un instrument de mesure de l'inflation. Il permet d'estimer, entre deux périodes données, la variation moyenne des prix des produits consommés par les ménages. (source INSEE)

GUIDE D'EMPLOI

BATIPRIX a été conçu spécialement pour que les artisans et les petites et moyennes entreprises du Bâtiment puissent calculer leurs propres prix de manière simple et rapide sans jamais rien oublier.

Les prix indicatifs mentionnés correspondent à une entreprise moyenne dont les paramètres figurent au début de chaque chapitre (prix moyen horaire de main-d'œuvre, multiplicateur frais généraux et bénéfice). La personnalisation des prix, nécessaire pour tenir compte de vos propres charges et méthodes de travail, est facilitée par la présentation claire des sous-détails d'ouvrages figurant dans BATIPRIX.

Avant de personnaliser les prix des ouvrages figurant dans BATIPRIX, il est impératif de bien assimiler leur décomposition. Le principe détaillé et commenté de cette décomposition est résumé ci-dessous.

Mode de mesurage

Les quantités d'ouvrages à retenir lors de l'utilisation de BATIPRIX sont celles réellement mises en œuvre.

Temps moyens d'exécution

Les temps moyens de main-d'œuvre pour l'exécution d'un ouvrage (colonne 4) sont exprimés en heures et millièmes d'heure (voir tableau de conversion page 30) ramenés à un ouvrier moyen.

Exemple :

Un mur en parpaings pleins 15 x 20 x 50 de 5,57 x 2,50 ht = 13,92 m², a été réalisé (y compris le traçage, l'approche des matériaux, etc.) en une journée de 8 heures par 2 ouvriers, soit 16 heures de main-d'œuvre.

Le temps au m² est donc de :

$$\frac{16 \text{ h}}{13,92 \text{ m}^2} = 1,150 \text{ heure/m}^2$$

Précisions concernant les conditions d'intervention

Hauteur d'intervention. Les ouvrages détaillés dans BATIPRIX s'entendent pour des travaux exécutés jusqu'à 2,5 m de hauteur. Si ces travaux débutent ou se poursuivent au-delà de cette hauteur, il y aura lieu de prévoir un échafaudage.

Locaux occupés ou encombrés. Pour les travaux exécutés dans des locaux occupés d'une manière permanente ou intermittente, ou dans des locaux encombrés, il y aura lieu de prendre en compte une perte de temps supplémentaire, ou à défaut d'appréciation, d'appliquer une majoration de 10 % sur la main-d'œuvre. Les protections particulières et les manutentions du mobilier (ou autres), présents dans les locaux, seront à reprendre en supplément.

Petites interventions. Les ouvrages détaillés dans BATIPRIX s'entendent pour des travaux nécessitant au moins l'intervention d'un ouvrier pendant une journée complète. Dans le cas d'intervention d'une durée inférieure, il y aura lieu de prendre en compte le déplacement spécial aller et retour qui ne pourra être inférieur à une heure.

Approvisionnement « rendu chantier ». Les matériaux et matériels sont considérés rendus chantier (hors sujétion de manutentions : coltinage, montage et descente par escalier).

Décomposition du prix de vente HT

Exemple de calcul : code 02 08 03 03 003 - Cloison plaque de plâtre sur ossature ép. 72 mm.

		Fourniture et mise en œuvre	Mise en œuvre seule	
Col. 5	Main d'œuvre + charges sociales	0,600 h x 24,53 €		Coût de la main d'œuvre compris charges sociales nécessaires à la réalisation de l'ouvrage (calcul du prix moyen horaire - voir tableau 4).
		14,72	14,72	
Col. 9	Fournitures de matériaux	12,03		Prix d'achat des fournitures remises déduites, rendues chantier, compris pertes et déchets d'emploi.
	Déboursé sec	26,75 (col. 10)	14,72 (col. 5)	Main d'œuvre + charges sociales (col. 5) + fournitures (col. 10)
	Coefficients multiplicateurs frais généraux :			Ces coefficients multiplicateurs vous sont donnés à titre indicatif au début de chaque corps d'état. Nous vous conseillons de les adapter à votre entreprise en fonction de vos propres paramètres (voir tableau 5).
	1) pour calcul du prix de revient en fourniture et mise en œuvre	= 1,305 x (col. 10)		
	2) pour calcul du prix de revient en mise en œuvre seule		= 1,55 x (col. 5)	
	Prix de revient	34,91 (col. 11)	22,82	(colonne 10) x 1,305 (colonne 5) x 1,55
	Coefficient multiplicateur bénéfices et aléas	1,111	1,111	
	Prix de vente HT	38,79 € (col. 12)	25,34 € (col. 13)	Ces prix sont obtenus à partir des prix de revient affectés de la marge bénéficiaire de 10 % du prix de vente, soit un coefficient de 1,111.

Annexe 8: Solutions techniques pour les murs

Finition extérieure	I/R (I en W/mK R en m ² .K/W)	Corps (Elément porteur)	I/R (I en W/mK R en m ² .K/W)	Isolant	I/R (I en W/mK R en m ² .K/W)	Finition intérieure	I/R (I en W/mK R en m ² .K/W)	R total m ² .K/W
enduit minéral	-/0,02	bloc béton creux 200mm	/0,21 ⁴¹	190 mm isolant LV ⁴²	0,04 ⁴³ /4,73	plaque de plâtre	0,32/0,04 ⁴³	5
enduit minéral + lame d'air + OSB	-/0,27	structure bois	-	190mm isolant LV	0,04/4,69	plaque de plâtre	0,32/0,04 ⁴³	5
enduit minéral	/0,02	multi alvéoles 300 mm	/2,61 ⁴¹	100mm d'isolant LV	0,04/2,37	plaque de plâtre	0,32/0,04 ⁴³	5
-	-	Pierre de Noyant 240mm	1,1/0,18 ⁴¹	190 mm isolant LV	0,04/4,82	plaque de plâtre	0,32/0,04 ⁴³	5
enduit minéral	-/0,02	béton cellulaire 250 mm	-/2,56 ⁴¹	100 mm isolant LV	0,04/2,38	plaque de plâtre	0,32/0,04 ⁴³	5
enduit minéral	-/0,02	brique terre cuite pleine		160mm d'isolant LV	0,04/	plaque de plâtre	0,32/0,04 ⁴³	5
enduit minéral	-/0,02	béton banché+ PSE	-/2,63 ⁴¹	80mm PSE + 90mm LV	0,04/2,31	plaque de plâtre	0,32/0,04 ⁴³	5
enduit minéral	-/0,02	mur terre crue 300mm	0,66/0,45 ⁴¹	180 mm isolant LV	0,04/4,53	plaque de plâtre	0,32/0,04 ⁴³	5

⁴¹ Source FDES – INIES- <http://www.inies.fr/IniesConsultation.aspx>

⁴² L'ADEME préconise R>4 (parois) pour obtenir les performances BBC et certification ACERMI. Les objectifs de la RT 2012 nous amènent à fixer un R_{paroi}= 5 (ADEME, 2009) et l'épaisseur de l'isolant en conséquence.

⁴³ Perez, J-P ; Romulus AM, 2001, *Thermodynamique : Fondements et applications* - Dunod, octobre 19.

Annexe 9: Sources des produits - solutions techniques pour le mur

Corps (Elément porteur)	Produit type	DTU de référence	Date	FDES	indice GES (kg eq CO2)	DDVT ⁴⁴ Année	Correspondant FDES
Bloc béton creux	Mur en maçonnerie de blocs béton	NF EN 771 ⁴⁷ , DTU 20.1 ³⁸	2006	Vérifiée	16	100	n.decousser@cerib.fr
Structure bois	-	DTU 41.2 DTU 31.2 ⁴⁵	-	Inexistante	46	-	-
Brique multi alvéoles 300 mm	Monomur Terre Cuite 30 rectifiée - IMERYS	NF EN 771 ⁴⁷ , DTU 20.1 ⁴⁸	2009	Vérifiée	41,3	100	f.poeydemenge@imerys.com
Pierre	Mur massif en pierre de Noyant	NF EN 771, DTU 20.1 ⁴⁸	2010	Non vérifiée	24	200	s.sayagh@cnmtc.fr
Béton cellulaire	XELLA THERMOPIERRE	NF EN 771, DTU 20.1 ⁴⁸	2007	Bio Intelligence service	40	100	christian.guegan@xella.fr
Brique terre cuite pleine	-	DTU 20.1 ⁴⁸		Inexistante	49	-	-
Béton banché	Mur béton XF1 C25/30 avec doublage	DTU 23.1, DTU 20.1 ⁴⁸	2007	ECOBILAN	65,1	100	Benoist.thomas@unicem.fr
Mur terre crue	-	Pas de DTU		Inexistante ⁵⁰	9 ³⁰	-	-
Enduit minéral	mortier hydraulique d'enduit coloré	DTU 42.1 ⁵¹	2007	ECOBILAN	5,14	50	Alain.fabre@unicem.fr
Plaque de plâtre	Plaque de plâtre KF BA 13		2006	Non vérifiée	2,8	50	Eric.henneke@knauf.fr
Isolant	IBR Contact ép 220 mm	Voir DTU du corps du mur	2006	Vérifiée	3,01	50	michael.medard@saint-gobain.fr

Les fondations dépendent de la nature du sol et de sa stabilité. Respecter les textes réglementaires implique d'utiliser du béton armé ou de l'acier (DTU 13).

Les techniques utilisant des pieux en bois sont également intéressantes pour les bâtiments légers à ossature bois.

⁴⁴ Durée de vie Typique déclarée dans les FDES

⁴⁵ NF DTU 31.2 - Construction de maisons et bâtiments à ossature en bois

⁴⁶ L'absence de fiche a impliqué la reconstitution d'une donnée évaluée à partir des FDES des produits « OSB », Charpente bois et pare air

⁴⁷ NF EN 771 Spécification pour éléments de maçonnerie

⁴⁸ DTU de référence NF DTU 20.1 : Ouvrages en maçonnerie de petits éléments

⁴⁹ Evalué à partir de la FDES « Brique en terre cuite de parement »

⁵⁰ Une évaluation est fournie par Luc Floissac, valeur établie dans le projet TERCRUSO

⁵¹ NF DTU 42.1 - Réfection de façades en service par revêtements d'imperméabilité à base de polymères

Annexe 10 : Produits utilisés pour les composants du bâtiment autre que le mur^{52 53}

Composants	Produit type	FDES	Date	DDVT ⁵⁴ Année	Unité	indice GES (kg eq CO2)	Correspondant FDES
Charpente	Charpente bois traditionnelle (Chêne et résineux) AIMC	Vérifiée	2005	100	m ³	-477 ⁵⁵	Gerard.deroubaix @fcb.fr
Couverture	Tuile de terre cuites	Non vérifiée	2005	100	m ²	9,3	Noël.s@ctmnc.fr
Membrane	Membrane d'étanchéité synthétique	Vérifiée	2008	30	m ²	0,498	jchaminade@sfec- services.org
Plaque de plâtre	Plaque de plâtre KF BA 13	Non vérifiée	2006	50	m ²	2,8	Eric.henneke@knau f.fr
Poutre	Poutre en béton XF1 C25/C30	Non vérifiée	2007	100	ml	19,50	Benoist.thomas@uni cem.fr
Plancher	Plancher bas sur vide sanitaire en béton	Non vérifiée	2007	100	m ²	31	Benoist.thomas@uni cem.fr
Menuiseries extérieures	Fenêtre et porte-fenêtre en Pin sylvestre « Menuiseries 21 »	Vérifiée	2008	30	m ²	23,49	Gerard.deroubaix@f cba.fr
Réseau EEP et EEV	Canalisation PVC à la collecte des eaux usées et vannes	Non vérifiée	2007	50	ml	3,1	s.thomas@str- pvc.org
Alimentation eau sanitaire	Tube de cuivre pour distribution d'eau sanitaire	Non vérifiée	2008	100	ml	0,762	Tissot@cuivre.org
Equipements électriques	Non évalué						
Equipement de chauffage	Non évalué						
Equipement sanitaires	Non évalué						

⁵² Certains composants ont été négligés. Il s'agit des réseaux et équipements, électriques, menuiseries intérieures, finitions des murs, sols et plafonds.

⁵³ Lorsque les FDES n'étaient pas disponibles, les données ont été sélectionnées dans la base Ecoinvent

⁵⁴ Durée de vie Typique déclarée dans les FDES

⁵⁵ Pour l'imputation lors des calculs, l'unité de la fiche charpente étant le m³, il a été estimé un besoin de 0,1 m³ de bois par m² de surface couverte pour un plein pied

Annexe 11 : Quantitatif du logement *Figure 18*

Composants	Spécificités des solutions	Unité	Valeur	terrasse
Fondation	Béton de propreté	m ³	1,165	
	Semelle continue en BA	ml	46,6	
Mur de soubassement	Soubassement	ml	46,6	
Semelle isolée	Béton propreté	U	0,0125	
	Semelle (U)	U	1,25	
Dalle sur vide sanitaire		m ²	104,8	21,3
Eléments verticaux				
	Murs extérieurs			
	Structure	m ²	74,75	
	Isolation	m ²	74,75	
	Revêtement extérieur	m ²	74,75	
	Revêtement intérieur	m ²	74,75	
	Refend		16,75	
	Chaînage d'angle	ml	15	
	Poteaux	ml	24	
	Chaînage supérieur		26,3	34,6
Plâtrerie				
Plafond	Plafond	m ²		
	Plaque	m ²	91,12	
	Structure	m ²	91,12	
	Isolation	m ²	91,12	
Cloisons			28,75	
Toiture				
Charpente		m ²	117	30,96
Couverture		m ²	130	30,96
EEP et EEV		ml	47	
Plomberie		ml	25	
Electricité			Non évalué	
Appareil de Chauffage			Non évalué	
Equiptement cuisine et sdb			Non évalué	
Finitions			Non évalué	
Menuiseries intérieures			Non évalué	

Annexe 12 : Simulation des comportements thermiques à l'usage (Pleiades+COMFIE)
 Synthèse des besoins énergétiques des solutions

Solution Ossature bois				
Zone	Besoins			
	Chauffage kWh	Chauffage kWh/m2	Climatisation kWh	Climatisation kWh/m2
Zone 1	1907	35	29	1
Zone 2	1273	36	23	1
Total	3180	36	52	1
Solution Multi-alvéolaire				
Zone	Besoins			
	Chauffage kWh	Chauffage kWh/m2	Climatisation kWh	Climatisation kWh/m2
Zone 1	1900	37	29	1
Zone 2	1271	35	23	1
Total	3171	36	52	1
Solution Pierre				
Zone	Besoins			
	Chauffage kWh	Chauffage kWh/m2	Climatisation kWh	Climatisation kWh/m2
Zone 1	1976	37	29	1
Zone 2	1220	35	23	1
Total	3196	36	52	1
Solution béton creux				
Zone	Besoins			
	Chauffage kWh	Chauffage kWh/m2	Climatisation kWh	Climatisation kWh/m2
Zone 1	1951	22	27	1
Zone 2	1302	15	23	1
Total	3253	37	50	1
Solution Brique pleine				
Zone	Besoins			
	Chauffage kWh	Chauffage kWh/m2	Climatisation kWh	Climatisation kWh/m2
Zone 1	2018	37	29	1
Zone 2	1347	35	23	1
Total	3365	36	52	1
Solution Béton banché				
Zone	Besoins			
	Chauffage kWh	Chauffage kWh/m2	Climatisation kWh	Climatisation kWh/m2
Zone 1	1893	37	29	1
Zone 2	1264	35	23	1
Total	3157	36	52	1
Solution Terre crue				
Zone	Besoins			
	Chauffage kWh	Chauffage kWh/m2	Climatisation kWh	Climatisation kWh/m2
Zone 1	1949	37	29	1
Zone 2	1301	35	23	1
Total	3250	36	52	1
Solution béton cellulaire				
Zone	Besoins			
	Chauffage kWh	Chauffage kWh/m2	Climatisation kWh	Climatisation kWh/m2
Zone 1	2007	37	29	1
Zone 2	1340	35	23	1
Total	3347	36	52	1

Remarque : La zone 1 correspond à la zone de séjour et la zone 2 à la zone nuit

Annexe 13 : Extrait du fichier obtenu pour la solution bois

Description du B.timent

RÉcapitulatif des zones thermiques

Zone	Surface (m ²)	Volume (m ³)
zone1	53.72 m ²	134.00 m ³
zone2	35.36 m ²	88.00 m ³

RÉcapitulatif des piÉces

Zone	PiÉces	Surface (m ²)	Volume (m ³)
zone1	PiÉce1	53.72 m ²	134.00 m ³
zone2	PiÉce2	35.36 m ²	88.00 m ³

Description

ZONE : zone1	Surface : 53.72 m ²	Volume : 134.00 m ³
ScÉnarios de la zone :		
CatÉgorie	Nom	CaractÉristiques
Consigne de tempÉrature	Chauffage standard 17/19	Position du thermostat : zone1
Rafraichissement	Climatisation standard 28	Position du thermostat zone1
Ventilation Externe	Ventilation d'hiver VMC 15m3/h	
ChaudiÉres	e.l.m. leblanc C GLA23-3HN5	

PIECE : PiÉce1	Surface : 53.72 m ²	Volume : 134.00 m ³
----------------	--------------------------------	--------------------------------

PAROI	Surf. (m ²)	H (m)	L (m)	Composition	Ori-entation	Incli-naison	Pont ther-mique	Expo-sition au vent	En liaison avec	Etat de surface interne	Etat de surface externe	Occul-tation	Albedo	Ecran vÉgÉtal
Paroi 1/1	19.75	2.50	7.90	Bardage bois - Marc	180 °	90 °	(5.53)	Normale	Ext.	DÉfaut	DÉfaut	Aucun	Aucun	Aucun

Ouverture	1.69	2.04	0.83	Porte bois isolante performante	Masque :									
Paroi 1/2	17.00	2.50	6.80	Cloison lÉgÉre	-90 °	90 °	(0.00)	Normale	Paroi 2/4	DÉfaut	DÉfaut	Aucun	Aucun	Aucun
Paroi 1/3	19.75	2.50	7.90	Bardage bois - Marc	0 °	90 °	(5.53)	Normale	Ext.	DÉfaut	DÉfaut	Aucun	Aucun	Aucun
Ouverture	8.40	2.10	4.00	Fen bat PVC DV 4.6.4	Masque : marc									
Paroi 1/4	17.00	2.50	6.80	Bardage bois - Marc	90 °	90 °	(4.76)	Normale	Ext.	DÉfaut	DÉfaut	Volet d'ÉtÉ	Aucun	Aucun
Ouverture	4.95	2.20	2.25	Fen bat PVC DV 4.6.4	Masque :									
Paroi 1/5	53.72	6.80	7.90	Combles perdus - Marc	0 °	0 °	(0.00)	Normale	Ext.	DÉfaut	DÉfaut	Aucun	Aucun	Aucun
Paroi 1/6	53.72	6.80	7.90	Pl. sur VS en bÉton	0 °	180 °	(0.00)	Normale	Sol	DÉfaut	DÉfaut	Aucun	Aucun	Aucun

ZONE : zone2	Surface : 35.36 m ²	Volume : 88.00 m ³
ScÉnarios de la zone :		
CatÉgorie	Nom	CaractÉristiques
Consigne de tempÉrature	Chauffage standard 17/19	Position du thermostat : zone2
Rafraichissement	Climatisation standard 28	Position du thermostat zone2
Ventilation Externe	Ventilation d'hiver VMC 15m3/h	
ChaudiÉres	e.l.m. leblanc C GLA23-3HN5	

PIECE : PiÉce2	Surface : 35.36 m ²	Volume : 88.00 m ³
----------------	--------------------------------	-------------------------------

PAROI	Surf. (m ²)	H (m)	L (m)	Composition	Ori-entation	Incli-naison	Pont ther-mique	Expo-sition au vent	En liaison avec	Etat de surface interne	Etat de surface externe	Occul-tation	Albedo	Ecran vÉgÉtal
Paroi 2/1	13.00	2.50	5.20	Bardage bois - Marc	180 °	90 °	(3.64)	Normale	Ext.	DÉfaut	DÉfaut	Aucun	Aucun	Aucun
Ouverture	0.86	1.00	0.86	Fen bat PVC DV 4.6.4	Masque :									
Paroi 2/2	17.00	2.50	6.80	Bardage bois - Marc	-90 °	90 °	(4.76)	Normale	Ext.	DÉfaut	DÉfaut	Aucun	Aucun	Aucun
Ouverture	1.15	1.00	1.15	Fen bat PVC DV 4.6.4	Masque :									
Paroi 2/3	13.00	2.50	5.20	Bardage bois - Marc	0 °	90 °	(3.64)	Normale	Ext.	DÉfaut	DÉfaut	Aucun	Aucun	Aucun
Ouverture	2.70	1.20	2.25	Fen bat PVC DV 4.6.4	Masque : marc									
Ouverture	2.70	1.20	2.25	Fen bat PVC DV 4.6.4	Masque : marc									
Paroi 2/4	17.00	2.50	6.80	Cloison lÉgÉre	90 °	90 °	(0.00)	Normale	Paroi 1/2	DÉfaut	DÉfaut	Aucun	Aucun	Aucun
Paroi 2/5	35.36	5.20	6.80	Combles perdus - Marc	0 °	0 °	(0.00)	Normale	Ext.	DÉfaut	DÉfaut	Aucun	Aucun	Aucun
Paroi 2/6	35.36	5.20	6.80	Pl. sur VS en bÉton	0 °	180 °	(0.00)	Normale	Sol	DÉfaut	DÉfaut	Aucun	Aucun	Aucun