



Analyse du cycle de vie et coûts du cycle de vie de matériaux régénératifs : Analyse comparative dans le secteur résidentiel belge



Mémoire de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade
d'Ingénieur civil Architecte par **DELVENNE Florence**

Promoteur : Professeur ATTIA Shady

Jury : REITER S., LEONARD A., HAUGLUSTAINE J.-M., EVRARD A.

Faculté des Sciences appliquées
Année académique 2015-2016

Sommaire

L'analyse du cycle de vie est un outil d'évaluation de l'impact environnemental de plus en plus reconnu. Appliquée dans le cadre de cette étude à quatre bâtiments (construction traditionnelle / IsoHemp / ArgiMob / Paille-Tech), elle est couplée au calcul du coût du cycle de vie, permettant ainsi de mettre en parallèle les conséquences des diverses constructions étudiées sur l'environnement et les contraintes financières associées.

L'unité fonctionnelle sélectionnée pour cette étude est un bâtiment (son plan interne faisant référence) ayant une durée de vie de 50 *ans*, dont les parois extérieures possèdent un U de 0,11 W/m^2K et dont la consommation d'énergie pour le chauffage correspond au critère passif, soit 15 $kWh/m^2.an$.

L'objectif de ce mémoire est de répondre à la question « Est-il possible, en Belgique, de construire différemment de la manière traditionnelle, tout en étant plus durable ? » La réponse est assurément positive. Mais derrière cet objectif se cache également la volonté de fournir une aide à la prise de décision aux candidats bâtisseurs et de leur faire découvrir les alternatives possibles offertes par des entreprises belges, locales, tournées vers l'avenir et conscientes de l'importance du concept de développement durable.

Il faut tout de même rester conscient du fait qu'il n'existe pas de solution idéale. A ce jour, l'architecture écologique est, je pense, avant tout une architecture de conviction. Elle reste généralement réservée à une minorité pour qui les moyens financiers ne sont pas à l'origine du choix du type de construction. Y aurait-il dès lors moyen de démocratiser cette architecture ? De mieux la faire connaître et de la rendre accessible à tout un chacun ?

Abstract

Life Cycle Assessment (LCA) is an increasingly recognized tool that allows us to evaluate environmental impacts. LCA will be applied to four buildings in this study (traditional / IsoHemp / ArgiMob / PailleTech construction) and will be coupled with Life Cycle Cost (LCC). This allows me to compare environmental impacts due to the studied construction and the associated financial constraints.

The functional unit selected for this study is a building (the inner plan is considered as reference) with a life time of 50 *years*. Its walls have a U value of 0,11 W/m^2K and its heating energy consumption meets the passive house standard (15 $kWh/m^2.an$).

This report objective is to answer the following question : « Is it possible, in Belgium, to build in a different way than the traditional one, while being more sustainable ? » The answer is undoubtedly positive. But the hidden objective of this work is the will to supply a help for decision-making to future builders and to make them discover possible alternatives offered by Belgian, local and forward-looking companies which are aware of the importance of a concept such as sustainability.

Nevertheless, we have to be aware that no ideal solution exists. I do think that, nowadays, environmentally friendly architecture is above all a conviction architecture. It is generally a minority exclusivity for whom financial means do not have any influence on their type of construction choice. Is there any way to democratize this architecture ? To publicise it and to make it approachable by everyone ?

Résumé

De nos jours, plus personne n'ignore la problématique du réchauffement climatique. Le secteur de la construction a un sérieux impact sur l'environnement. Il convient donc de réaliser que nous vivons dans un monde limité et qu'il est temps de modifier notre manière de vivre, de construire et de consommer. Ainsi, l'utilisation de matériaux régénératifs est tout à fait pertinente dans le cadre du développement durable.

En 1972, lors d'un sommet sur l'environnement, René Dubos a déclaré que nous devons agir local et penser global. Cette réflexion est à l'origine de mon travail.

Le but de ce travail est donc de réaliser une analyse du cycle de vie et un calcul des coûts du cycle de vie de quatre cas d'étude : une maison traditionnelle belge et trois constructions dites régénératives.

L'analyse du cycle de vie est un outil d'évaluation de l'impact environnemental d'un produit ou d'un système tout au long de son cycle de vie. Ce dernier est composé de cinq phases : l'extraction, la production, la construction, l'utilisation et la fin de vie. Ce travail n'aborde quant à lui que les phases d'extraction et de production ainsi qu'une partie de la phase d'utilisation.

Le coût du cycle de vie est un outil d'évaluation qui permet d'évaluer l'ensemble des coûts engendrés par le bâtiment tout au long de son cycle de vie. C'est donc une aide à la décision qui permet au candidat bâtisseur, une fois couplé à l'analyse du cycle de vie, d'établir les solutions les plus pertinentes économiquement et environnementalement parlant.

L'unité fonctionnelle sélectionnée pour cette étude est un bâtiment (son plan interne faisant référence) ayant une durée de vie de 50 *ans*, dont les parois extérieures possèdent un U de $0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$ et dont la consommation d'énergie pour le chauffage correspond au critère passif, soit $15 \text{ kWh/m}^2.\text{an}$.

Les systèmes étudiés sont donc une construction traditionnelle (blocs de béton, isolation de laine minérale et briques), une construction IsoHemp (blocs de béton de chanvre et ossature bois avec laine de chanvre), une construction Argimob (ossature bois avec cellulose insufflée et galets d'argile) et une construction PailleTech (ossature bois avec paille).

Chaque système est modélisé en trois dimensions et les quantités déterminées sur cette base. L'analyse du cycle de vie est réalisée grâce au logiciel OpenLCA et le coût du cycle de vie calculé dans le logiciel Excel grâce aux formules spécifiques.

Les résultats obtenus au terme de l'analyse du cycle de vie et du coût du cycle de vie sont nombreux. Je ne retiendrai ici que les deux résultats que j'estime les plus importants, soit les émissions de dioxyde de carbone pour chaque type de construction ainsi que ces mêmes émissions pour les cloisons extérieures de chaque construction. Ces dernières sont d'ailleurs les seules parois des habitations réellement comparables. On observe donc dans les deux cas que la construction traditionnelle est responsable des émissions les plus conséquentes. Les constructions régénératives ont quant à elles des impacts bien moins importants voire même négatifs pour certains. Elles absorbent donc plus de dioxyde de carbone qu'elles n'en émettent.

L'objectif de ce mémoire est de répondre à la question « Est-il possible, en Belgique, de construire différemment de la manière traditionnelle, tout en étant plus durable ? » La réponse est assurément positive. Mais derrière cet objectif se cache également la volonté de fournir une aide à la prise de décision aux candidats bâtisseurs et de leur faire découvrir les alternatives possibles offertes par des entreprises belges, locales, tournées vers l'avenir et conscientes de l'importance du concept de développement durable.

Il faut tout de même rester conscient du fait qu'il n'existe pas de solution idéale. A ce jour, l'architecture écologique est, je pense, avant tout une architecture de conviction. Elle reste généralement réservée à une minorité pour qui les moyens financiers ne sont pas à l'origine du choix du type de construction. Y aurait-il dès lors moyen de démocratiser cette architecture ? De mieux la faire connaître et de la rendre accessible à tout un chacun ?

Enfin, je tiens à préciser qu'il convient de relativiser la portée de ce mémoire. Au vu du temps imparti et du nombre de cas étudiés, il s'est révélé indispensable d'imposer de nombreuses limites et hypothèses. Cette étude pourrait et devrait donc être approfondie et complétée.

Je remercie Monsieur Shady Attia et Monsieur Guirec Ruellan pour leur aide, leur suivi, le temps qu'ils m'ont accordé ainsi que pour leurs remarques et réflexions pertinentes tout au long de ce travail. Je remercie aussi Monsieur Shady Attia de m'avoir permis de découvrir et de participer au programme WISBA 2015 - WIenerberger Sustainable Building Academy.

Je remercie également les membres de mon jury, Madame Sigrid Reiter, Madame Angélique Léonard, Monsieur Jean-Marie Hauglustaine et Monsieur Arnaud Evrard, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail. Je remercie également Madame Sandra Belboom pour l'aide qu'elle m'a apportée dans la compréhension du logiciel OpenLCA.

Je remercie aussi les entreprises Argibat, Isohemp, Mobic, Naturhome et PailleTech pour leur soutien et leur participation à ce travail.

Enfin, je remercie les membres de ma famille, et en particulier ma maman, pour leur présence, leurs encouragements et leur soutien indéfectible.

« Agir local, penser global. »
René Dubos (1972)

Table des matières

1	Introduction	25
2	État de l'art - Concepts et principes	32
2.1	Cycle de vie	33
2.2	Analyse du cycle de vie	34
2.2.1	Définition	34
2.2.2	Fonctionnement	35
2.2.2.1	Définition de l'objectif	35
2.2.2.2	Définition du champs d'étude	36
2.2.2.3	Analyse de l'inventaire du cycle de vie	37
2.2.2.4	Évaluation de l'impact du cycle de vie	39
2.3	Coût du cycle de vie	42
2.3.1	Définition	42
2.3.2	Fonctionnement	42
2.4	Maison passive	46
3	Méthodologie	47
3.1	Processus du mémoire	47
3.2	Hypothèses et limitations	49
3.3	Logiciels et base de données	51
4	Cas d'étude	53
4.1	Définitions - Constructions traditionnelle et régénérative	54
4.2	Composition des parois	55
4.2.1	Construction traditionnelle	55
4.2.2	Construction IsoHemp	57
4.2.3	Construction ArgiMob	60
4.2.4	Construction PailleTech	64
4.3	Plans - Présentation et modélisation	67
4.3.1	NaturHome	67
4.3.2	Concept de la maison NCube	68
4.3.3	Plans et modifications	70
4.4	Calculs des données de base des analyses	71

4.5	Détermination du coefficient de transmission thermique commun	72
4.6	Détermination de l'épaisseur d'isolant de la paroi traditionnelle	74
4.7	Détermination de l'épaisseur d'isolant de la paroi ArgiMob .	76
4.8	Détermination de l'épaisseur d'isolant de la paroi IsoHemp . .	78
4.9	Détermination des quantités de matériaux	80
5	Résultats - Construction traditionnelle	85
5.1	Cloisons extérieures	85
5.2	Cloisons intérieures	89
5.3	Plancher	92
5.4	Toiture	95
5.5	Maison complète	98
5.6	Phase d'utilisation	103
5.7	Coût du cycle de vie	105
6	Résultats - Construction IsoHemp	106
6.1	Cloisons extérieures	106
6.2	Cloisons intérieures	110
6.3	Plancher	113
6.4	Toiture	116
6.5	Maison complète	120
6.6	Phase d'utilisation	125
6.7	Coût du cycle de vie	127
7	Résultats - Construction ArgiMob	128
7.1	Cloisons extérieures	128
7.2	Cloisons intérieures	132
7.3	Plancher	136
7.4	Toiture	139
7.5	Maison complète	143
7.6	Phase d'utilisation	148
7.7	Coût du cycle de vie	150
8	Résultats - Construction PailleTech	151
8.1	Cloisons extérieures	151
8.2	Cloisons intérieures	155
8.3	Plancher	158
8.4	Toiture	161
8.5	Maison complète	165
8.6	Phase d'utilisation	170
8.7	Coût du cycle de vie	172
9	Analyse comparative	173

10 Conclusion	186
11 Références	189
12 Annexes	194
12.1 Inventaire des abréviations	194
12.2 Concept Sheet & Quad Chart	195
12.3 Maison NCube à Aubange - Plans originaux	199
12.4 Maison NCube à Aubange - Plans version traditionnelle . . .	202
12.5 Maison NCube à Aubange - Plans version IsoHemp	205
12.6 Maison NCube à Aubange - Plans version ArgiMob	208
12.7 Maison NCube à Aubange - Plans version PailleTech	211
12.8 Résultats de l'analyse du cycle de vie - Données chiffrées détaillées	214
12.9 Résultats du calcul du coût du cycle de vie - Données chiffrées détaillées	226
12.10 Interview 1 - Représentant de l'entreprise IsoHemp	243
12.11 Interview 2 - Représentants de l'entreprise PailleTech	258
12.12 Interview 3 - Représentant de l'entreprise Argibat	270
12.13 Interview 4 - Représentant de l'entreprise Mobic	307

Liste des figures

1.1	Émissions de gaz à effets de serre en Wallonie (2013) (AWAC. 2014)	27
1.2	Développement durable - concept (Delvenne, F. 2016)	28
1.3	Bâtiment de bureaux 2226 - Eberle Baumschlager (Wienerberger. 2016)	30
2.1	Cycle de vie - schéma (Delvenne F. 2016)	33
2.2	Analyse du cycle de vie (Delvenne F. 2016)	34
2.3	Principe du fonctionnement d'une analyse du cycle de vie (Delvenne F. 2016)	35
2.4	Principe de la subdivision (Delvenne F. 2016)	37
2.5	Principe de l'expansion/substitution (Delvenne F. 2016) . . .	38
2.6	Principe de la distribution (Delvenne F. 2016)	38
2.7	Evaluation de l'impact du cycle de vie (Delvenne F. 2016) . .	40
2.8	Concept de coût du cycle de vie (Delvenne F. 2016)	43
3.1	Processus du mémoire (Delvenne F. 2016)	47
3.2	Processus complété du mémoire (Delvenne F. 2016)	48
3.3	Logiciel OpenLCA (OpenLCA. 2016) - Base de données EcoInvent (PRé Consultants. 2016)	51
3.4	Logiciel Excel 2010 (Romain. 2014)	51
3.5	Logiciel Autocad 2015 (Delvenne F. 2016) - Logiciel Sketchup 2016 (Sketchup. 2015)	52
4.1	Composition des cloisons intérieures de la construction traditionnelle (Delvenne, F. 2016)	55
4.2	Composition des cloisons extérieures de la construction traditionnelle (Delvenne, F. 2016)	55
4.3	Composition du plancher de la construction traditionnelle (Delvenne, F. 2016)	56
4.4	Composition de la toiture de la construction traditionnelle (Delvenne, F. 2016)	56
4.5	IsoHemp (IsoHemp. 2016)	57

4.6	Composition des cloisons intérieures de la construction IsoHemp (Delvenne, F. 2016)	57
4.7	Composition des cloisons extérieures de la construction IsoHemp (Delvenne, F. 2016)	58
4.8	Composition du plancher de la construction IsoHemp (Delvenne, F. 2016)	58
4.9	Composition de la toiture de la construction IsoHemp (Delvenne, F. 2016)	59
4.10	Mobic (Mobic. 2016)	60
4.11	Argibat (Argibat. 2016)	61
4.12	Composition des cloisons intérieures de la construction Argimob (Delvenne, F. 2016)	61
4.13	Composition des cloisons extérieures de la construction Argimob (Delvenne, F. 2016)	62
4.14	Composition du plancher de la construction Argimob (Delvenne, F. 2016)	62
4.15	Composition de la toiture de la construction Argimob (Delvenne, F. 2016)	63
4.16	PailleTech (PailleTech. 2016)	64
4.17	Composition des cloisons intérieures de la construction PailleTech (Delvenne, F. 2016)	65
4.18	Composition des cloisons extérieures de la construction PailleTech (Delvenne, F. 2016)	65
4.19	Composition du plancher de la construction PailleTech (Delvenne, F. 2016)	66
4.20	Composition de la toiture de la construction PailleTech (Delvenne, F. 2016)	66
4.21	NaturHome (NaturHome. 2016)	67
4.22	Maison passive à Oviat (NaturHome. 2016)	67
4.23	Module 3D créé par NaturHome (NaturHome. 2016)	68
4.24	Configurateur 3D créé par la société NaturHome (NaturHome. 2016)	69
4.25	Maison NCube à Aubange	70
4.26	Dimensions des parois prédéfinies par la société PailleTech (PailleTech (2016))	70
4.27	Détail technique paroi PailleTech (échelle 1.10)	72
4.28	Détail technique paroi traditionnelle (échelle 1.10)	74
4.29	Détail technique paroi ArgiMob (échelle 1.10)	76
4.30	Détail technique paroi Isohemp (échelle 1.10)	78
4.31	Exemple de modélisation 3D - Coupe dans la construction ArgiMob (Delvenne F. 2016)	80
4.32	Exemple de modélisation 3D - Coupe dans la construction IsoHemp (Delvenne F. 2016)	80

5.1	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison extérieure traditionnelle	86
5.2	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la cloison extérieure traditionnelle	86
5.3	Acidification - Émissions des constituants de la cloison extérieure traditionnelle	86
5.4	Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison extérieure traditionnelle	87
5.5	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison extérieure traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites	87
5.6	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la cloison extérieure traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites	88
5.7	Acidification - Émissions des constituants de la cloison extérieure traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites	88
5.8	Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison extérieure traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites . . .	88
5.9	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison intérieure traditionnelle	89
5.10	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la cloison intérieure traditionnelle	89
5.11	Acidification - Émissions des constituants de la cloison intérieure traditionnelle	90
5.12	Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison intérieure traditionnelle	90
5.13	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison intérieure traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites	90
5.14	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la cloison intérieure traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites	91
5.15	Acidification - Émissions des constituants de la cloison intérieure traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites	91
5.16	Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison intérieure traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites . . .	91
5.17	Réchauffement climatique - Émissions des constituants du plancher traditionnel	92
5.18	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants du plancher traditionnel	92
5.19	Acidification - Émissions des constituants du plancher traditionnel	93
5.20	Eutrophisation - Émissions des constituants du plancher traditionnel	93

5.21	Réchauffement climatique - Émissions des constituants du plancher traditionnel - Quantités utilisées vs. produites	93
5.22	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants du plancher traditionnel - Quantités utilisées vs. produites . .	94
5.23	Acidification - Émissions des constituants du plancher traditionnel - Quantités utilisées vs. produites	94
5.24	Eutrophisation - Émissions des constituants du plancher traditionnel - Quantités utilisées vs. produites	94
5.25	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la toiture traditionnelle	95
5.26	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la toiture traditionnelle	95
5.27	Acidification - Émissions des constituants de la toiture traditionnelle	96
5.28	Eutrophisation - Émissions des constituants de la toiture traditionnelle	96
5.29	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la toiture traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites	96
5.30	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la toiture traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites	97
5.31	Acidification - Émissions des constituants de la toiture traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites	97
5.32	Eutrophisation - Émissions des constituants de la toiture traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites	97
5.33	Réchauffement climatique - Émissions des parois de la construction traditionnelle	98
5.34	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des parois de la construction traditionnelle	98
5.35	Acidification - Émissions des parois de la construction traditionnelle	99
5.36	Eutrophisation - Émissions des parois de la construction traditionnelle	99
5.37	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la construction traditionnelle	100
5.38	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la construction traditionnelle	100
5.39	Acidification - Émissions des constituants de la construction traditionnelle	100
5.40	Eutrophisation - Émissions des constituants de la construction traditionnelle	101
5.41	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la construction traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites	101

5.42	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la construction traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites	102
5.43	Acidification - Émissions des constituants de la construction traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites	102
5.44	Eutrophisation - Émissions des constituants de la construction traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites	102
5.45	Réchauffement climatique - Émissions de la construction traditionnelle en phase d'utilisation (50 ans)	103
5.46	Diminution de la couche d'ozone - Émissions de la construction traditionnelle en phase d'utilisation (50 ans)	103
5.47	Acidification - Émissions de la construction traditionnelle en phase d'utilisation (50 ans)	104
5.48	Eutrophisation - Émissions de la construction traditionnelle en phase d'utilisation (50 ans)	104
6.1	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison extérieure IsoHemp	107
6.2	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la cloison extérieure IsoHemp	107
6.3	Acidification - Émissions des constituants de la cloison extérieure IsoHemp	107
6.4	Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison extérieure IsoHemp	108
6.5	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison extérieure IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites	108
6.6	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la cloison extérieure IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites	109
6.7	Acidification - Émissions des constituants de la cloison extérieure IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites	109
6.8	Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison extérieure IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites	109
6.9	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison intérieure IsoHemp	110
6.10	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la cloison intérieure IsoHemp	110
6.11	Acidification - Émissions des constituants de la cloison intérieure IsoHemp	111
6.12	Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison intérieure IsoHemp	111
6.13	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison intérieure IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites	111

6.14	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la cloison intérieure IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites	112
6.15	Acidification - Émissions des constituants de la cloison intérieure IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites	112
6.16	Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison intérieure IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites	112
6.17	Réchauffement climatique - Émissions des constituants du plancher IsoHemp	113
6.18	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants du plancher IsoHemp	113
6.19	Acidification - Émissions des constituants du plancher IsoHemp	114
6.20	Eutrophisation - Émissions des constituants du plancher IsoHemp	114
6.21	Réchauffement climatique - Émissions des constituants du plancher IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites	114
6.22	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants du plancher IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites	115
6.23	Acidification - Émissions des constituants du plancher IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites	115
6.24	Eutrophisation - Émissions des constituants du plancher IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites	115
6.25	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la toiture IsoHemp	116
6.26	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la toiture IsoHemp	116
6.27	Acidification - Émissions des constituants de la toiture IsoHemp	117
6.28	Eutrophisation - Émissions des constituants de la toiture IsoHemp	117
6.29	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la toiture IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites	118
6.30	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la toiture IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites	118
6.31	Acidification - Émissions des constituants de la toiture IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites	118
6.32	Eutrophisation - Émissions des constituants de la toiture IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites	119
6.33	Réchauffement climatique - Émissions des parois de la construction IsoHemp	120
6.34	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des parois de la construction IsoHemp	120
6.35	Acidification - Émissions des parois de la construction IsoHemp	121
6.36	Eutrophisation - Émissions des parois de la construction IsoHemp	121

6.37	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la construction IsoHemp	122
6.38	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la construction IsoHemp	122
6.39	Acidification - Émissions des constituants de la construction IsoHemp	122
6.40	Eutrophisation - Émissions des constituants de la construction IsoHemp	123
6.41	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la construction IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites . . .	123
6.42	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la construction IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites	124
6.43	Acidification - Émissions des constituants de la construction IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites	124
6.44	Eutrophisation - Émissions des constituants de la construction IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites	124
6.45	Réchauffement climatique - Émissions de la construction IsoHemp en phase d'utilisation (50 ans)	125
6.46	Diminution de la couche d'ozone - Émissions de la construction IsoHemp en phase d'utilisation (50 ans)	125
6.47	Acidification - Émissions de la construction IsoHemp en phase d'utilisation (50 ans)	126
6.48	Eutrophisation - Émissions de la construction IsoHemp en phase d'utilisation (50 ans)	126
7.1	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison extérieure ArgiMob	129
7.2	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la cloison extérieure ArgiMob	129
7.3	Acidification - Émissions des constituants de la cloison extérieure ArgiMob	129
7.4	Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison extérieure ArgiMob	130
7.5	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison extérieure ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites	130
7.6	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la cloison extérieure ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites	131
7.7	Acidification - Émissions des constituants de la cloison extérieure ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites	131
7.8	Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison extérieure ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites	131
7.9	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison intérieure ArgiMob	132

7.10	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la cloison intérieure ArgiMob	132
7.11	Acidification - Émissions des constituants de la cloison intérieure ArgiMob	133
7.12	Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison intérieure ArgiMob	133
7.13	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison intérieure ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites	134
7.14	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la cloison intérieure ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites	134
7.15	Acidification - Émissions des constituants de la cloison intérieure ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites	135
7.16	Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison intérieure ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites	135
7.17	Réchauffement climatique - Émissions des constituants du plancher ArgiMob	136
7.18	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants du plancher ArgiMob	136
7.19	Acidification - Émissions des constituants du plancher ArgiMob	137
7.20	Eutrophisation - Émissions des constituants du plancher ArgiMob	137
7.21	Réchauffement climatique - Émissions des constituants du plancher ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites	137
7.22	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants du plancher ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites . . .	138
7.23	Acidification - Émissions des constituants du plancher ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites	138
7.24	Eutrophisation - Émissions des constituants du plancher ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites	138
7.25	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la toiture ArgiMob	139
7.26	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la toiture ArgiMob	139
7.27	Acidification - Émissions des constituants de la toiture ArgiMob	140
7.28	Eutrophisation - Émissions des constituants de la toiture ArgiMob	140
7.29	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la toiture ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites	141
7.30	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la toiture ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites . . .	141
7.31	Acidification - Émissions des constituants de la toiture ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites	142

7.32	Eutrophisation - Émissions des constituants de la toiture ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites	142
7.33	Réchauffement climatique - Émissions des parois de la construction ArgiMob	143
7.34	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des parois de la construction ArgiMob	143
7.35	Acidification - Émissions des parois de la construction ArgiMob	144
7.36	Eutrophisation - Émissions des parois de la construction ArgiMob	144
7.37	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la construction ArgiMob	145
7.38	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la construction ArgiMob	145
7.39	Acidification - Émissions des constituants de la construction ArgiMob	145
7.40	Eutrophisation - Émissions des constituants de la construction ArgiMob	146
7.41	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la construction ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites . . .	146
7.42	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la construction ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites	147
7.43	Acidification - Émissions des constituants de la construction ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites	147
7.44	Eutrophisation - Émissions des constituants de la construction ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites	147
7.45	Réchauffement climatique - Émissions de la construction ArgiMob en phase d'utilisation (50 ans)	148
7.46	Diminution de la couche d'ozone - Émissions de la construction ArgiMob en phase d'utilisation (50 ans)	148
7.47	Acidification - Émissions de la construction ArgiMob en phase d'utilisation (50 ans)	149
7.48	Eutrophisation - Émissions de la construction ArgiMob en phase d'utilisation (50 ans)	149
8.1	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison extérieure PailleTech	152
8.2	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la cloison extérieure PailleTech	152
8.3	Acidification - Émissions des constituants de la cloison extérieure PailleTech	152
8.4	Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison extérieure PailleTech	153
8.5	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison extérieure PailleTech - Quantités utilisées vs. produites	153

8.6	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la cloison extérieure PailleTech - Quantités utilisées vs. produites	154
8.7	Acidification - Émissions des constituants de la cloison extérieure PailleTech - Quantités utilisées vs. produites	154
8.8	Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison extérieure PailleTech - Quantités utilisées vs. produites	154
8.9	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison intérieure PailleTech	155
8.10	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la cloison intérieure PailleTech	155
8.11	Acidification - Émissions des constituants de la cloison intérieure PailleTech	156
8.12	Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison intérieure PailleTech	156
8.13	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison intérieure PailleTech - Quantités utilisées vs. produites	156
8.14	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la cloison intérieure PailleTech - Quantités utilisées vs. produites	157
8.15	Acidification - Émissions des constituants de la cloison intérieure PailleTech - Quantités utilisées vs. produites	157
8.16	Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison intérieure PailleTech - Quantités utilisées vs. produites	157
8.17	Réchauffement climatique - Émissions des constituants du plancher PailleTech	158
8.18	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants du plancher PailleTech	158
8.19	Acidification - Émissions des constituants du plancher PailleTech	159
8.20	Eutrophisation - Émissions des constituants du plancher PailleTech	159
8.21	Réchauffement climatique - Émissions des constituants du plancher PailleTech - Quantités utilisées vs. produites	159
8.22	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants du plancher PailleTech - Quantités utilisées vs. produites	160
8.23	Acidification - Émissions des constituants du plancher PailleTech - Quantités utilisées vs. produites	160
8.24	Eutrophisation - Émissions des constituants du plancher PailleTech - Quantités utilisées vs. produites	160
8.25	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la toiture PailleTech	161
8.26	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la toiture PailleTech	161

8.27	Acidification - Émissions des constituants de la toiture Paille-Tech	162
8.28	Eutrophisation - Émissions des constituants de la toiture Paille-Tech	162
8.29	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la toiture PailleTech - Quantités utilisées vs. produites	163
8.30	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la toiture PailleTech - Quantités utilisées vs. produites	163
8.31	Acidification - Émissions des constituants de la toiture Paille-Tech - Quantités utilisées vs. produites	164
8.32	Eutrophisation - Émissions des constituants de la toiture Paille-Tech - Quantités utilisées vs. produites	164
8.33	Réchauffement climatique - Émissions des parois de la construction PailleTech	165
8.34	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des parois de la construction PailleTech	165
8.35	Acidification - Émissions des parois de la construction Paille-Tech	166
8.36	Eutrophisation - Émissions des parois de la construction Paille-Tech	166
8.37	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la construction PailleTech	167
8.38	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la construction PailleTech	167
8.39	Acidification - Émissions des constituants de la construction PailleTech	167
8.40	Eutrophisation - Émissions des constituants de la construction PailleTech	168
8.41	Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la construction PailleTech - Quantités utilisées vs. produites	168
8.42	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la construction PailleTech - Quantités utilisées vs. produites	169
8.43	Acidification - Émissions des constituants de la construction PailleTech - Quantités utilisées vs. produites	169
8.44	Eutrophisation - Émissions des constituants de la construction PailleTech - Quantités utilisées vs. produites	169
8.45	Réchauffement climatique - Émissions de la construction Paille-Tech en phase d'utilisation (50 ans)	170
8.46	Diminution de la couche d'ozone - Émissions de la construction PailleTech en phase d'utilisation (50 ans)	170
8.47	Acidification - Émissions de la construction PailleTech en phase d'utilisation (50 ans)	171
8.48	Eutrophisation - Émissions de la construction PailleTech en phase d'utilisation (50 ans)	171

9.1	Réchauffement climatique - Émissions des différents types de construction	173
9.2	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des différents types de construction	174
9.3	Acidification - Émissions des différents types de construction	174
9.4	Eutrophisation - Émissions des différents types de construction	175
9.5	Réchauffement climatique - Émissions des cloisons extérieures des différents types de construction	176
9.6	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des cloisons extérieures des différents types de construction	177
9.7	Acidification - Émissions des cloisons extérieures des différents types de construction	177
9.8	Eutrophisation - Émissions des cloisons extérieures des différents types de construction	177
9.9	Réchauffement climatique - Émissions des cloisons intérieures des différents types de construction	179
9.10	Diminution de la couche d'ozone - Émissions des cloisons intérieures des différents types de construction	179
9.11	Acidification - Émissions des cloisons intérieures des différents types de construction	180
9.12	Eutrophisation - Émissions des cloisons intérieures des différents types de construction	180
9.13	Réchauffement climatique - Émissions du plancher des différents types de construction	181
9.14	Diminution de la couche d'ozone - Émissions du plancher des différents types de construction	182
9.15	Acidification - Émissions du plancher des différents types de construction	182
9.16	Eutrophisation - Émissions du plancher des différents types de construction	182
9.17	Réchauffement climatique - Émissions de la toiture des différents types de construction	183
9.18	Diminution de la couche d'ozone - Émissions de la toiture des différents types de construction	184
9.19	Acidification - Émissions de la toiture des différents types de construction	184
9.20	Eutrophisation - Émissions de la toiture des différents types de construction	185
12.1	Flowsheet de l'analyse du cycle de vie reçu lors de l'interview IsoHemp	246
12.2	Composition de parois passives Isohemp	250
12.3	Caractéristiques techniques des bloc de béton de chanvre . . .	254
12.4	Argilière située en face de la briqueterie	273

12.5	Centre de recyclage à l'arrière de la briqueterie	274
12.6	Broyage de la terre par les meules	275
12.7	Moules permettant de donner sa forme à l'argile	276
12.8	Coupe au fil	277
12.9	Ascenseur permettant de transporter les lattes métalliques vers le séchoir	279
12.10	Lattes métalliques sur lesquelles sont posés des galets d'argile, dans un séchoir	280
12.11	Production des composants d'enduit	281
12.12	Blocs d'argile arrivant par paquet	282
12.13	Poussoir jaune	282
12.14	Palettes de blocs d'argile	283
12.15	Mortier	285
12.16	Enduits de finition colorés	286
12.17	Mur combinaison de blocs d'argile et de blocs IsoHemp	287
12.18	Production des galets d'argile utilisé par Mobic dans le sys- tème ArgiMob	305
12.19	Libramont Exhibition Congress (Martin, 2015)	322

Liste des tableaux

4.1	Composition et caractéristiques de la paroi PailleTech	72
4.2	Composition et caractéristiques de la paroi traditionnelle . . .	74
4.3	Composition et caractéristiques de la paroi ArgiMob	76
4.4	Composition et caractéristiques de la paroi IsoHemp	78
9.1	Comparaison entre les émissions de dioxyde de carbone des habitations et leur coût	175
9.2	Comparaison entre les émissions de dioxyde de carbone des cloisons extérieures et leur coût	178
9.3	Comparaison entre les émissions de dioxyde de carbone des cloisons intérieures et leur coût	181
9.4	Comparaison entre les émissions de dioxyde de carbone des planchers et leur coût	183
9.5	Comparaison entre les émissions de dioxyde de carbone des toitures et leur coût	185

1

Introduction

De nos jours, plus personne n'ignore la problématique du réchauffement climatique. Nous pouvons tous percevoir ses effets : impacts sur le climat, la faune et la flore, l'agriculture, la santé mais aussi l'économie. Ainsi, de plus en plus de personnes prennent conscience qu'il serait bon de revoir le mode de fonctionnement de notre société, notamment en mettant fin au gaspillage, à la surconsommation et aux transports inutiles. (Simonen, K. 2014)

Le changement climatique est un de ses effets les plus visibles. Le climat de la Terre a toujours varié. Ainsi, il y a des millions d'années, les dinosaures vivaient sur notre planète dans un environnement tropical. Quelques milliers d'années plus tard, le même paysage se couvre de glace. Ces deux faits sont des exemples parmi d'autres qui prouvent que le changement climatique n'est pas un phénomène nouveau, loin de là. En dépit des variations de températures, notre climat a toujours eu tendance à être relativement chaud, la période glaciaire restant la seule exception. Cependant, les changements auxquels nous devons faire face actuellement ne peuvent pas être considérés comme une modification naturelle et usuelle de part leur vitesse et leur échelle. (Université de Valenciennes. 2012)

La Terre est enveloppée par une couche de gaz, l'atmosphère. Sans elle, la vie sur notre planète serait impossible. En effet, celle-ci nous fournit notamment l'oxygène que nous respirons et le dioxyde de carbone dont les plantes ont besoin pour grandir, se développer. Les gaz à effets de serre sont naturellement présents dans l'atmosphère et sont aussi importants que l'oxygène pour que nous puissions vivre. En effet, ils assurent l'effet de serre naturel qui est responsable des températures dans le monde. Sans eux, notre planète serait bien trop froide pour que nous puissions y vivre. (AWAC. 2014)

Les changements auxquels nous devons faire face actuellement sont principalement dus aux émissions de gaz à effets de serre provenant des activités

de l'Homme. L'augmentation de leur concentration dans l'atmosphère (en particulier le dioxyde de carbone) entraîne un accroissement de l'effet de serre naturel, provoquant cette élévation de température à la surface de la Terre et donc le phénomène de changement climatique. (AWAC. 2014)

La construction est un des secteurs les plus incriminés de part sa consommation d'énergie fossile, par exemple pour chauffer une maison, produire de l'énergie ou encore utiliser un véhicule (phénomène croissant avec l'étalement urbain). Tout cela n'est bien évidemment pas sans conséquences (Chou, J.-S. & Yeh, K.-C. 2015) :

- Augmentation de la température ;
- Désertification ;
- Augmentation du niveau de la mer ;
- Fonte des glaciers ;
- Désordre climatique au niveau des saisons ;
- Augmentation de la fréquence des phénomènes climatiques extrêmes ;
- Risques pour la santé.

Nous pouvons également mettre en évidence le sérieux impact du secteur de la construction sur l'environnement à travers ces quelques chiffres (Reiter, S. 2010 ; Singh, A. et al. 2011 ; Sathre, R. & Gonzalez-Garcia, S. 2014, Ingrao, C. et al. 2016) :

- Consommation de 40 à 50 % des ressources naturelles sous forme de matériaux ;
- Utilisation et consommation de près de 40 % de la totalité de l'énergie utilisée dans le monde ;
- Production de près de 40 % du CO₂ rejeté dans l'atmosphère ;
- Production de près de 50 % de tous les déchets produits dans le monde.

Plus précisément, en Wallonie, nous pouvons constater que le secteur résidentiel est responsable de 16 % de l'ensemble des émissions de gaz à effets de serre produits et ce, sans tenir compte des transports et de la production d'énergie ni même de la production des matériaux de construction (Figure 1.1). (AWAC, 2014)

Il convient donc de réaliser que nous vivons dans un monde limité et qu'il est temps de modifier notre manière de vivre, de construire et de consommer afin de ne pas accroître davantage les phénomènes dont nous sommes à l'origine mais aussi de faire face aux conséquences de nos actes.

En tant que future Ingénieur civil Architecte, cette problématique me touche tout particulièrement. En effet, ma génération a le pouvoir de changer les choses par l'innovation, innovation pour laquelle les divers acteurs de l'architecture, de l'ingénierie ainsi que de l'environnement doivent travailler

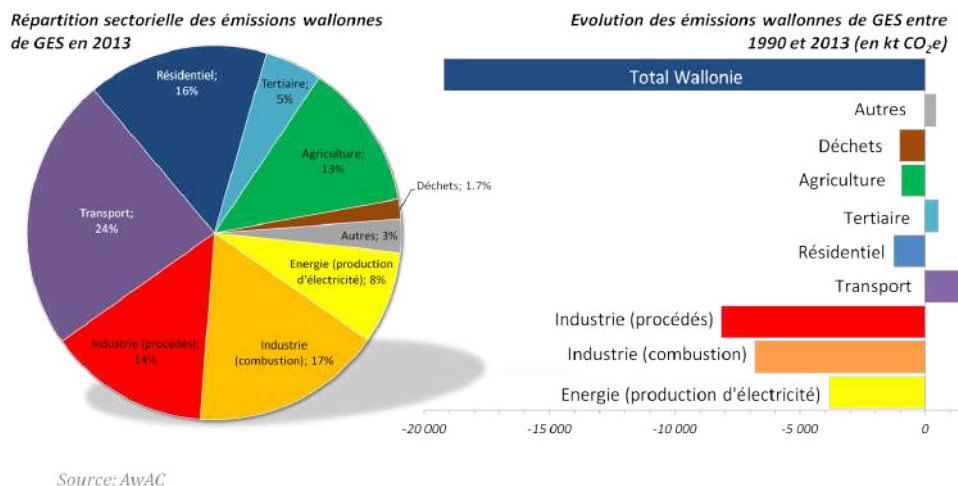


FIGURE 1.1 – Émissions de gaz à effets de serre en Wallonie (2013) (AWAC. 2014)

main dans la main. La question du respect et de la sauvegarde de l'environnement ne doit plus être une réflexion tardive fournissant des solutions qui viennent s'ajouter une fois la conception, voire pire la construction, terminée. Il convient à présent de penser à des solutions durables, et ce dès la conception, mais aussi de favoriser les réunions interdisciplinaires afin que tous les aspects de la construction (conception, matériaux et divers systèmes mis en place) soient pris en compte, réfléchis et adaptés à la volonté du client tout en intégrant les notions de confort, d'économie et d'écologie.

Le développement durable est un concept de plus en plus présent et utilisé de nos jours. Son objectif est d'assurer un développement qui puisse répondre à nos besoins actuels, dans le présent, sans pour autant empêcher les générations à venir d'assurer les leurs. Malheureusement, le concept de développement durable n'est pas toujours correctement mis en œuvre et nous pouvons observer notamment que certaines sociétés s'en servent comme stratégie, vecteur de publicité, afin de se placer en tant que leader dans le jeu de la concurrence. (Université de Valenciennes. 2012) Nous pouvons résumer ses grands principes par le biais de la Figure 1.2.

En ce qui concerne le futur de la construction, nous pouvons observer des changements depuis quelques années, notamment grâce à l'implication politique. Qu'elle soit mondiale ou régionale, la réglementation a un véritable effet levier. (Pantoine, M.-F. 2014)

Ainsi, la Région Wallonne s'est engagée, dans le cadre du protocole de Kyoto, pour la période de 2013 à 2020, à réduire ses émissions de gaz à

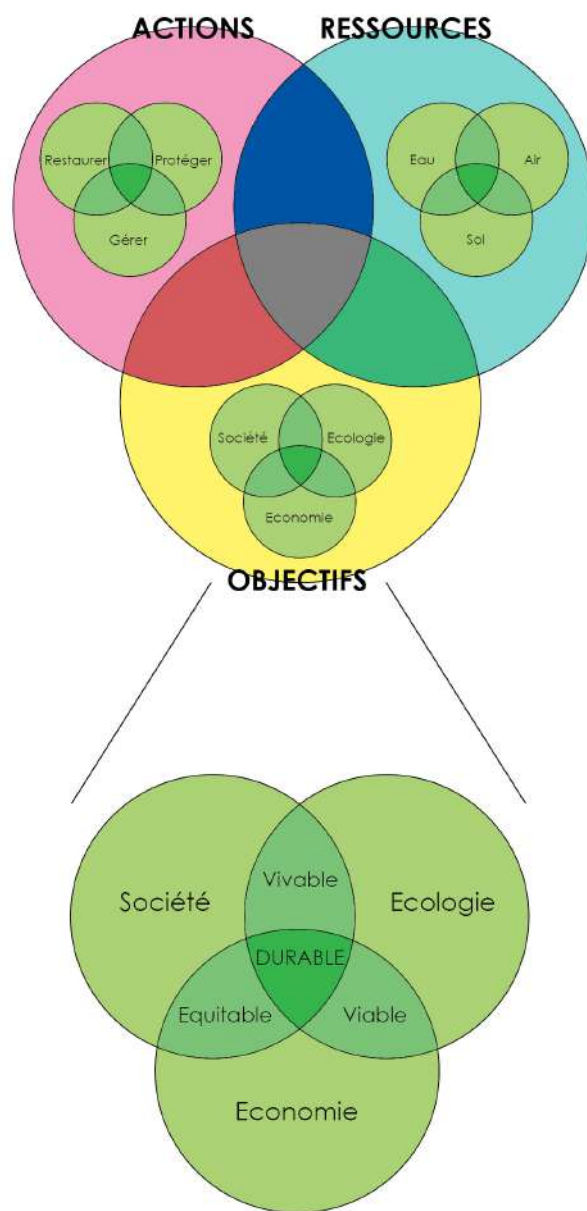


FIGURE 1.2 – Développement durable - concept (Delvenne, F. 2016)

effets de serre de 14.7 % par rapport à 2005 d'ici à 2020. (AWAC. 2014) De plus, via la réglementation PEB, l'objectif de la Région Wallonne est d'assurer que toute nouvelle construction dès 2020 possède une consommation quasi nulle via la diminution du coefficient K (niveau d'isolation thermique), le renforcement des coefficients de transmission thermique des parois mais aussi la diminution des consommations d'énergie pour le chauffage et d'éner-

gie primaire. (Confédération construction. 2014)

En 1972, René Dubos a dit lors d'un sommet sur l'environnement que nous devons agir local et penser global. Cette réflexion est à la base du choix de mon mémoire intitulé « Analyse du cycle de vie et coûts du cycle de vie de matériaux régénératifs : Analyse comparative dans le secteur résidentiel belge ». Dans le cadre de ce travail de fin d'études, je souhaite donc réaliser une étude du cycle de vie (impacts des constructions sur l'environnement) et des coûts du cycle de vie (impacts sur le portefeuille du candidat bâtisseur depuis la fabrication des matériaux jusqu'à l'utilisation et la fin de vie du bâtiment). La question principale à laquelle je vais tenter de répondre est donc la suivante : « Est-il possible, en Belgique, de construire différemment de la manière traditionnelle, tout en étant plus durable ? »

Pour répondre à cette question, je souhaite analyser quatre cas d'étude atteignant les performances des maisons passives. Parmi ceux-ci, on retrouve le cas d'une construction traditionnelle belge (blocs de béton - revêtement en brique). Les trois autres cas sont des constructions réalisées avec des matériaux régénératifs : paille, argile et chanvre, tous associés à une ossature bois. De plus, je souhaite rester autant que faire se peut dans un contexte belge et réaliste, ce qui implique des matériaux produits en Belgique ainsi que le savoir-faire d'entreprises, belges elles-aussi. Cela me permettrait donc de valoriser les produits et l'innovation de notre pays ainsi que de mettre en avant des entreprises locales.

Ce travail se compose de trois parties principales : une partie théorique, une pratique et enfin une dernière répondant aux objectifs du travail.

La partie théorique est donc l'état de l'art de ce travail dont elle constitue les bases, la fondation. Celle-ci me permet d'introduire des concepts utiles à mon étude tels que l'analyse du cycle de vie et le coût du cycle de vie.

La partie pratique intègre la méthodologie mise en place, la présentation des cas d'étude, les analyses en tant que telles et la présentation des résultats pour chaque type de construction mise en œuvre.

Enfin, la dernière partie me permet de répondre à l'objectif fixé soit de réaliser l'analyse comparative des quatre cas d'étude sélectionnés.

En ce qui concerne la méthodologie de ce travail, elle est réalisée grâce au programme WISBA 2015 auquel j'ai eu la chance de participer.

WISBA (WIenerberger Sustainable Building Academy) est un programme éducatif international qui rassemble des étudiants originaires d'Autriche,

Belgique, Hongrie, Italie, Pologne et Suisse (quatre étudiants pour chaque pays). Tous les participants étudient actuellement afin de devenir architecte, ingénieur civil ou ingénieur de l'environnement. Le programme consiste en une série de conférences et de workshop mais aussi en un projet de recherche au sujet des bâtiments durables. Il s'est donc avéré être une très bonne opportunité d'augmenter mes connaissances scientifiques dans le domaine de la construction durable tout en m'apportant une expérience pratique.

Cette année, le projet WISBA avait pour but de conceptualiser une construction dite « low-tech » afin qu'elle rencontre les critères des bâtiments durables dans divers scénarios futurs pertinents. C'est le concept du bâtiment de bureaux 2226 de l'architecte Eberle Baumschlager qui a été choisi comme cas d'étude grâce à son innovation (Figure 1.3). Il s'agit d'un bâtiment à plusieurs étages, situé à Vorarlberg (Autriche) qui, entre autre, possède les caractéristiques suivantes :

- Bâtiment très basse énergie ;
- Murs composés d'une double couche de briques d'argile ;
- Pas d'isolation additionnelle (excepté au niveau de la toiture et du sol) ;
- Pas de système de chauffage ou de conditionnement d'air.



FIGURE 1.3 – Bâtiment de bureaux 2226 - Eberle Baumschlager (Wienerberger. 2016)

Le but était donc d'estimer à quel point le concept est solide à travers différents scénarios futurs de changement climatique et de changement de fonctions :

- Analyse de la performance énergétique ;
- Analyse du cycle de vie ;
- Analyse du cycle des coûts ;
- Analyse du cycle de vie de la conception et du confort.

Il s'agit d'une expérience unique qui m'a apporté de nombreuses connaissances que je n'aurai pu trouver dans des livres et une méthodologie à la fois cohérente et fonctionnelle sur le sujet que je traite dans le cadre de ce travail.

2

État de l'art - Concepts et principes

Dans cette partie du travail, j'introduis les concepts essentiels à l'étude réalisée. Seront donc explicités le cycle de vie, l'analyse du cycle de vie, le coût du cycle de vie et le concept de maison passive.

Cet état de l'art se veut synthétique tout en restant complet. Il s'est en effet avéré être, pour moi, une ligne directrice indispensable tout au long de ce projet de part mon expérience limitée dans ce domaine.

Il ne comprend cependant pas de résumé d'études identiques ou même de référence à une étude identique, tout simplement parce que cette vision de l'architecture et de la construction est relativement nouvelle et encore très peu appliquée. Lors de mes recherches, les principaux travaux que j'ai trouvés appliquent l'analyse du cycle de vie à un matériaux en particulier ou à des cas de rénovations etc. Peu d'articles abordent le sujet des analyses du cycle de vie de l'ensemble d'un bâtiment ou d'une de ses parois. Ils sont d'ailleurs relativement brefs et peu précis. En effet, on n'y retrouve en aucun cas les données employées, le degré de précision de l'étude ou encore les hypothèses émises par l'auteur. Il est donc difficile de comparer les résultats de mon étude avec ceux d'une autre étude, sans connaître ces détails.

2.1 Cycle de vie

La notion de cycle de vie peut avoir diverses significations en fonction du contexte dans lequel elle est employée.

Dans le domaine de la construction, le cycle de vie est l'ensemble des phases par lesquelles passent un ensemble de matériaux ou produits tout au long de la vie du bâtiment. On retrouve donc cinq grandes étapes (Figure 2.1) (Ratna Reddy, V. et al. 2015 & Hoyet, N. 2013) :

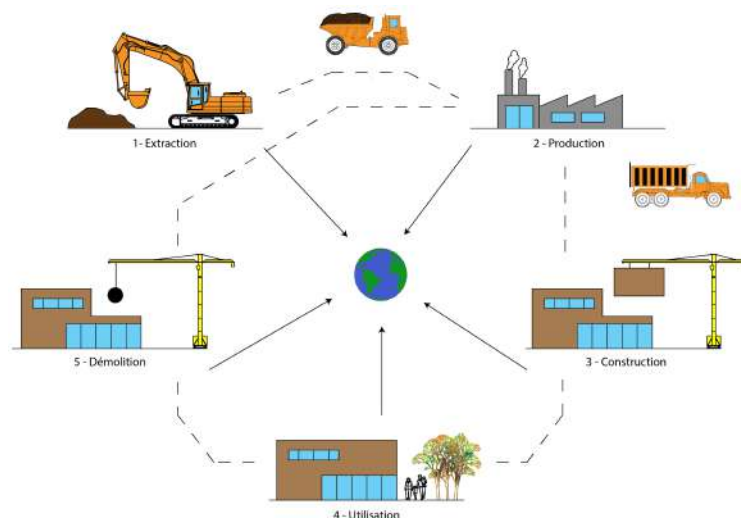


FIGURE 2.1 – Cycle de vie - schéma (Delvenne F. 2016)

1. Extraction (acquisition des ressources et matières premières) ;
2. Production (fabrication en usine, traitement et transport depuis le site d'extraction) ;
3. Construction (mise en œuvre et transport jusqu'au chantier) ;
4. Utilisation (consommation d'eau et d'énergie, maintenance, réparation, remplacement et nettoyage) ;
5. Fin de vie (démolition ou démontage puis recyclage, réutilisation ou traitement final).

Je considère, dans le cadre de ce travail, une utilisation de 50 ans, qui est la durée moyenne de vie estimée d'un bâtiment en Belgique avant qu'il ne nécessite une rénovation lourde. De plus, la dernière étape, c'est-à-dire la fin de vie, n'est ici pas prise en compte car elle est bien trop incertaine et, puisqu'elle se produit dans le futur, les technologies nous sont peut être encore inconnues au vu de la vitesse à laquelle notre monde évolue.

2.2 Analyse du cycle de vie

2.2.1 Définition

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode permettant de mesurer et évaluer les impacts environnementaux associés à un produit, un système ou une activité en décrivant et analysant l'énergie et les matériaux utilisés et rejetés dans l'environnement tout au long du cycle de vie (Figure 2.2). (Allacker, K. 2010, & European Commission. 2010)

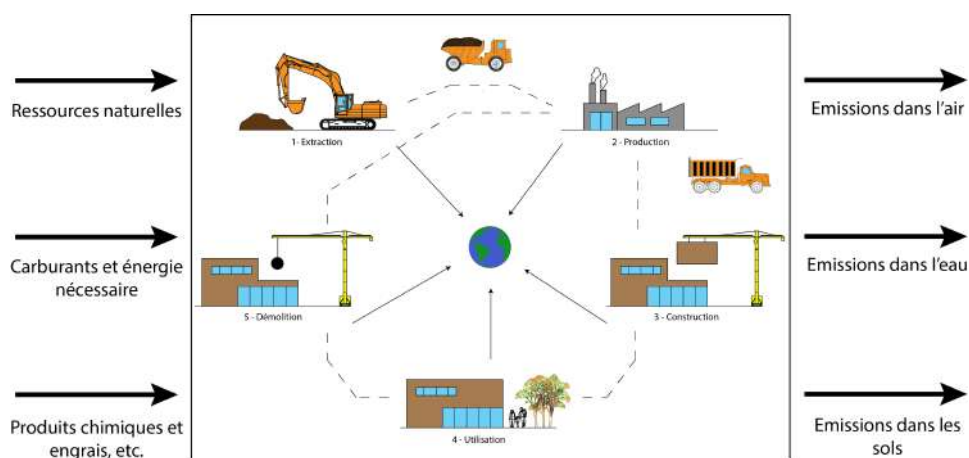


FIGURE 2.2 – Analyse du cycle de vie (Delvenne F. 2016)

L'objectif d'une telle analyse est donc de quantifier l'ensemble des ressources consommées et des émissions pertinentes afin de mettre en évidence les impacts environnementaux qui en résultent. Un impact environnemental est considéré ici comme l'impact potentiel sur l'environnement naturel, la santé humaine et l'épuisement des ressources naturelles causé par des interventions humaines telles que les émissions, les extractions de ressources ou encore l'utilisation des sols. (Simonen, K. 2014)

Ainsi, ce travail me permet à la fois de comparer les quatre cas d'étude (maison traditionnelle - en paille - en argile - en béton de chanvre) entre eux mais également de déterminer quels sont les éléments de chacune des parois ayant les impacts les plus importants.

2.2.2 Fonctionnement

Une analyse du cycle de vie est un processus itératif de calculs réglementé dont chaque étape est définie précisément par des normes (ISO 14040). Il convient de respecter chacune des quatre étapes principales mentionnées dans la Figure 2.3. Chacune d'entre elles est détaillée dans la suite de ce chapitre. (Buyle, M. et al. 2013)

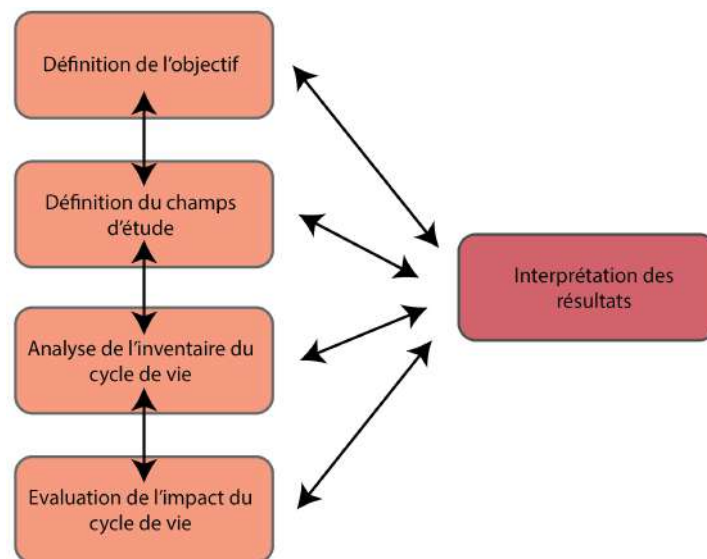


FIGURE 2.3 – Principe du fonctionnement d'une analyse du cycle de vie (Delvenne F. 2016)

2.2.2.1 Définition de l'objectif

La définition de l'objectif est donc la première étape d'une analyse du cycle de vie. Elle consiste principalement en l'identification des objectifs poursuivis et du public ciblé par l'étude. C'est donc une étape décisive pour toutes les autres étapes de la procédure d'analyse du cycle de vie puisqu'elle va définir jusqu'à quel niveau de détails l'analyse doit être menée, permettre un contrôle de qualité ou encore déterminer le type de résultats à atteindre. Six aspects sont à prendre en considération (Menet, J.-L. & Gruescu, I.-C. 2014 ; Buyle, M et al. 2013) :

- L'application envisagée pour les résultats : Elle peut être unique ou multiple, éventuellement combinée avec des informations économiques, sociales ou complémentaires, mais doit être décrite de manière précise et non ambiguë. Le but est de déterminer l'approche méthodologique à employer pour mener l'analyse.

- Les limitations dues à la méthode, aux hypothèses et à la couverture d’impact : Elles sont généralement ajustées au cours de l’étude et peuvent parfois limiter l’utilisation future des résultats et leur représentativité.
- Les raisons de mener l’étude et le contexte de décision : Il convient d’identifier le contexte de décision car c’est un des critères qui permettent de déterminer la méthodologie la plus appropriée. Les raisons déterminent quant à elles la qualité et le niveau de détails à atteindre.
- L’audience ciblée : Connaître le type de public auquel sont soumis les résultats de l’étude permet d’identifier les critères les plus importants mais aussi d’adapter la forme et le niveau technique de la présentation des résultats.
- Une éventuelle étude comparative divulguée au grand public : Ce genre d’objectif doit être pensé dès le départ de l’analyse afin d’être certain que la comparaison soit possible et plausible.
- Les acteurs de l’étude : Il s’agit du ou des demandeurs de l’étude. Il convient donc qu’il(s) n’influe(nt) pas sur les résultats obtenus.

2.2.2.2 Définition du champs d’étude

Durant cette phase, l’objet de l’étude est identifié et défini en détails. Est alors extrait tout ce qui est requis en rapport avec la méthodologie, la qualité, le compte-rendu et la revue en prenant bien évidemment en compte ce qui a été posé à l’étape précédente. C’est donc ainsi qu’on constate notamment qu’une analyse du cycle de vie est un processus itératif puisqu’une modification au sein d’une des étapes principales entraîne des modifications dans chacune des autres grandes étapes. C’est lors de cette phase que sont définis les éléments suivants (Pretot, S. et al. 2013 ; Reiter, S. 2010) :

- Le type de livrables ;
- Le système du processus étudié ;
- La fonction du système (spécifications quantitatives et qualitatives de l’objet de l’étude) ;
- L’unité fonctionnelle du système (unité(s) permettant de nommer et quantifier les aspects quantitatifs et qualitatifs de la fonction définie) ;
- Les flux de référence du système (flux d’entrée et de sortie exprimés en fonction des unités fonctionnelles) ;
- Les frontières du système ;
- Le type d’impacts à couvrir ;
- Le type, la qualité et l’origine des données ;
- Les éléments nécessaires pour une éventuelle comparaison.

La fonction, l'unité fonctionnelle et les flux de référence sont des données indispensables et doivent être correctement réfléchis car ils permettent d'assurer une comparaison valide et sensée. Il convient également de porter une attention particulière à la cohérence des méthodes, hypothèses et données ainsi qu'à la reproductibilité de l'étude. (Bueno, C. et al. 2015)

2.2.2.3 Analyse de l'inventaire du cycle de vie

Il s'agit d'identifier les processus impliqués dans le système étudié et donc de dresser un bilan des flux d'entrée et de sortie. Il convient donc de porter une attention particulière à la qualité des données. (Russell-Smith, S. & Lepech, M. 2015)

On retrouve essentiellement deux types de méthode d'inventaire : attributionnelle et conséquentielle. La méthode attributionnelle est une approche descriptive sur le processus actuel ou sur un processus prédit, sur base de données spécifiques ou moyennes (simplification justifiée par un manque d'informations par exemple), qui considère un contexte statique. La méthode conséquentielle quant à elle est une approche théorique, utilisant une base de données génériques, mais qui considère un contexte dynamique. (Allacker, K. 2010)

En cas de multifonctionnalité du système étudié (c'est-à-dire un processus à l'origine d'un ou plusieurs produits), il existe trois options (European Commission. 2010) :

- La subdivision : individualiser le processus sur lequel se porte notre attention (uniquement en cas de processus subdivisible) (Figure 2.4) ;

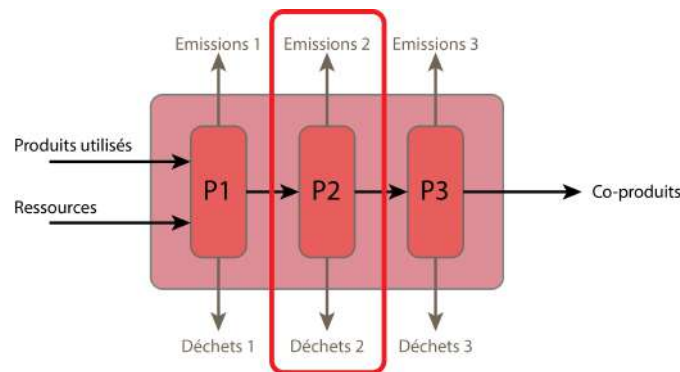


FIGURE 2.4 – Principe de la subdivision (Delvenne F. 2016)

- L'expansion/substitution du système : ajouter ou retirer une fonction afin de rendre les systèmes comparables (Figure 2.5) ;

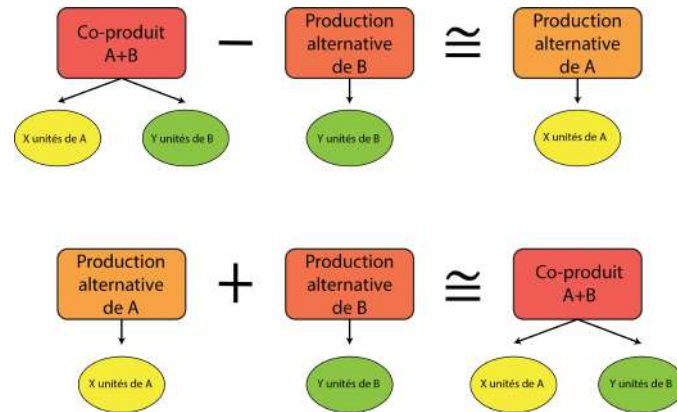


FIGURE 2.5 – Principe de l'expansion/substitution (Delvenne F. 2016)

- La distribution : partitionner les entrées et sorties entre les co-produits selon divers critères (éléments contenus, énergie contenue, masse, prix sur le marché etc.) (Figure 2.6).

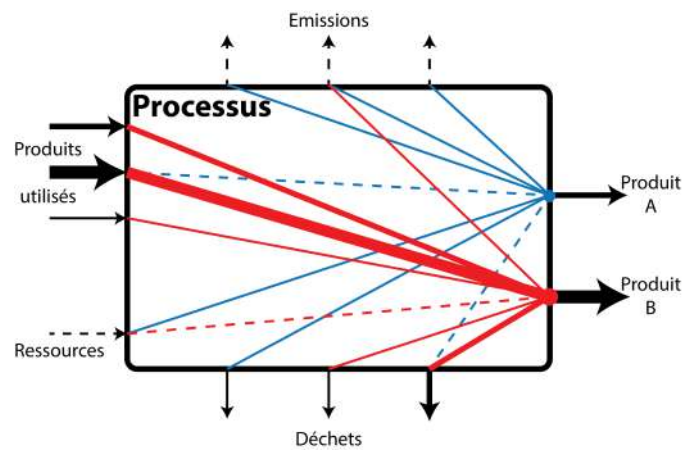


FIGURE 2.6 – Principe de la distribution (Delvenne F. 2016)

2.2.2.4 Évaluation de l'impact du cycle de vie

L'analyse du cycle de vie en tant que telle sert donc à agréger les données de l'inventaire afin d'en fournir une évaluation. Il convient donc pour cela de choisir une méthode d'évaluation.

On retrouve donc des méthodes d'évaluation orientées problèmes, qui modélisent la situation comme une chaîne de causes à effets, et des méthodes orientées dommages, qui poussent cette chaîne jusqu'au point final pour fournir en tant que résultat les torts subis par l'Homme et l'écosystème. (Monteiro, H & Freire, F. 2011)

Au sein de ce travail, j'ai choisi d'appliquer la première méthode d'évaluation, soit celle orientée problèmes, car il s'agit d'une évaluation transparente et comprenant moins d'incertitudes.

Pour être exacte, la méthode mise en œuvre (sélectionnée sur les conseils de Madame Belboom S.) est intitulée *Recipe Midpoint (H)*. *Recipe* est la méthode la plus complète et la plus récemment mise à jour. Le terme *Midpoint* signifie donc qu'il s'agit d'une méthode orientée problèmes. Les résultats sont donc exprimés sous forme d'impacts, transformés en équivalent d'un polluant.

Les catégories d'impact sont présentées ci-dessous ainsi que dans la Figure 2.7. (Pantoine, M.-F. 2014) Seules celles indiquées en gras sont analysées dans le cadre de ce travail. Elle me semble être les plus représentatives, notamment car elles sont toutes reprises comme critère dans les fiches EPD. Ce choix reste cependant subjectif.

- **Changement climatique** [kilogrammes de CO₂ équivalents] : Cela inclut les impacts du réchauffement climatique, l'augmentation moyenne globale de la température à la surface de la terre mais aussi les changements climatiques significatifs comme les précipitations ou le vent, à travers le temps ;
- **Diminution de la couche d'ozone** [kilogrammes de CFC-11 équivalents] : Cet impact exprime la diminution d'efficacité de la protection contre les rayons solaires - UVB - qui est à l'origine notamment de cancers de la peau, de problèmes oculaires, de la réduction de planctons, etc ;

- **Acidification** [kilogrammes de SO₂ équivalents] : Il s'agit d'un processus de modification de l'équilibre du pH de l'eau et du sol. Cela donne lieu à des substances plus acides ou basiques. Ce changement entraîne une baisse de productivité du sol. Il peut être à l'origine d'une diminution de la santé des plantes et des animaux, mais aussi de problèmes pour l'ensemble de la chaîne alimentaire, incluant dès lors l'Homme ;
- **Eutrophisation** [kilogrammes de N équivalents] : Il s'agit d'un excès d'activités biologiques de part l'addition de certains nutriments. Ainsi, les nouvelles plantes qui grandissent en excès consomment trop d'oxygène, privant dès lors d'autres espèces. Cela crée des zones mortes faute d'oxygène ;
- Smog hivernal (pollution de l'air par la présence de composants chimiques tel que le dioxyde de soufre) et particules inorganiques dans l'air ;
- Émissions toxiques ;
- Radiations ;
- Éléments cancérogènes ;
- Écotoxicité ;
- Smog estival ;
- Utilisation des sols ;
- Diminution des ressources.

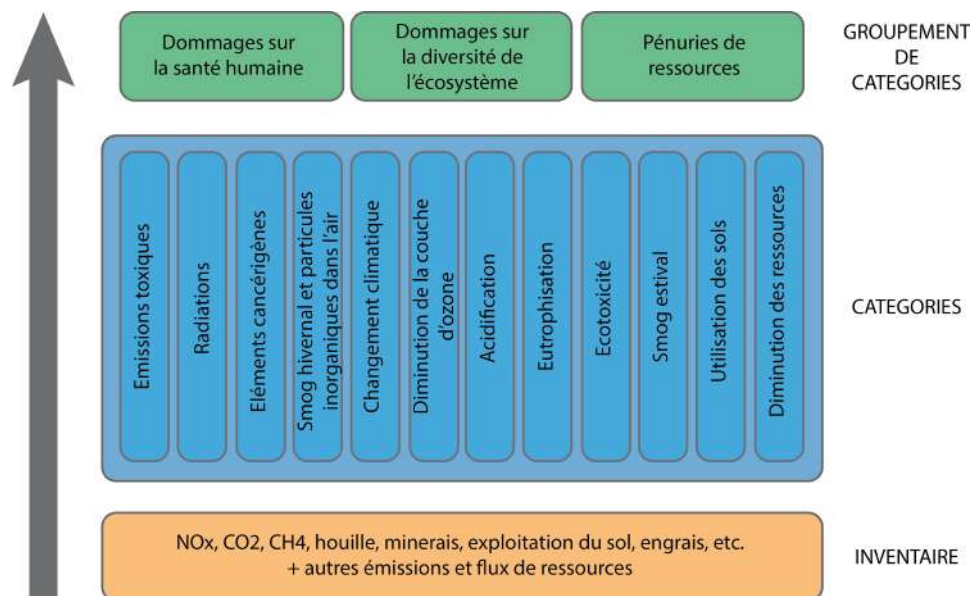


FIGURE 2.7 – Evaluation de l'impact du cycle de vie (Delvenne F. 2016)

Chaque résultat de l'inventaire du cycle de vie est affecté à une catégorie d'impact. C'est l'étape de classification. On effectue alors une caractérisation : les différents polluants d'une même catégorie d'impact sont exprimés en équivalent d'un même polluant grâce à des facteurs caractéristiques de pondération.

Survienent alors trois étapes facultatives :

- La normalisation : exprimer les résultats par rapport à une référence ;
- le groupement : rassembler les catégories en catégories principales ;
- la pondération : obtenir un chiffre unique pour représenter l'impact du processus.

La pondération est une action subjective et interdite par les normes en cas de comparaison diffusée pour le grand public car elle est peu représentative de la réalité et basée sur des choix de valeurs puisque le producteur de l'étude choisit le pourcentage d'importance de chaque catégorie principale. (Azari, R. 2014)

Ces trois étapes facultatives ne seront pas mises en œuvre dans le cadre de ce travail ; la normalisation et le groupement de part le temps limité qui m'est attribué et la pondération afin de rester aussi objective que faire se peut.

Il est alors possible de commencer l'interprétation.

2.3 Coût du cycle de vie

2.3.1 Définition

Le coût du cycle de vie (CCV) est une méthode permettant l'évaluation comparative des coûts, sur une période de temps spécifique, en prenant en compte tous les facteurs économiques pertinents, que ce soit en termes de coûts initiaux ou de coûts opérationnels à venir. (ISO. 2008 ; Sterner, E. 2000 & West, S. 2011)

L'objectif d'une telle analyse est donc d'optimiser les performances de produits ou systèmes ainsi que leurs coûts tout au long du cycle de vie, dans l'intérêt du propriétaire. Cette méthode est depuis peu positionnée dans un contexte environnemental, généralement en parallèle d'une analyse du cycle de vie comme c'est le cas dans cette étude. Mais, son utilisation reste tout de même limitée. (Baumann, H. & Gluch, P. 2004 ; Ratna Reddy, V. et al. 2015)

Cette « vue compréhensive » des coûts lors des différentes phases du cycle de vie d'un projet de construction peut permettre au propriétaire de réduire certains coûts qui surviennent généralement au cours de la phase d'utilisation, même si cela signifie augmenter quelques coûts préalables. (Kara, S. 2014)

Les résultats de ce type d'étude restent tout de même incertains puisqu'il faut faire face à un manque important de bases de données (rares sont celles qui existent et encore plus celles fréquemment mises à jour) et de prévisions futures (durée exacte réelle du cycle de vie, évolution des prix au fil des ans, maintenances planifiées ou non, etc.). Les aléas de la vie (prix, accidents, etc. autant d'inconnues dans cette « équation de prédiction ») rendent l'étude incertaine. Il convient donc de garder cela à l'esprit lors de la lecture de ce travail. (Ratna Reddy, V. 2015 & West, S 2011)

2.3.2 Fonctionnement

Le coût du cycle de vie (CCV) doit couvrir une liste de prix définie, tout au long de la période analysée du cycle de vie du système. Une telle étude ne couvre pas des coûts tels que les taxes, les remises éventuelles accordées par le gouvernement etc. Ceux-ci sont couverts par ce qu'on appelle le coût total de vie, au sein duquel le coût du cycle de vie est intégré comme le montre la Figure 2.8 (Allacker, K. 2010) :

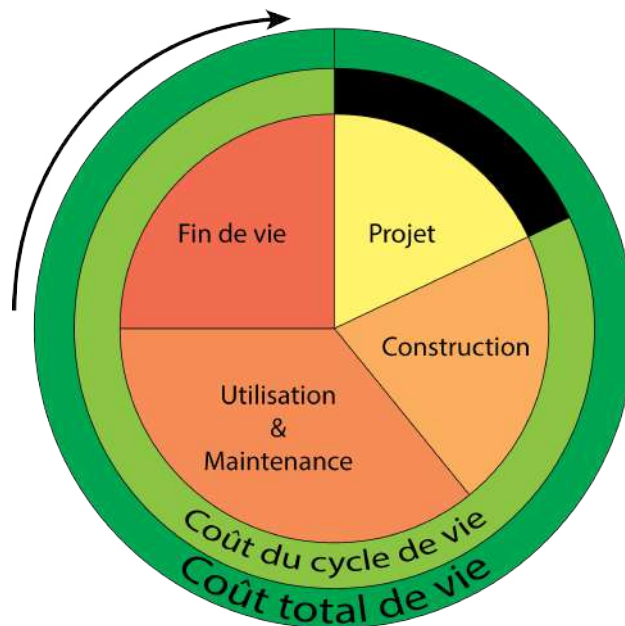


FIGURE 2.8 – Concept de coût du cycle de vie (Delvenne F. 2016)

Ainsi, le coût du cycle de vie prend en compte les frais suivants (Antohie, E. 2010) :

- Les coûts de construction : investissement effectué, soit l’acquisition des éléments et leur installation (ce sont les prix les plus sûrs de l’étude puisqu’ils correspondent au temps présent) ;
- Les coûts d’utilisation : coûts de l’énergie essentiellement ;
- Les coûts de maintenance : coûts de maintenance préventive, coûts de maintenance corrective (réparations) et coûts du nettoyage ;
- Les coûts de fin de vie : coûts de remplacement des éléments arrivés en fin de vie et coûts de traitement du bâtiment une fois qu’il est démonté ou démolé.

A chaque coût mentionné dans l’étude doit être associé un profil de son évolution au cours du temps. Les valeurs prédites se doivent d’être aussi précises que possible. Elles peuvent être obtenues par une estimation directe, par le biais d’une analyse de données historiques ou encore grâce à des modèles basés sur les performances attendues/moyennes. (Wilkins, C. et al. 2015)

Dans le cadre du coût du cycle de vie, toutes les valeurs futures sont recalculées en valeurs actuelles (transformation à l'aide d'un facteur d'actualisation) afin de déterminer la somme d'argent qu'il est nécessaire de posséder au commencement du projet. Cette dernière doit couvrir l'ensemble des coûts qui vont survenir au fil des ans avec autant de réalisme que possible. (Kara, S. 2014)

Dans une telle étude, il convient toujours de décider comment présenter les coûts : soit grâce à leur valeur nominale, soit grâce à leur valeur réelle. Les concepts qui y sont liés sont explicités ci dessous. (Allacker, K. 2010 ; ISO. 2008)

Le coût nominal est le coût attendu qu'il convient de payer quand une somme d'argent est due, incluant les changements estimés de prix par prédiction - dus à une modification d'efficacité ou une évolution des technologies.

Le coût réel est la somme d'argent, à la date de paiement, incluant les changements de prix provenant des prédictions - dus à une modification d'efficacité ou une évolution des technologies - mais n'incluant pas l'inflation ou la déflation générale des prix.

L'inflation / déflation est une augmentation / diminution durable générale des prix au cours du temps (appliquée annuellement dans le cadre de la présente étude).

On retrouve donc un facteur d'actualisation nominal qui lie les valeurs d'argent présentes et futures en prenant en compte le taux d'inflation/de déflation général, et un facteur d'actualisation réel qui lui ne prend pas ce taux en compte.

La valeur actuelle d'argent à posséder est calculée en actualisant les flux d'argent futurs pour une date déterminée. Ce sont donc ces valeurs actualisées qui sont employées afin de comparer valablement différentes alternatives. Ces calculs permettent de déterminer la somme d'argent à posséder actuellement pour répondre aux besoins futurs tout au long du cycle de vie, c'est-à-dire la valeur nette actuelle X_{VNA} . Cette dernière est donc déterminée grâce à la formule suivante :

$$C_n = C_0 (1 + g)^n$$

$$X_{VNA} = \sum (C_n \times q) = \sum_{n=1}^p \frac{C_n}{(1+d)^n}$$

avec :

- C le coût à l'année n ;
- g le taux de croissance des prix ;
- q le facteur nominal d'actualisation ;
- d le taux réel nominal d'actualisation attendu par année (en moyenne 4 %) ;
- n le nombre d'années entre la date d'origine et la date d'occurrence des coûts ;
- p la période analysée.

2.4 Maison passive

Une maison passive est un bâtiment qui se veut moins énergivore et plus confortable (pas de courant d'air, meilleure qualité de l'air etc.) qu'une construction traditionnelle. Elle maintient un climat intérieur agréable en été comme en hiver sans installation de chauffage (à l'exception d'un éventuel appoint) ou de refroidissement. (Plateforme Maison Passive asbl. 2013)

Pour être certifié passif, un bâtiment doit respecter les critères suivants (Ruelle, F. 2008) :

- Les besoins d'énergie pour le chauffage de l'habitation doivent être inférieurs ou égaux à $15 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{an}$;
- L'étanchéité à l'air (n50 - mesure effectuée avec une différence de pression de 50 Pa) doit être inférieure ou égale à 0,6 renouvellements d'air par heure ;
- Les surchauffes (température de plus de 25°C) ne doivent pas survenir plus de 5 % du temps.

Il s'agit là bien entendu d'une obligation de performance et non de moyens. Dans le cadre de ce travail et au vu du sujet traité, un de ses moyens sera donc ici la performance thermique des parois du bâtiment avec l'imposition d'un coefficient de transmission thermique U inférieur à $0,15 \text{ W/m}^2 \text{K}$. Le coefficient de transmission thermique de chaque type de paroi analysé est alors calculé manuellement grâce aux formules suivantes (DGO4. sd ; Mengoni, J.-C. 2011) :

$$U = 1/R_T$$
$$R_T = R_{si} + R_1 + \dots + R_n + R_{se} \text{ où } R_n = d/\lambda$$

avec :

- d l'épaisseur de la couche de matériau [m] ;
- λ la conductivité thermique de la couche de matériau [W/mK] ;
- n le nombre de couches de matériau de la paroi ;
- R_n la résistance thermique d'une couche de la paroi [$\text{m}^2 \text{K/W}$] ;
- R_{se} la résistance thermique d'échange d'une surface extérieure = $0,04 \text{ m}^2 \text{K/W}$ pour une paroi verticale ;
- R_{si} la résistance thermique d'échange d'une surface intérieure = $0,13 \text{ m}^2 \text{K/W}$ pour une paroi verticale ;
- R_T la résistance thermique totale de la paroi [$\text{m}^2 \text{K/W}$] ;
- U = le coefficient de transmission thermique [$\text{W/m}^2 \text{K}$].

3

Méthodologie

3.1 Processus du mémoire

Le but de ce travail, comme vous avez pu le découvrir dans l'introduction, est donc théorique, lié à un problème sociétal. La problématique principale est l'impact négatif des constructions dites « traditionnelles » sur l'environnement. Ainsi, le but de ce mémoire est de prouver qu'il est possible de renverser cette tendance, de passer d'un impact négatif à un impact positif grâce à la modification des techniques de construction mises en œuvre et plus exactement par la modification des matériaux employés. Le processus mis en œuvre afin d'atteindre cet objectif est résumé dans la Figure 3.1 :

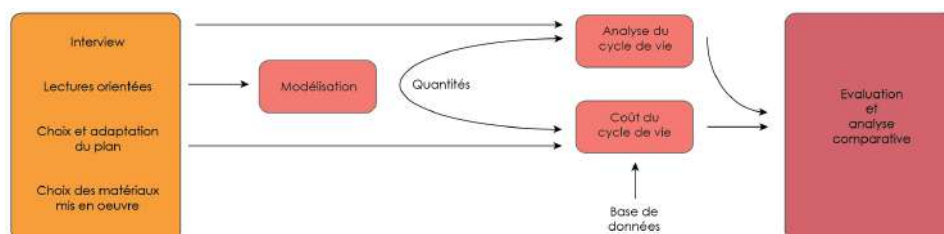


FIGURE 3.1 – Processus du mémoire (Delvenne F. 2016)

En premier lieu, il convient de rassembler un maximum d'informations afin de créer un état de l'art pertinent et utile pour la suite du travail. Ainsi, au travers de lectures mais aussi d'interviews et de l'expérience acquise grâce au programme WISBA 2016, cette partie présente et explicite, comme vous avez pu le lire, des concepts indispensables tels que l'analyse du cycle de vie, le coût du cycle de vie ou les critères à respecter pour une maison passive.

Le travail se poursuit par la méthodologie au sein de laquelle est fixé le processus qui sera mis en œuvre pour la réalisation des calculs. Il pré-

sente les hypothèses prises ainsi que les limites considérées mais également les logiciels et bases de données employés. Ce sont des informations très importantes car elles permettent au lecteur de comprendre que les résultats obtenus sont à considérer de manière critique et que cette étude n'a pas forcément la même ampleur que d'autres études, plus approfondies, auxquelles il aurait pu avoir accès.

La suite logique est donc la présentation des quatre cas d'étude. Il convient par la même occasion de déterminer le plan d'architecture qui leur sert de base commune ainsi que la composition exacte (épaisseur d'isolant) de leurs parois respectives. Cette étape permet de récolter un maximum d'informations sur le cycle de vie de l'ensemble des matériaux sélectionnés afin de pouvoir les intégrer dans les analyses. Les quantités de matériaux nécessaires sont alors déterminées grâce à la modélisation puis incluses dans les analyses.

Le travail se termine avec les deux études annoncées, soit l'analyse du cycle de vie et le calcul du coût du cycle de vie, en parallèle de la démarche de récolte de données afin de créer des modèles pertinents et aussi proches de la réalité que possible. En cas de données manquantes ou non fournies par les entrepreneurs, des bases de données sont employées à la fois dans le cadre de l'analyse du cycle de vie et du coût du cycle de vie. *Il est important de noter que, pour des soucis de confidentialité, aucune des données fournies par les entreprises n'apparaîtra dans ce travail.*

Une fois les résultats obtenus, l'objectif du travail, c'est-à-dire l'analyse comparative, est réalisé.

Un moyen de compléter cette étude est de réaliser une simulation énergétique afin d'obtenir la consommation énergétique exacte du bâtiment sélectionné en fonction de la composition de ses parois pour l'inclure dans les calculs mais également d'ajouter la notion de confort aux paramètres étudiés (Figure 3.2). Cependant, faute de temps, cette étude ne sera pas réalisée.

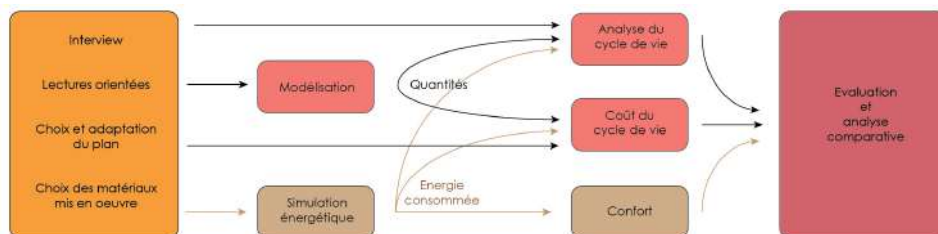


FIGURE 3.2 – Processus complété du mémoire (Delvenne F. 2016)

3.2 Hypothèses et limitations

Comme expliqué dans l'état de l'art, une des étapes les plus importantes de l'analyse du cycle de vie est le choix de l'unité fonctionnelle. Une fois déterminée, les limites et hypothèses doivent être énoncées.

L'unité fonctionnelle de cette étude est un bâtiment (son plan interne faisant référence) ayant une durée de vie de 50 *ans*, dont les parois extérieures possèdent un U de $0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$ et dont la consommation d'énergie pour le chauffage correspond au critère passif, soit $15 \text{ kWh/m}^2.\text{an}$.

Il est important de noter que les parois extérieures sont les seules cloisons possédant le même U . L'épaisseur de leur couche isolante est dès lors déterminée de sorte à remplir ce critère. Les autres cloisons qui sont donc les parois intérieures, le plancher et la toiture ont, quand à elle, des propriétés isolantes différentes. Il s'agit en effet des compositions classiques réalisées par les différentes entreprises, elles n'ont donc connu aucune modification. Elles ne possèdent dès lors pas les mêmes caractéristiques et ne sont donc pas comparable à proprement dit. Ainsi, il convient de rester critique. Les résultats les concernant sont tout de même présents dans ce travail mais sont uniquement donnés à titre indicatif. Le but est d'informer le lecteur, et plus particulièrement le candidat bâtisseur, des options / alternatives qui se présentent à lui et de le sensibiliser aux conséquences de ses choix en terme à la fois d'écologie et d'économie.

Les calculs pour l'ensemble des cas d'étude ont été réalisés selon deux visions. La première considère, en terme de quantités, uniquement les quantités réellement mises en œuvre dans le projet. La seconde prend quant à elle en compte le fait que certains matériaux doivent subir des découpes. Pour ce faire, les dimensions types de chaque matériau mis en place ont été relevées.

Lors de la construction du modèle en trois dimensions dans le logiciel Sketchup, chaque matériau a été dessiné selon son format type et le nombre de pièces entières et de pièces découpées comptabilisé. L'hypothèse la plus défavorable est prise en compte pour les découpes : une fois une pièce découpée, la partie restante est considérée comme déchet et n'est pas réutilisée ailleurs dans le bâtiment. Cela permet donc de créer un critère d'analyse ainsi qu'une piste de réflexion supplémentaire.

En ce qui concerne les étapes du cycle de vie, seules l'extraction, la production et une utilisation partielle (consommation d'énergie pour le chauffage et remplacements) ont été prises en compte dans l'analyse du cycle de vie et le coût du cycle de vie. La mise en œuvre fait exception car elle rentre

en ligne de compte dans le coût du cycle de vie (chaque prix est fourni pour le produit et sa pose) mais pas dans le cadre de l'analyse du cycle de vie. Ainsi, le transport jusqu'au chantier, la consommation d'eau, la maintenance et le nettoyage mais aussi la fin de vie ne sont pas compris dans cette étude et dans les résultats présentés.

Si l'on rentre dans les détails au niveau du bâtiment, ne sont pris en compte que les éléments les plus importants du gros œuvre. On ne retrouve donc pas d'informations sur le mortier, les clous, les menuiseries comme les portes et les fenêtres, l'acquisition du terrain ou encore l'aménagement interne (meubles, système de ventilation et/ou de chauffage par exemple), etc.

Grâce aux informations fournies par les entreprises, j'ai complété la base de données en créant dans le logiciel les flux nécessaires aux calculs des impacts des produits réalisés par les quatre entreprises wallonnes sélectionnées, soit Argibat, IsoHemp, Mobic et PailleTech. Au vu du temps imparti, je n'ai récolté que les données concernant les étapes principales de leur cycle de vie pour les phases d'extraction et de production. La méthode étant identique pour chaque matériau créé de cette manière dans le logiciel, la comparaison est tout à fait correcte. Il convient donc de se rappeler que ce sont les ordres de grandeurs qui sont à prendre en considération et non les chiffres exacts fournis par le logiciel. Ainsi, ne sont pas pris en compte certains éléments de détails comme les ficelles qui servent à tenir un ballot de paille, la fabrication des diverses machines pour le traitement des matériaux etc.

3.3 Logiciels et base de données

Dans le cadre de ce travail, j'ai choisi de réaliser l'analyse du cycle de vie par le biais du logiciel OpenLCA (Figure 3.3). Il s'agit d'un programme open source, connu dans le cadre de l'université et pour lequel j'ai eu la chance de suivre une courte formation donnée par Madame BELBOOM S.



FIGURE 3.3 – Logiciel OpenLCA (OpenLCA. 2016) - Base de données EcoInvent (PRé Consultants. 2016)

En ce qui concerne la base de données que j'ai créé, la plupart des informations proviennent des entreprises elles-mêmes. Quant aux informations manquantes, elles sont tirées de la base de données suisse EcoInvent (Figure 3.3). Il s'agit d'une des plus complètes en Europe mais également d'une des plus acceptées comme fiable. Elle est de plus mise à jour très fréquemment.

J'ai choisi de réaliser les calculs du coût du cycle de vie par le biais du logiciel Excel 2010 (Figure 3.4). Il existe peu de logiciels permettant de réaliser une telle analyse, encore moins dans le cadre de la construction. Le coût du cycle de vie étant encore un concept relativement peu mis en pratique, j'ai choisi de le mettre moi-même en œuvre grâce à un tableur Excel en encodant les formules qui me sont nécessaires.



FIGURE 3.4 – Logiciel Excel 2010 (Romain. 2014)

En ce qui concerne la base de données des coûts, la plupart des informations proviennent des entreprises elles-mêmes. Les informations manquantes sont tirées principalement d'un magazine spécialisé dans la construction (*Je vais construire et rénover*, juin 2016) car l'accès à une base de données reste difficile.

Afin d'obtenir les quantités de matériaux, utiles à la fois dans le cadre de l'analyse du cycle de vie et pour le calcul du coût du cycle de vie, deux logiciels sont employés. Autocad 2015 (Figure 3.5) est utilisé afin de dessiner les plans et les compositions de parois en détail. Une fois le plan terminé, il est introduit dans le logiciel Sketchup 2016 (Figure 3.5) où un modèle numérique 3D est réalisé. Il permet de déterminer la quantité respective de chaque matériau employé.

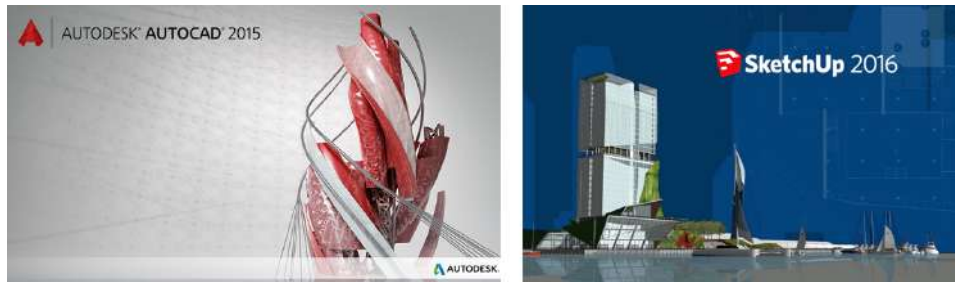


FIGURE 3.5 – Logiciel Autocad 2015 (Delvenne F. 2016) - Logiciel Sketchup 2016 (Sketchup. 2015)

4

Cas d'étude

L'objectif de ce mémoire est de prouver qu'il est possible de construire de manière plus durable qu'une maison traditionnelle grâce à des systèmes constructifs alternatifs dans lesquels sont mis en œuvre des matériaux régénératifs. Il convient donc en premier lieu de définir ces deux termes, soit construction traditionnelle et construction régénérative, afin de poser les bases de l'étude.

Les compositions de parois des quatre cas d'étude sont alors présentées, accompagnées de quelques indications sur les caractéristiques principales de chacun des matériaux écologiques et d'une brève présentation de chacune des entreprises participantes.

Le choix d'un plan commun à l'ensemble des cas est important afin de mettre en œuvre une méthodologie efficace et de créer des cas comparables puisqu'il s'agit d'un des critères de l'unité fonctionnelle. Pour sélectionner ce dernier, j'ai cherché une habitation construite en Belgique, atteignant des performances proches de celles d'une maison passive et possédant certaines caractéristiques propres à ce type de construction telle la compacité. Je souhaitais également qu'elle ait été réalisée par une entreprise présente en Belgique, si possible de manière durable et intéressante écologiquement parlant. C'est ainsi que j'ai choisi la maison NCube construite par NaturHome.

Le chapitre se poursuit par l'explication du choix de la valeur U de 0,11 W/m^2K pour l'unité fonctionnelle ainsi que par les calculs des épaisseurs d'isolants nécessaires pour permettre à chaque cas d'étude d'atteindre cette performance.

Finalement, sont présentés en détail la modélisation et les quantités calculées, données indispensables pour effectuer l'analyse du cycle de vie et le calcul du coût du cycle de vie.

4.1 Définitions - Constructions traditionnelle et régénérative

Dans ce travail, sont présentés deux grands types de techniques de construction : la construction traditionnelle et la construction dite régénérative.

La construction traditionnelle est la construction la plus souvent mise en œuvre dans notre pays. Il s'agit donc d'une construction en briques. En effet, les Belges sont assez attachés aux traditions et l'expression « une brique dans le ventre » prouve qu'ils ne restent pas indifférents face à ce matériau. De plus, la brique apporte un sentiment de sécurité et une impression de longévité.

La construction dite régénérative est, quant à elle, bien moins répandue dans notre pays. Avant d'entrer dans le détail de ce type de construction, il est peut-être intéressant de définir le terme « régénératif ».

Régénératif : Se dit d'une entité qui est capable de recréer par elle-même la matière (et/ou l'énergie) qui lui ont été prise(s).

Ainsi, on pourrait définir la conception régénérative comme étant un système durable, qui base ses besoins sur la conservation de l'intégrité et de l'équilibre de la nature afin de créer une boucle, un processus au sein duquel consommation et production s'équilibrent tout en garantissant, pour le bâtiment, des composants sains, sûrs et bénéfiques autant à l'environnement qu'à l'Homme. Dès lors, les matériaux sont réalisés à base de matières quasiment ou totalement inépuisables, d'origine végétale ou minérale le plus souvent, et ne contenant pas (ou peu) d'additifs chimiques. On retrouve donc des matériaux tels que le lin, le chanvre, la paille, le roseau, le bois, le bambou, le coton, l'argile, le sable, etc. avec une priorité placée sur ceux qui sont disponibles localement. (Livios. sd ; Voir vert. sd)

4.2 Composition des parois

4.2.1 Construction traditionnelle

Composition de la cloison intérieure		
Numéro	Matériau	Epaisseur [m]
1	Plâtre	0,01
2	Blocs de béton	0,14
3	Plâtre	0,01

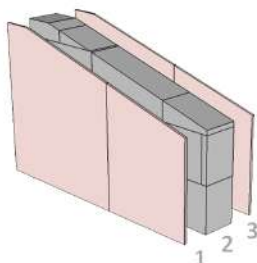


FIGURE 4.1 – Composition des cloisons intérieures de la construction traditionnelle (Delvenne, F. 2016)

Composition de la cloison extérieure		
Numéro	Matériau	Epaisseur [m]
1	Briques	0,09
2	Vide ventilé	0,03
3	Isolation - laine minérale	0,25
4	Blocs de béton	0,19
5	Plâtre	0,01

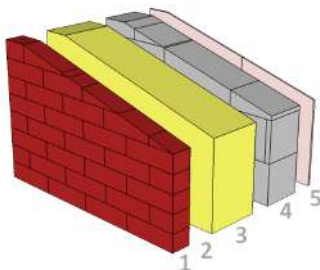


FIGURE 4.2 – Composition des cloisons extérieures de la construction traditionnelle (Delvenne, F. 2016)

Composition du plancher		
Numéro	Matériau	Epaisseur [m]
1	Revêtement de sol (carrelage)	0,01
2	Dalle de compression	0,04
3	Hourdis et poutrelles	0,11
4	Isolation - Laine de verre	0,1
5	Plâtre	0,01

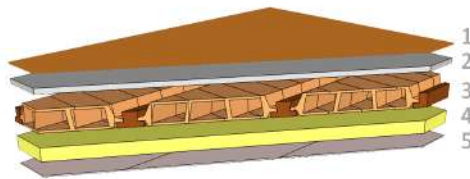


FIGURE 4.3 – Composition du plancher de la construction traditionnelle (Delvenne, F. 2016)

Composition de la toiture		
Numéro	Matériau	Epaisseur [m]
1	Membrane bitumineuse	0,01
2	Isolation - Laine de roche	0,12
3	Dalle de béton	0,2
4	Plâtre	0,01

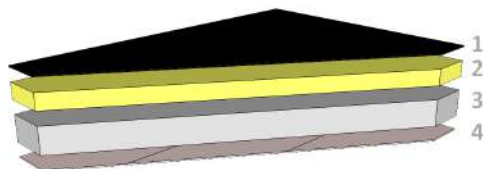


FIGURE 4.4 – Composition de la toiture de la construction traditionnelle (Delvenne, F. 2016)

4.2.2 Construction IsoHemp

La société IsoHemp (Figure 4.5) a été lancée en 2012 par de jeunes entrepreneurs. Elle est spécialisée dans la fabrication de blocs isolants de béton de chanvre. Elle met donc en avant un produit d'isolation sain, naturel mais surtout local. (IsoHemp. 2016)



FIGURE 4.5 – IsoHemp (IsoHemp. 2016)

Le béton de chanvre est un isolant thermique efficace, mais aussi un très bon isolant acoustique. C'est un bon régulateur d'humidité : il va capturer celle-ci lorsque le taux dans la pièce devient trop important et la restituer au fur et à mesure assurant ainsi le confort des habitants. Sa grande inertie thermique permet également d'assurer une température constante et agréable au sein de la maison. L'avantage de ces blocs est également leur légèreté : ils sont donc faciles à transporter et permettent un gain de temps sur chantier. (Hoyet, N. 2013)

Composition de la cloison intérieure		
Numéro	Matériau	Epaisseur [m]
1	Plâtre	0,01
2	Blocs IsoHemp	0,12
3	Plâtre	0,01

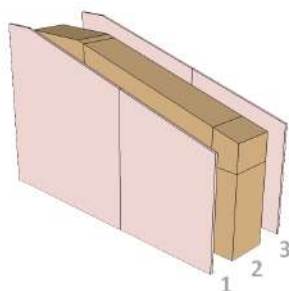


FIGURE 4.6 – Composition des cloisons intérieures de la construction IsoHemp (Delvenne, F. 2016)

Composition de la cloison extérieure		
Numéro	Matériau	Épaisseur [m]
1	Bardage en bois	0,02
2	Lattes	0,02
3	Contre-lattes	0,02
4	Blocs IsoHemp	0,15
5	Isolation - laine de chanvre & Ossature en bois	0,2
6	Blocs IsoHemp	0,12
7	Plâtre	0,01

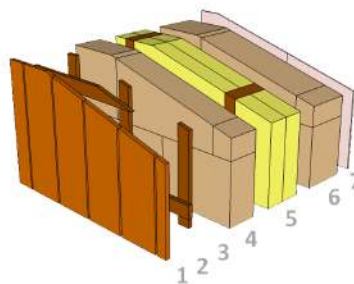


FIGURE 4.7 – Composition des cloisons extérieures de la construction IsoHemp (Delvenne, F. 2016)

Composition du plancher		
Numéro	Matériau	Épaisseur [m]
1	Revêtement de sol - bois massif	0,01
2	Panneaux OSB	0,02
3	Blocs IsoHemp & Poutres en I en bois	0,15
4	Plâtre	0,01

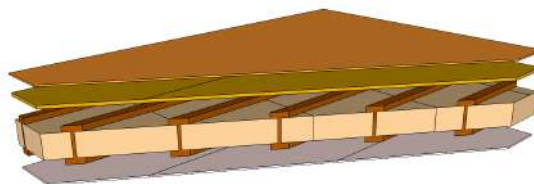


FIGURE 4.8 – Composition du plancher de la construction IsoHemp (Delvenne, F. 2016)

Composition de la toiture		
Numéro	Matériau	Epaisseur [m]
1	Membrane bitumineuse	0,01
2	Panneaux isolants - polystyrène	0,08
3	Panneaux OSB	0,02
4	Isolation - laine de chanvre & Poutres en I en bois	0,2
5	Plâtre	0,01

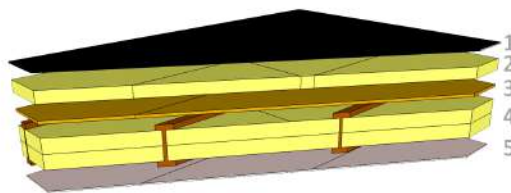


FIGURE 4.9 – Composition de la toiture de la construction IsoHemp (Delvenne, F. 2016)

4.2.3 Construction ArgiMob

La société Mobic (Figure 4.10) est fondée en 1998. Elle est spécialisée dans la fabrication et le montage d'ossatures en bois. Elle est en croissance constante. En 2010, elle acquiert une ligne de production totalement robotisée. En 2010 et 2011, elle commercialise des produits brevetés dont elle est à l'origine. En 2014, le dernier de ses produits en date fait son apparition sur le marché : ArgiMob. C'est également cette année-là qu'elle entre en possession d'une ligne d'aboutage. Un an plus tard, elle reprend la scierie située à Etalle : elle scie et sèche donc elle-même le bois qu'elle met en œuvre. (Mobic. 2016)



FIGURE 4.10 – Mobic (Mobic. 2016)

Il est également important de noter que la société Mobic possède le label PEFC qui garantit que leurs produits proviennent de forêts gérées durablement. De plus, le bois utilisé possède le label wallon *Bois local*. Celui-ci vise à mettre en avant le savoir-faire wallon, l'utilisation de ressources locales, la mise en œuvre via un circuit court et la fiabilité du produit. (Mobic. 2016)

La cellulose est un isolant fabriqué à partir de papier journal, grâce à un processus de recyclage. Il s'agit d'un isolant ayant de bonnes performances thermiques d'autant plus que l'insufflation permet de remplir intégralement le volume entre les montants de l'ossature contrairement à un isolant rigide. Cette technique de permet donc une mise en œuvre parfaitement étanche et fait donc de la cellulose un isolant acoustique encore plus performant de part l'absence de joint. On notera également que la cellulose stocke elle aussi la chaleur (et la libère avec un certain déphasage) et régule l'humidité de l'habitation. (Mengoni, J.-C. 2011)

La société Argibat (Figure 4.11) a été créée en 2014 grâce au projet de relance de la Briqueterie de Wanlin, fermée l'année précédente. Elle vise donc à mettre en avant un produit local d'exception. Son objectif est de fournir

des matériaux (que ce soit sous la forme de blocs ou d'enduits) sains, naturels et économiquement abordables. (Argibat. 2016)



FIGURE 4.11 – Argibat (Argibat. 2016)

L'argile mise en œuvre dans cette cloison est de l'argile crue. Elle ne nécessite donc aucune cuisson et sa production est très peu énergivore. Ce matériau n'a pas été choisi pour ses propriétés isolantes (faibles). Sa grande valeur ajoutée se trouve dans sa capacité à réguler l'humidité. L'argile stocke en effet l'humidité présente dans l'air intérieur et la restitue lorsque le taux d'humidité de la pièce chute. Son inertie en fait également un excellent régulateur thermique. Enfin, de part sa souplesse, l'argile assure un confort acoustique aux habitants. (Mengoni, J.-C. 2011)

Composition de la cloison intérieure		
Numéro	Matériau	Epaisseur [m]
1	Plâtre	0,01
2	Galets d'argile & Ossature en bois	0,05
3	Isolation - Laine minérale	0,05
4	Galets d'argile & Ossature en bois	0,05
5	Plâtre	0,01

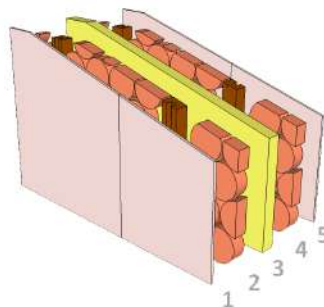


FIGURE 4.12 – Composition des cloisons intérieures de la construction Argimob (Delvenne, F. 2016)

Composition de la cloison extérieure		
Numéro	Matériau	Epaisseur [m]
1	Bardage en bois	0,02
2	Lattes	0,02
3	Contre-lattes	0,02
4	Panneaux de fibres de bois	0,016
5	Isolation - cellulose insufflée & Ossature en bois	0,3
6	Panneaux OSB	0,016
7	Galets d'argile & Ossature en bois	0,05
8	Plâtre	0,01

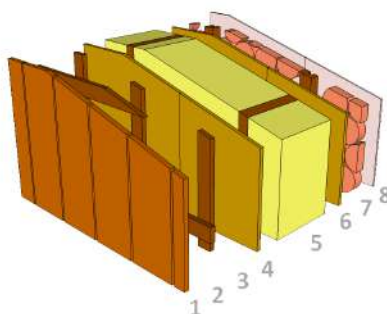


FIGURE 4.13 – Composition des cloisons extérieures de la construction Argimob (Delvenne, F. 2016)

Composition du plancher		
Numéro	Matériau	Epaisseur [m]
1	Revêtement de sol - bois massif	0,01
2	Panneaux OSB	0,02
3	Poutres en I en bois	0,24
4	Plâtre	0,01

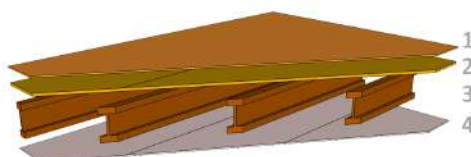


FIGURE 4.14 – Composition du plancher de la construction Argimob (Delvenne, F. 2016)

Composition de la toiture		
Numéro	Matériau	Epaisseur [m]
1	Membrane bitumineuse	0,01
2	Panneaux de fibres de bois	0,015
3	Isolation - cellulose insufflée & Ossature en bois	0,24
4	Panneaux OSB	0,015
5	Plâtre	0,01

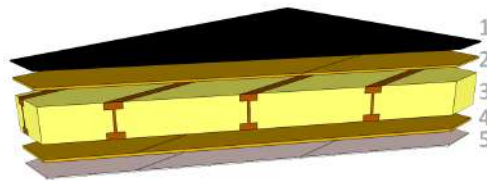


FIGURE 4.15 – Composition de la toiture de la construction Argimob (Delvenne, F. 2016)

4.2.4 Construction PailleTech

La société PailleTech est créée en 2009 par un groupe d'architectes et d'autoconstructeurs liés par leurs convictions environnementales. Il s'agit de la première société coopérative de construction à mettre en avant la paille en tant qu'isolant en Wallonie. Ils souhaitent mettre en avant la préfabrication pour ce type de parois mais aucun outil spécifique n'existe à l'époque. PailleTech a développé des prototypes et est parvenu à créer un outil efficace qui est aujourd'hui utilisé au sein de leur usine. (PailleTech. 2016)



FIGURE 4.16 – PailleTech (PailleTech. 2016)

La paille est un matériau écologique et un isolant thermique performant. C'est un produit local, abondant et peu cher. En terme de construction, son véritable inconvénient est son épaisseur relativement importante (46 cm pour les ballots utilisés ici). Elle est également réductrice au niveau de la conception des plans d'habitation. En effet, il est impossible de couper dans un ballot. C'est donc la dimension des ballots qui définit la dimension des parois. (Hoyet, N. 2013)

Dans le cadre d'une analyse du cycle de vie, la paille peut être considérée de trois façons distinctes (AproPaille. 2016) :

- Un déchet de l'agriculture : La paille n'a aucun intérêt pour le producteur. Dans ce cas, aucun impact de la partie culturale ne lui est attribué.
- Un sous-produit de l'agriculture : La paille est un résidu de la culture qui peut être valorisable pour les sols. Si on l'utilise dans la construction, il convient alors de compenser sa valeur nutritive pour les sols par des apports alternatifs via des engrais. Dans ce cas, les impacts de la partie culturale ne lui sont pas impactés à l'exception de l'engrais qui la remplace et du passage de la machine pour le répandre.
- Un co-produit de l'agriculture : La paille est produite en même temps que le produit principal, soit la céréale. Les impacts de la partie culturale lui sont imputés en partie. C'est ce qui est appliqué dans le cadre de mon étude. En effet, la société auprès de laquelle PailleTech se fournit cultive la paille dans le but précis de la vendre en tant que matériau de construction.

Composition de la cloison intérieure		
Numéro	Matériau	Epaisseur [m]
1	Bois massif	0,14

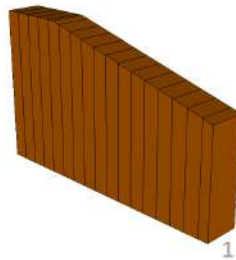


FIGURE 4.17 – Composition des cloisons intérieures de la construction Paille-Tech (Delvenne, F. 2016)

Composition de la cloison extérieure		
Numéro	Matériau	Epaisseur [m]
1	Bardage en bois	0,02
2	Lattes	0,02
3	Contre-lattes	0,02
4	Panneaux de fibres de bois	0,016
5	Isolation - paille & Ossature en bois (18 cm)	0,46
6	Enduit d'argile	0,04
7	Enduit de finition	0,003

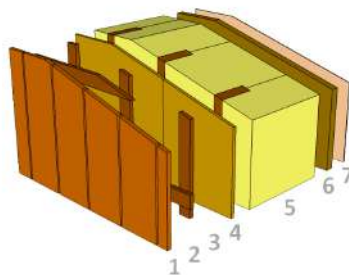


FIGURE 4.18 – Composition des cloisons extérieures de la construction Paille-Tech (Delvenne, F. 2016)

Composition du plancher		
Numéro	Matériau	Epaisseur [m]
1	Revêtement de sol - bois massif	0,01
2	Bois massif	0,18

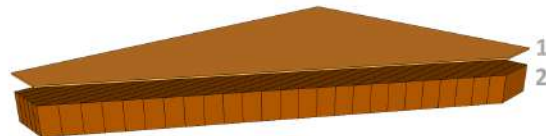


FIGURE 4.19 – Composition du plancher de la construction PailleTech (Delvenne, F. 2016)

Composition de la toiture		
Numéro	Matériau	Epaisseur [m]
1	Membrane bitumineuse	0,01
2	Panneaux de fibres de bois	0,016
3	Isolation - paille & Ossature en bois	0,46
4	Finition - voliges rabotées	0,01

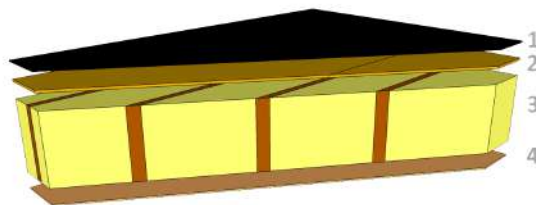


FIGURE 4.20 – Composition de la toiture de la construction PailleTech (Delvenne, F. 2016)

4.3 Plans - Présentation et modélisation

4.3.1 NaturHome

La société NaturHome-NordChalet (Figure 4.21) existe depuis plus de quarante ans. Elle compte actuellement plus de cinquante collaborateurs et est implantée dans trois sites (Gouvy en Belgique, TroisVierges au Luxembourg et Reims en France). (NaturHome. 2016)



FIGURE 4.21 – NaturHome (NaturHome. 2016)

La société se spécialise d'abord dans la construction de chalets en rondins empilés. Son activité évolue avec le temps mais aussi avec les règlements et les normes : elle s'oriente alors vers les constructions ossature bois et poteaux-poutres. La technologie va lui permettre d'industrialiser la fabrication de ses cloisons et d'atteindre des cycles de fabrication très précis et performants dans les années 2000. C'est également à cette période que la société choisit de se spécialiser dans les maisons passives ou très basse énergie, réalisées avec des matériaux sains et écologiques. Elle concrétise notamment ce choix par la réalisation d'une maison témoin à Ovifat (Belgique) en 2010 (Figure 4.22). (NaturHome. 2016)



FIGURE 4.22 – Maison passive à Ovifat (NaturHome. 2016)

La société développe actuellement deux nouvelles activités :

- WoodTecpro, premier distributeur spécialisé dans les produits de construction en bois en Wallonie ;
- NCube, concept d’habitation basse énergie ou passive, moins chère qu’une construction traditionnelle grâce à une industrialisation, une standardisation et l’utilisation d’un configurateur 3D en ligne.

4.3.2 Concept de la maison NCube

Notre société en général, et plus particulièrement les candidats bâtisseurs, fait actuellement face à de nombreux problèmes en cas de réalisation d’une nouvelle construction :

- Augmentation du coût des matériaux et de la main-d’œuvre ;
- Augmentation des normes et règlements à respecter ;
- Augmentation du coût du foncier ;
- Diminution des surfaces de terrain disponibles ;
- Diminution de l’accès au crédit.

NaturHome a dès lors tenté de trouver une solution par le biais du concept de maisons NCube, qui vise à créer des maisons en bois compactes et fonctionnelles, performantes thermiquement et acoustiquement, pour un prix accessible. Cela est rendu possible par une industrialisation, une standardisation et une diminution des frais de vente et de devis. (NaturHome. 2016)

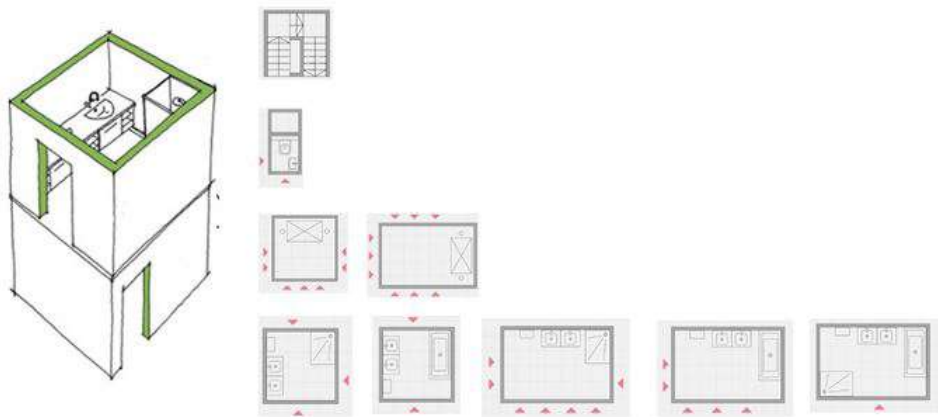


FIGURE 4.23 – Module 3D créé par NaturHome (NaturHome. 2016)

L’industrialisation est mise en œuvre grâce à des parois en ossature bois et des modules 3D en panneaux contrecollés pour les escaliers, les toilettes, le local technique et la salle de bain (Figure 4.23). Ainsi, les modules sont

fabriqués mais aussi équipés en atelier. La réalisation des parois et la pose des châssis se fait là-bas aussi. Dès lors, sur le chantier, le gros œuvre est réalisé en trois jours seulement. (NaturHome. 2016)

La standardisation se fait quant à elle grâce aux entreprises partenaires puisque le choix des matériaux, équipements etc. est limité. (NaturHome. 2016)

La dernière réduction de coût est réalisée par l'utilisation d'un configurateur 3D mis en ligne (www.ncube.eu) (Figure 4.24). Ainsi, le candidat bâtisseur conçoit les plans de sa maison lui-même, étape par étape (forme de la maison, volume, type de toiture, disposition des pièces et fenêtres, choix des matériaux). Le choix de la performance énergétique (et donc de la composition des parois - épaisseur d'isolant) est également déterminée par le client. Le configurateur contient cependant un canevas pré-établi, ce qui limite le nombre de possibilités. Un architecte est toujours indispensable et intervient donc par la suite. (NaturHome (2016))



FIGURE 4.24 – Configurateur 3D créé par la société NaturHome (NaturHome. 2016)

4.3.3 Plans et modifications

La maison NCube sélectionnée dans le cadre de ce travail se situe à Aubange (latitude : 49.572091 - longitude : 5.797956), en province du Luxembourg (Figure 4.25). Il s'agit d'une maison basse énergie (K31) ; la performance thermique est ici un choix du maître d'ouvrage. Avec une superficie de 136 m^2 hors carport, elle représente un coût de 299 939 € TVA comprise. (NaturHome. 2016)



FIGURE 4.25 – Maison NCube à Aubange

Le plan ne peut cependant pas être utilisé tel quel dans le cadre de mon étude. En effet, les parois de la construction PailleTech ne peuvent avoir que certaines dimensions prédéfinies, fonctions de la dimension d'un ballot de paille puisqu'il est impossible de le couper (Figure 4.26).

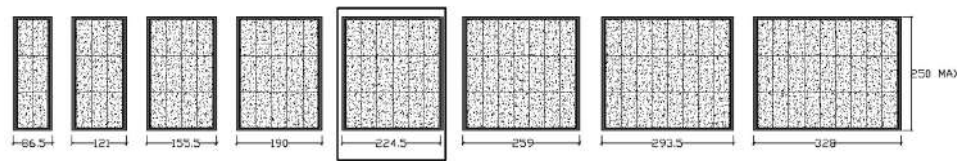


FIGURE 4.26 – Dimensions des parois prédéfinies par la société PailleTech (PailleTech (2016))

Ainsi, le plan a été modifié (Annexes 11.3 à 11.7) afin que chaque type de construction possède un plan interne identique et soit donc conforme à l'unité fonctionnelle et comparable.

4.4 Calculs des données de base des analyses

Nous entrons à présent dans la partie pratique de ce travail de recherche. Comme expliqué précédemment, elle se compose principalement des analyses du cycle de vie et des calculs du cycle de vie pour les quatre cas d'étude soit la construction PailleTech, la construction traditionnelle, la construction ArgiMob et enfin la construction IsoHemp.

Avant tout, il est important de poser les bases, c'est-à-dire de définir les compositions de parois et les quantités nécessaires pour la réalisation de chacune des constructions. L'ensemble des informations utilisées pour réaliser ces calculs est fournis par les entreprises.

Puisque la construction en paille est la seule dont il est impossible de modifier un quelconque élément (on ne peut pas couper dans un ballot de paille par exemple), son coefficient de transmission thermique est calculé et choisi comme critère de référence commun à l'ensemble des constructions. C'est donc le respect de ce critère qui détermine les épaisseurs d'isolant mis en œuvre.

En ce qui concerne les quantités, elles sont déterminées sur base des plans 2D réalisés dans le logiciel Autocad 2015, complétés par une maquette numérique 3D (Sketchup 2016).

4.5 Détermination du coefficient de transmission thermique commun

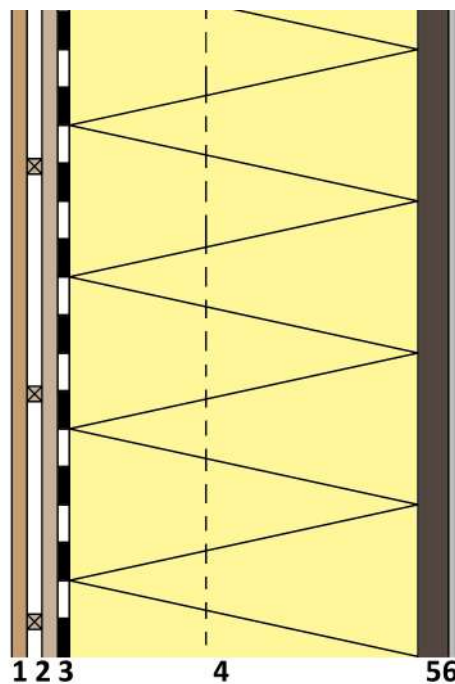


FIGURE 4.27 – Détail technique paroi PailleTech (échelle 1.10)

TABLE 4.1 – Composition et caractéristiques de la paroi PailleTech

Numéro	Nom de l'élément	e [m]	λ [W/mK]
1	Bardage	0.02	-
2a	Contre-lattes	0.02	-
2b	Lattes	0.02	-
3	Pare pluie rigide	0.016	0.045
4a	Ballots de paille	0.46	0.052
4b	Ossature bois (douglas)	0.18	0.12
5	Enduit de terre	0.04	0.66
6	Enduit de finition	0.003	0.66

Il convient de noter que la couche 4, puisqu'elle est composée, est considérée comme formée à 91% de paille (et donc à 9% de bois d'ossature).

$$U = \frac{1}{R_T}$$

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_{2a} + R_{2b} + R_3 + (x R_{4a} + (1-x) R_{4b}) + R_5 + R_6 + R_{se}$$

On note que R_{2a} et R_{2b} sont considérées comme nulles car il s'agit de couches fortement ventilées. La couche précédente n'a donc plus aucun intérêt dans le calcul de la résistance puisque ces deux couches fortement ventilées la sépare du reste de la paroi. Sa résistance est donc elle aussi considérée comme nulle.

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_{2a} + R_{2b} + R_3 + (x R_{4a} + (1-x) R_{4b}) + R_5 + R_6 + R_{se}$$

$$R_T = 0.04 + 0 + 0 + 0 + \frac{e_3}{\lambda_3} + (0.91 \frac{e_{4a}}{\lambda_{4a}} + 0.09 \frac{e_{4b}}{\lambda_{4b}}) + \frac{e_5}{\lambda_5} + \frac{e_6}{\lambda_6} + 0.13$$

$$R_T = 0.04 + 0 + 0 + 0 + \frac{0.016}{0.045} + (0.91 \frac{0.46}{0.052} + 0.09 \frac{0.18}{0.12}) + \frac{0.04}{0.66} + \frac{0.003}{0.66} + 0.13$$

$$R_T = 0.04 + 0 + 0 + 0 + 0.356 + (8.05 + 0.135) + 0.061 + 0.04 + 0.005$$

$$R_T = 8.687 \text{ m}^2 K/W$$

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{8.687} = 0.11 \text{ W/m}^2 K$$

Cette valeur est donc imposée aux autres parois étudiées, déterminant ainsi l'épaisseur d'isolant à mettre en oeuvre dans chacune d'entre elles.

4.6 Détermination de l'épaisseur d'isolant de la paroi traditionnelle

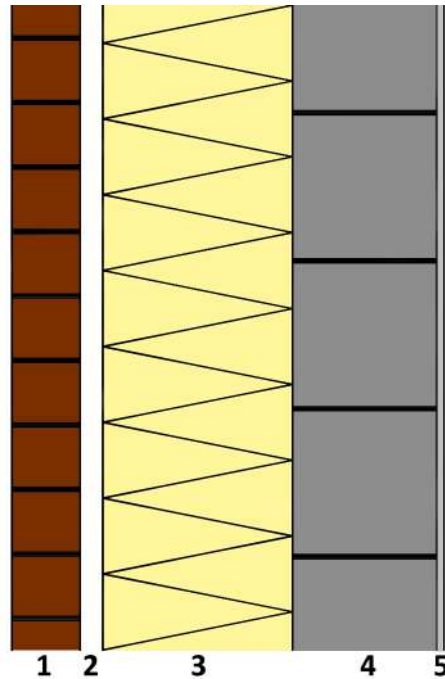


FIGURE 4.28 – Détail technique paroi traditionnelle (échelle 1.10)

TABLE 4.2 – Composition et caractéristiques de la paroi traditionnelle

Numéro	Nom de l'élément	e [m]	λ [W/mK]
1	Briques	0.09	-
2	Vide ventilé	0.03	-
3	Isolant en laine minérale	?	0.031
4	Blocs de béton creux	0.19	0.27
5	Finition	0.01	0.25

On note que le vide ventilé est une couche d'air fortement ventilée. Sa résistance est donc nulle, de même que celle de la couche qui le précède.

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_{se} = 8.687 \text{ m}^2K/W$$

$$R_T = 0.04 + 0 + 0 + \frac{e_3}{\lambda_3} + \frac{e_4}{\lambda_4} + \frac{e_5}{\lambda_5} + 0.13 = 8.687 \text{ m}^2K/W$$

$$R_T = 0.04 + 0 + 0 + \frac{e_3}{0.031} + \frac{0.19}{0.27} + \frac{0.01}{0.25} + 0.13 = 8.687 \text{ m}^2K/W$$

$$R_T = 0.04 + 0 + 0 + \frac{e_3}{0.031} + 0.704 + 0.04 + 0.13 = 8.687 \text{ m}^2K/W$$

$$e_3 = (8.687 - 0.04 - 0.704 - 0.04 - 0.13)/0.031 = 0.251 \text{ m}$$

On estime donc que l'épaisseur d'isolant mis en œuvre dans la paroi traditionnelle est de 25 centimètres.

4.7 Détermination de l'épaisseur d'isolant de la paroi ArgiMob

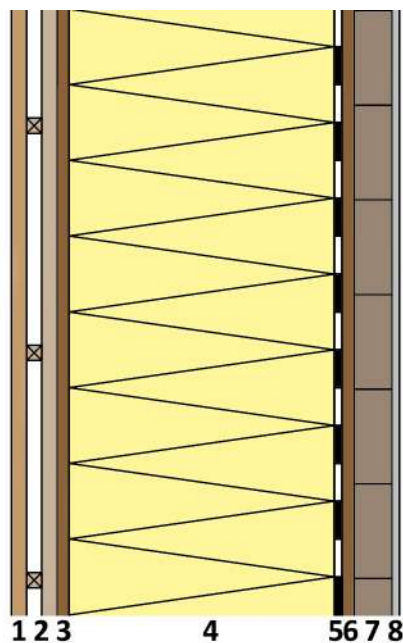


FIGURE 4.29 – Détail technique paroi ArgiMob (échelle 1.10)

TABLE 4.3 – Composition et caractéristiques de la paroi ArgiMob

Numéro	Nom de l'élément	e [m]	λ [W/mK]
1	Bardage	0.02	-
2a	Contre-lattes	0.02	-
2b	Lattes	0.02	-
3	panneau de contreventement	0.016	0.1
4a	Cellulose insufflée	?	0.038
4b	Ossature bois (douglas)	?	0.12
5	Pare vapeur	-	-
6	OSB	0.016	0.13
7	Galets d'argile	0.05	1.1
8	Finition	0.01	0.25

On note que les lattes et contre-lattes sont à nouveau considérées comme des couches d'air fortement ventilées. Leur résistance est donc nulle, de même que celle de la couche qui les précède. De plus, le pare vapeur est considéré comme négligeable dans le calcul qui suit.

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_{2a} + R_{2b} + R_3 + (x R_{4a} + (1 - x) R_{4b}) + R_5 + R_6 + R_7 + R_8 + R_{se} = 8.687 \text{ m}^2 K/W$$

$$R_T = 0.04 + 0 + 0 + 0 + \frac{e_3}{\lambda_3} + (0.91 \frac{e_4}{\lambda_{4a}} + 0.09 \frac{e_4}{\lambda_{4b}}) + 0 + \frac{e_6}{\lambda_6} + \frac{e_7}{\lambda_7} + \frac{e_8}{\lambda_8} + 0.13 = 8.687 \text{ m}^2 K/W$$

$$R_T = 0.04 + 0 + 0 + 0 + \frac{0.016}{0.1} + (0.91 \frac{e_4}{0.038} + 0.09 \frac{e_4}{0.12}) + 0 + \frac{0.016}{0.13} + \frac{0.05}{1.1} + \frac{0.01}{0.25} + 0.13 = 8.687 \text{ m}^2 K/W$$

$$R_T = 0.04 + 0 + 0 + 0 + 0.16 + (0.91 \frac{e_4}{0.038} + 0.09 \frac{e_4}{0.12}) + 0 + 0.123 + 0.045 + 0.04 + 0.13 = 8.687 \text{ m}^2 K/W$$

$$\text{Or, } (0.91 \frac{e_4}{0.038} + 0.09 \frac{e_4}{0.12}) = (0.91 \frac{0.12}{0.12 \cdot 0.038} + 0.09 \frac{0.038}{0.038 \cdot 0.12}) e_4 = 24.7 e_4$$

$$e_4 = (8.687 - 0.04 - 0.16 - 0.123 - 0.045 - 0.04 - 0.13) / 24.7 = 0.330 \text{ m}$$

On estime donc que l'épaisseur d'isolant mis en œuvre dans la paroi ArgiMob est de 30 centimètres.

4.8 Détermination de l'épaisseur d'isolant de la paroi IsoHemp

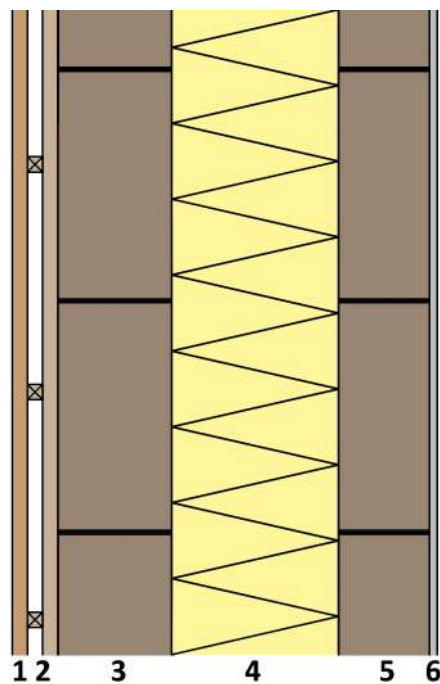


FIGURE 4.30 – Détail technique paroi Isohemp (échelle 1.10)

TABLE 4.4 – Composition et caractéristiques de la paroi IsoHemp

Numéro	Nom de l'élément	e [m]	λ [W/mK]
1	Bardage	0.02	-
2a	Contre-lattes	0.02	-
2b	Lattes	0.02	-
3	Béton de chanvre	0.15	0.076
4a	Laine de chanvre	?	0.04
4b	Ossature bois (douglas)	?	0.12
5	béton de chanvre	0.12	0.076
6	Finition	0.01	0.25

On note que les lattes et contre-lattes sont à nouveau considérées comme des couches d'air fortement ventilées. Leur résistance est donc nulle, de même que celle de la couche qui les précède.

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_{2a} + R_{2b} + R_3 + (x R_{4a} + (1-x) R_{4b}) + R_5 + R_6 + R_{se} = 8.687 \text{ m}^2 K/W$$

$$R_T = 0.04 + 0 + 0 + 0 + \frac{e_3}{\lambda_3} + (0.91 \frac{e_4}{\lambda_{4a}} + 0.09 \frac{e_4}{\lambda_{4b}}) + \frac{e_5}{\lambda_5} + \frac{e_6}{\lambda_6} + 0.13 = 8.687 \text{ m}^2 K/W$$

$$R_T = 0.04 + 0 + 0 + 0 + \frac{0.15}{0.076} + (0.91 \frac{e_4}{0.04} + 0.09 \frac{e_4}{0.12}) + \frac{0.12}{0.076} + \frac{0.01}{0.25} + 0.13 = 8.687 \text{ m}^2 K/W$$

$$R_T = 0.04 + 0 + 0 + 0 + 1.974 + (0.91 \frac{e_4}{0.04} + 0.09 \frac{e_4}{0.12}) + 1.579 + 0.04 + 0.13 = 8.687 \text{ m}^2 K/W$$

$$\text{Or, } (0.91 \frac{e_4}{0.04} + 0.09 \frac{e_4}{0.12}) = (0.91 \frac{0.12}{0.12 \cdot 0.04} + 0.09 \frac{0.04}{0.04 \cdot 0.12}) e_4 = 23.5 e_4$$

$$e_4 = (8.687 - 0.04 - 1.974 - 1.579 - 0.04 - 0.13)/23.5 = 0.210 \text{ m}$$

On estime donc que l'épaisseur d'isolant mis en œuvre dans la paroi Iso-Hemp est de 20 centimètres.

4.9 Détermination des quantités de matériaux

Les compositions des parois à présent connues, des modèles numériques 3D sont réalisés, élément par élément, afin de déterminer les quantités nécessaires pour chacun des matériaux employés. Ces quantités sont tout d'abord déterminées en nombre d'éléments mis en œuvre, ce qui facilite d'éventuelles transformations d'unités : le mètre cube est généralement la référence dans les analyses du cycle de vie et du coût du cycle de vie. Les tableaux suivants sont donc obtenus.

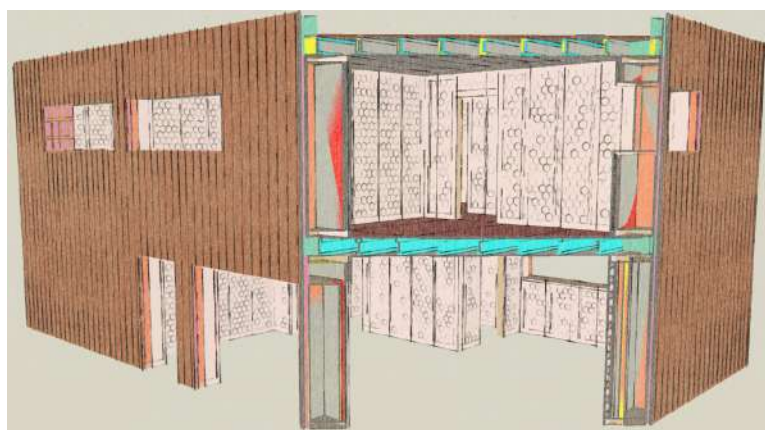


FIGURE 4.31 – Exemple de modélisation 3D - Coupe dans la construction ArgiMob (Delvenne F. 2016)

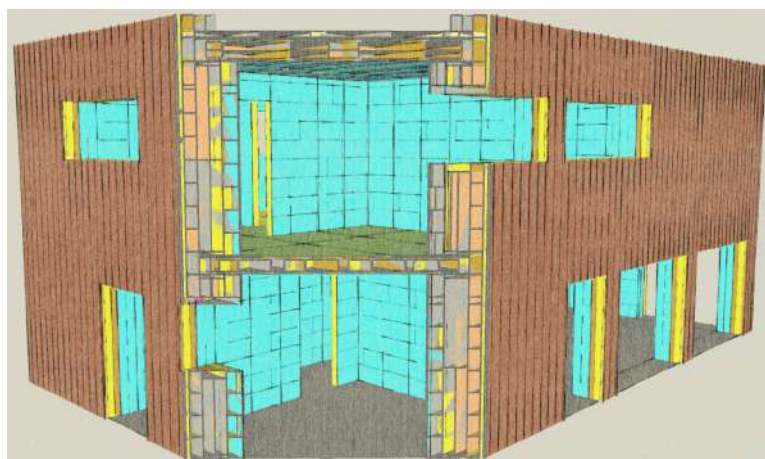


FIGURE 4.32 – Exemple de modélisation 3D - Coupe dans la construction IsoHemp (Delvenne F. 2016)

QUANTITE DE MATERIAUX MIS EN ŒUVRE DANS LA CONSTRUCTION "TRADITIONNELLE" PAR CLOISON TYPE									
Type de parois	Type de matériaux	Surface [m²]	Total entier [m³]	Total découpé [m³]	Total utilisé [m³]	Total produit [m³]	Durée de vie [ans]	Prix hors TVA	Détails éventuels
Cloisons intérieures	Blocs de béton (14)	138,349	17,273	2,09	19,363	22,449	Plus de 50 ans	285,5-371 €/m³ (produit et pose)	-
	Plâtre	250,576	1,95	0,556	2,506	3,555	50	31-39 €/m² (produit et pose)	Plaques Gyproc-A (carton plâtre)
Type de parois	Type de matériaux	Surface [m²]	Total entier [m³]	Total découpé [m³]	Total utilisé [m³]	Total produit [m³]	Durée de vie [ans]	Prix hors TVA	Détails éventuels
Cloisons extérieures	Briques	199,701	17,282	0,691	17,973	18,621	Plus de 50 ans	95-112 €/m² (produit et pose)	Briques étirées
	Isolation - laine minérale	215,11	19,344	23,678	43,022	104,208	Plus de 50 ans	23,5-30,5 €/m² (produit et pose)	-
	Blocs de béton (19)	160,217	28,51	1,927	30,437	34,212	Plus de 50 ans	270-320,5 €/m³ (produit et pose)	-
	Béton (linteaux)	-	-	-	-	1,019	Plus de 50 ans	86,5-99 €/m³ (produit et pose)	-
Type de parois	Plâtre	162,455	1,035	0,586	1,621	2,925	50	31-39 €/m² (produit et pose)	Plaques Gyproc-A (carton plâtre)
Type de parois	Type de matériaux	Surface [m²]	Total entier [m³]	Total découpé [m³]	Total utilisé [m³]	Total produit [m³]	Durée de vie [ans]	Prix hors TVA	Détails éventuels
Plancher	Isolation - laine minérale	82,092	7,29	0,92	8,21	10,53	Plus de 50 ans	24-28 €/m² (produit et pose)	-
	Dalle de compression	82,011	-	-	-	4,667	Plus de 50 ans	4-7 €/m² (produit et pose)	-
	Revêtement de sol	82,011	-	-	-	1,23	30 ans	39-57 €/m² (produit et pose)	Carrelage
	Poutrelles	-	-	-	-	0,055	Plus de 50 ans	52-57 €/m² (produit et pose)	-
	Hourdis	-	-	-	-	4,187	Plus de 50 ans	53,5-66 €/m² (produit et pose)	-
Type de parois	Plâtre	70,817	0,36	0,346	0,706	0,96	50	31-39 €/m² (produit et pose)	Plaques Gyproc-A (carton plâtre)
Type de parois	Type de matériaux	Surface [m²]	Total entier [m³]	Total découpé [m³]	Total utilisé [m³]	Total produit [m³]	Durée de vie [ans]	Prix hors TVA	Détails éventuels
Toiture	Plâtre	73,707	0,315	0,424	0,739	1,11	50	31-39 €/m² (produit et pose)	Plaques Gyproc-A (carton plâtre)
	Isolation - laine minérale	79,161	8,208	1,292	9,5	11,52	Plus de 50 ans	21-27 €/m² (produit et pose)	-
	Dalle de béton	86,437	-	-	-	17,287	Plus de 50 ans	21,5-40,5 €/m² (produit et pose)	-
	Membrane bitumineuse	79,253	-	-	-	0,119	10	60-74,5 €/m² (produit et pose)	Bitume-polymère

QUANTITE DE MATERIAUX MIS EN ŒUVRE DANS LA CONSTRUCTION "ISOHEMP" PAR CLOISON TYPE									
Type de parois	Type de matériaux	Surface [m²]	Total entier [m³]	Total découpé[m³]	Total utilisé [m³]	Total produit [m³]	Durée de vie [ans]	Prix hors TVA	Détails éventuels
Cloisons intérieures	Blocs IsoHemp (120)	134,228	13,154	2,953	16,107	20,520	Plus de 50 ans	50 €/m² (produit et pose)	-
	Plâtre	266,000	2,040	0,620	2,660	3,660	50	31-39 €/m² (produit et pose)	Plaques Gyproc-A (carton plâtre)
Type de parois	Type de matériaux	Surface [m²]	Total entier [m³]	Total découpé[m³]	Total utilisé [m³]	Total produit [m³]	Durée de vie [ans]	Prix	Détails éventuels
Cloisons extérieures	Blocs Isohemp (150)	147,960	19,710	2,484	22,194	25,002	Plus de 50 ans	55 €/m² (produit et pose)	-
	Blocs Isohemp (120)	184,383	19,807	2,319	22,126	25,035	Plus de 50 ans	50 €/m² (produit et pose)	-
	Plâtre	160,600	1,065	0,541	1,606	2,940	50	31-39 €/m² (produit et pose)	Plaques Gyproc-A (carton plâtre)
	Bois pour linteaux - montants de l'ossature - lisses hautes - lisses basses	35,412	-	-	-	6,956	Plus de 50 ans	70,5-83,5 €/m² (produit et pose)	Bois type Douglas
	Laine de chanvre	257,710	17,856	7,915	25,771	36,864	50	113,5-139,5 €/m³ (produit et pose)	Panneau de BioFib Chanvre
Type de parois	Lattes et contre-lattes	68,568	-	-	-	1,391	Plus de 50 ans	10,5-12,5 €/m² (produit et pose)	-
	Bardage	192,394	-	-	-	3,848	20	107,5-158,5 €/m² (produit et pose)	Bardage en cèdre
Type de parois	Type de matériaux	Surface [m²]	Total entier [m³]	Total découpé[m³]	Total utilisé [m³]	Total produit [m³]	Durée de vie [ans]	Prix	Détails éventuels
Plancher	Blocs Isohemp (150)	73,820	9,882	1,191	11,073	12,177	Plus de 50 ans	35,7 €/m² (produit et pose)	-
	Montants - Poutres	-	-	-	-	1,505	Plus de 50 ans	765 €/m³ (!) (produit et pose)	Lamellé-collé
	Plâtre	82,100	0,3	0,521	0,821	1,23	50	31-39 €/m² (produit et pose)	Plaques Gyproc-A (carton plâtre)
	OSB	88,605	0,96	0,812	1,772	1,98	Plus de 50 ans	17,5-25 €/m² (produit et pose)	OSB2
	Poutres en I - Semelles	-	-	-	-	1,214	Plus de 50 ans	8,5 €/m (produit et pose)	Lamellé-collé
Type de parois	Poutres en I - Ames	-	-	-	-	0,434	Plus de 50 ans	=> 289 m au total	OSB2
	Revêtement de sol	69,472	-	-	-	0,834	Plus de 50 ans	86-100 €/m² (produit et pose)	Parquet bois massif
Type de parois	Type de matériaux	Surface [m²]	Total entier [m³]	Total découpé[m³]	Total utilisé [m³]	Total produit [m³]	Durée de vie [ans]	Prix	Détails éventuels
Toiture	Laine de chanvre	171,256	11,52	5,606	17,126	21,168	50	113,5-139,5 €/m³ (produit et pose)	Panneau de BioFib Chanvre
	Montants - Poutres	18,046	-	-	-	1,805	Plus de 50 ans	765 €/m³ (!) (produit et pose)	Lamellé-collé
	Plâtre	68,383	0,3	0,384	0,684	1,26	50	31-39 €/m² (produit et pose)	Plaques Gyproc-A (carton plâtre)
	OSB	93,910	1,2	0,678	1,878	1,98	Plus de 50 ans	17,5-25 €/m² (produit et pose)	OSB2
	Poutres en I - Semelles	-	-	-	-	1,217	Plus de 50 ans	8,5 €/m (produit et pose)	Lamellé-collé
	Poutres en I - Ames	-	-	-	-	0,579	Plus de 50 ans	=> 289 m au total	OSB2
	Panneaux isolants	91,198	6,912	0,384	7,296	8,467	Plus de 50 ans	24-32 €/m² (produit et pose)	Polystyrène
Type de parois	Membrane bitumineuse	86,052	-	-	-	0,129	10	60-74,5 €/m² (produit et pose)	Bitume-polymère
	Acrotère	15,716	-	-	-	1,572	Plus de 50 ans	765 €/m³ (!) (produit et pose)	Lamellé collé

QUANTITE DE MATERIAUX MIS EN ŒUVRE DANS LA CONSTRUCTION "ARGIMOB" PAR CLOISON TYPE									
Type de parois	Type de matériaux	Surface [m ²]	Total entier [m ³]	Total découpé [m ³]	Total utilisé [m ³]	Total produit [m ³]	Durée de vie [ans]	Prix hors TVA	Détails éventuels
Cloisons intérieures	Lisses / montants en bois	109,26	-	-	-	5,463	Plus de 50 ans	75 €/m ² - parois intérieures Argimob	Bois type Douglas
	Isolation - laine minérale	89,982	3,12	1,379	4,499	7,23	Plus de 50 ans		-
	Galets d'argile	157,811	-	-	-	7,891	Plus de 50 ans		Argibat
	Plâtre	261,123	2,16	0,455	2,615	3,6	50		Plaques de carton-plâtre
Type de parois	Type de matériaux	Surface [m ²]	Total entier [m ³]	Total découpé [m ³]	Total utilisé [m ³]	Total produit [m ³]	Durée de vie [ans]	Prix hors TVA	Détails éventuels
Cloisons extérieures	Plâtre	163,017	1,14	0,493	1,633	2,85	50	140-145 €/m ² - parois extérieures Argimob	Plaques de carton-plâtre
	Lisses / montants / linteaux en bois	19,192	-	-	-	7,792	Plus de 50 ans		Bois type Douglas
	Galets d'argile	91,341	-	-	-	4,567	Plus de 50 ans		Argibat
	Panneaux OSB	133,108	0	2,127	2,127	4,608	Plus de 50 ans		OSB2
	Ossature bois	12,552	-	-	-	3,766	Plus de 50 ans		Bois type Douglas
	Cellulose insufflée	128,494	-	-	-	38,548	Plus de 50 ans		-
	Panneaux de contreventement	148,957	1,579	0,803	2,382	4,944	Plus de 50 ans		-
	Lattes et contre-lattes	64,4	-	-	-	1,288	Plus de 50 ans		-
	Bardage	191,3	-	-	-	3,826	20		Bardage en cèdre
Type de parois	Type de matériaux	Surface [m ²]	Total entier [m ³]	Total découpé [m ³]	Total utilisé [m ³]	Total produit [m ³]	Durée de vie [ans]	Prix hors TVA	Détails éventuels
Plancher	Ceinture en lamellé-collé	13,643	-	-	-	1,637	Plus de 50 ans	45 €/m ² - plancher MJI	-
	Panneaux OSB	84,441	1,14	0,549	1,689	2,46	Plus de 50 ans		OSB2
	Poutres en I - Semelle	-	-	-	-	1,287	Plus de 50 ans		Lamellé-collé
	Poutres en I - Ame	-	-	-	-	0,271	Plus de 50 ans		OSB2
	Plâtre	69,936	0,36	0,376	0,736	0,93	50		Plaques de carton-plâtre
	Revêtement de sol	74,389	-	-	-	0,893	Plus de 50 ans	86-100 €/m ² (produit et pose)	Parquet bois massif
Type de parois	Type de matériaux	Surface [m ²]	Total entier [m ³]	Total découpé [m ³]	Total utilisé [m ³]	Total produit [m ³]	Durée de vie [ans]	Prix hors TVA	Détails éventuels
Toiture	Ceinture en lamellé-collé	13,643	-	-	-	1,637	Plus de 50 ans	80 €/m ² - caissons pour toiture plate	-
	Panneaux OSB	81,128	0,81	0,406	1,216	1,8	Plus de 50 ans		OSB2
	Panneaux de fibres de bois	91,231	0,9	0,468	1,368	1,485	Plus de 50 ans		-
	Membrane bitumineuse	91,202	-	-	-	0,137	10		Bitume-polymère
	Cellulose insufflée	77,165	-	-	-	18,519	Plus de 50 ans		-
	Plâtre	72,946	0,33	0,399	0,729	1,215	50		Plaques de carton-plâtre
	Poutres en I - Semelle	-	-	-	-	1,128	Plus de 50 ans		Lamellé-collé
	Poutres en I - Ame	-	-	-	-	0,292	Plus de 50 ans	774 €/m ³ (produit et pose)	OSB2
	Acrotère	10,407	-	-	-	1,977	Plus de 50 ans		Lamellé-collé

QUANTITE DE MATERIAUX MIS EN ŒUVRE DANS LA CONSTRUCTION "PAILLETECH" PAR CLOISON TYPE									
Type de parois	Type de matériaux	Surface [m²]	Total entier [m³]	Total découpé [m³]	Total utilisé [m³]	Total produit [m³]	Durée de vie [ans]	Prix hors TVA	Détails éventuels
Cloisons intérieures	Bois massif Lisses hautes et basses	128,694	-	-	-	18,017	Plus de 50 ans	110 €/m² (produit et pose)	Bois type Douglas
		6,214	-	-	-	0,87	Plus de 50 ans		Bois type Douglas
Type de parois	Type de matériaux	Surface [m²]	Total entier [m³]	Total découpé [m³]	Total utilisé [m³]	Total produit [m³]	Durée de vie [ans]	Prix hors TVA	Détails éventuels
Cloisons extérieures	Paille	127,584	-	-	-	58,689	Plus de 50 ans		Ballots de (460x360x800 mm)
	Ossature bois	33,89805	-	-	-	11,433	Plus de 50 ans	220 €/m² (produit et pose)	Bois type Douglas
	Pare-pluie rigide	172,556	1,776	1,007	2,783	6,096	Plus de 50 ans		Panneaux de fibres de bois
	Enduit de terre	224,686	-	-	-	8,987	Plus de 50 ans		Argibat
	Finition intérieure	224,686	-	-	-	0,674	15 ans (nouvelle couche hypothétique)	50 €/m² (produit et pose)	Argibat
	Lattes et contre-lattes	49,224	-	-	-	0,984	Plus de 50 ans	10,5-12,5 €/m² (produit et pose)	-
	Bardage	196,874	-	-	-	3,937	20 ans	107,5-158,5 €/m² (produit et pose)	Bardage en cèdre
Type de parois	Type de matériaux	Surface [m²]	Total entier [m³]	Total découpé [m³]	Total utilisé [m³]	Total produit [m³]	Durée de vie [ans]	Prix hors TVA	Détails éventuels
Plancher	Bois massif Finition	96,158	-	-	-	17,309	Plus de 50 ans	130 €/m² (produit et pose)	-
		69,42	-	-	-	0,833	Plus de 50 ans	86-100 €/m² (produit et pose)	Parquet bois massif
Type de parois	Type de matériaux	Surface [m²]	Total entier [m³]	Total découpé [m³]	Total utilisé [m³]	Total produit [m³]	Durée de vie [ans]	Prix hors TVA	Détails éventuels
Toiture	Finition intérieure	96,329	0,9	0,064	0,964	2,112	Plus de 50 ans		Volige rabotée
	Ossature bois	11,605	-	-	-	5,338	Plus de 50 ans		Bois type Douglas
	Paille	84,672	-	-	-	38,949	Plus de 50 ans	210 €/m² (produit et pose)	Ballots de (460x360x800 mm)
	Pare-pluie rigide	143,004	1,44	0,849	2,289	4,032	Plus de 50 ans		Panneaux de fibres de bois
	Membrane bitumineuse	95,52	-	-	-	0,143	10 ans	60-74,5 €/m² (produit et pose)	Bitume-polymère
	Acrotère	4,633	-	-	-	0,278	Plus de 50 ans	150 €/ml (produit et pose)	Bois type Douglas

5

Résultats - Construction traditionnelle

5.1 Cloisons extérieures

Nous observons dans un premier temps les émissions des cloisons extérieures. Dans ces premiers graphiques, les quantités prises en compte sont les quantités réellement mises en œuvre dans le bâtiment ; les découpes ne rentrent pas en ligne de compte. Vous trouverez le tableau détaillé des résultats fournis par le logiciel OpenLCA en annexes (10.8).

Grâce aux Figures 5.1 à 5.4, nous constatons que la brique est le matériau ayant les émissions les plus importantes pour trois des quatre indicateurs, soit le réchauffement climatique (50% des émissions totales de la paroi), la diminution de la couche d'ozone (62% des émissions totales) et l'eutrophisation (41% des émissions totales). Elle est de plus le second matériau ayant l'impact le plus négatif en terme d'acidification (37% des émissions totales). Dans cette catégorie d'impact, elle est dépassée par l'isolation (laine minérale) qui est quant à elle à l'origine de 40% des émissions totales de ce critère. Les résultats obtenus par la brique peuvent s'expliquer par la quantité importante mise en œuvre et par la cuisson nécessaire au matériau. Les blocs de béton ont également un impact non négligeable, de l'ordre de 20 % des émissions totales pour chaque critère étudié.

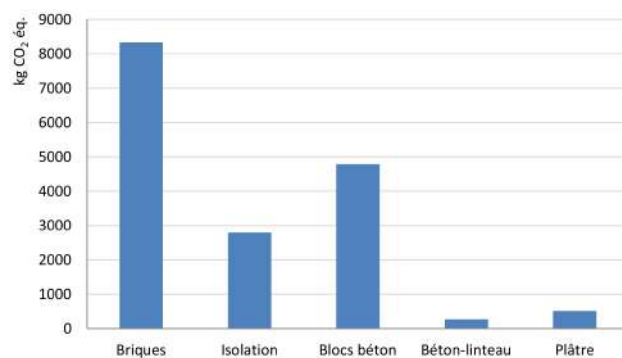


FIGURE 5.1 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison extérieure traditionnelle

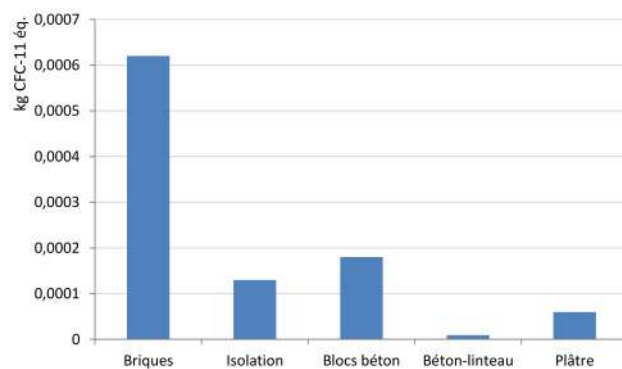


FIGURE 5.2 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la cloison extérieure traditionnelle

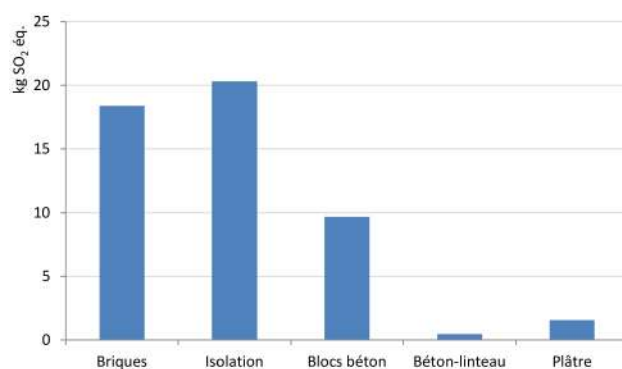


FIGURE 5.3 – Acidification - Émissions des constituants de la cloison extérieure traditionnelle

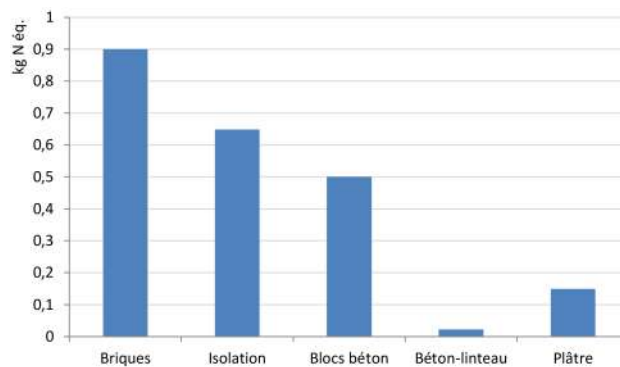


FIGURE 5.4 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison extérieure traditionnelle

Observons à présent les émissions des cloisons extérieures mais cette fois en comparant les quantités d'éléments réellement utilisées et les quantités produites (les déchets dus aux découpes sont donc ici pris en compte).

Les différences (Figures 5.5 à 5.8) ne sont pas particulièrement significatives pour l'ensemble des matériaux, à l'exception de l'isolation. Selon moi, cette différence est due à la taille de l'élément type. Les blocs de béton et les briques, par exemple, sont de plus petites dimensions. Ainsi, la quantité de découpe représente un volume faible. Dans le cas de l'isolation, les panneaux ont des dimensions relativement importantes. La pièce utilisée représente parfois moins de la moitié de l'élément découpé. L'hypothèse la plus défavorable ayant été sélectionnée (toute découpe est considérée comme un déchet, peu importe les dimensions de l'élément restant), il semble logique de parvenir à un tel résultat.

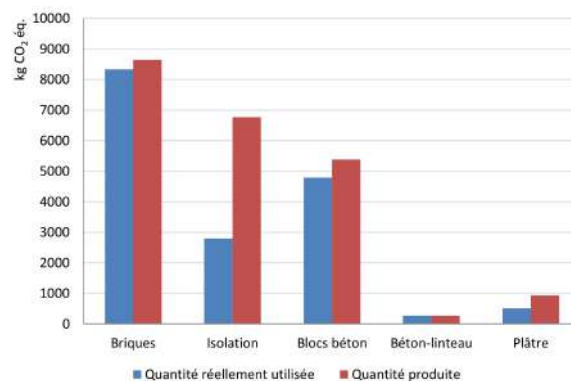


FIGURE 5.5 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison extérieure traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites

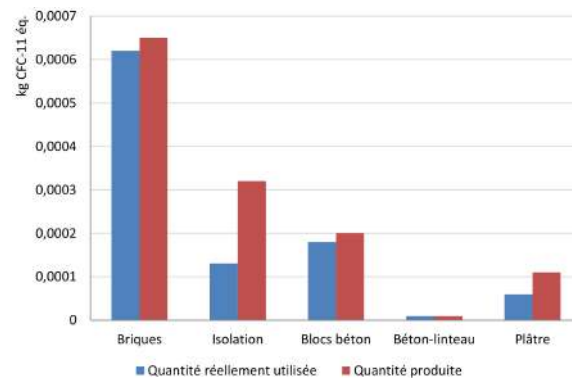


FIGURE 5.6 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions des constituants de la cloison extérieure traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites

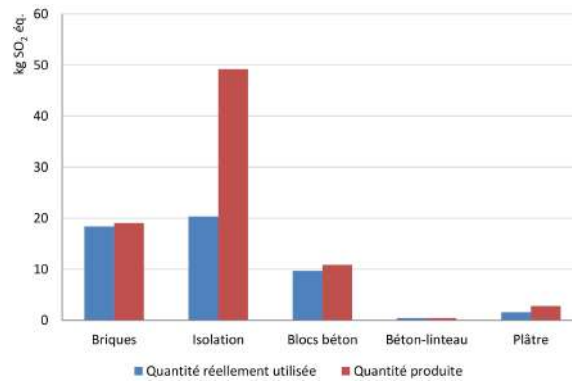


FIGURE 5.7 – Acidification - Émissions des constituants de la cloison extérieure traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites

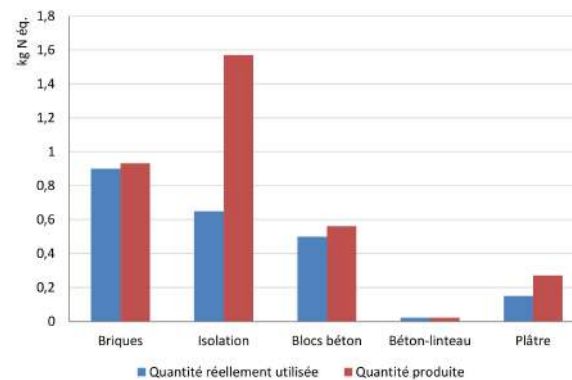


FIGURE 5.8 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison extérieure traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites

5.2 Cloisons intérieures

Nous observons en premier lieu les émissions des quantités réellement mise en œuvre pour réaliser les cloisons intérieures (Figures 5.9 à 5.12). Ce sont les blocs de béton qui ont les émissions les plus importantes pour l'ensemble des quatre critères. Elles sont, selon l'impact sélectionné, de deux à quatre fois plus importantes que celles du plâtre. Cela semble logique lorsque nous comparons leur processus de fabrication. Un des éléments les plus défavorables pour le béton est selon moi la fabrication du ciment dont la demande en énergie est relativement importante. Le plâtre étant réalisé à base de gypse, sa production ne nécessite aucune cuisson, ce qui, à mon sens, explique ce résultat.

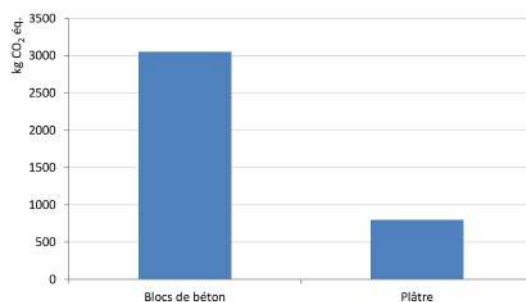


FIGURE 5.9 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison intérieure traditionnelle

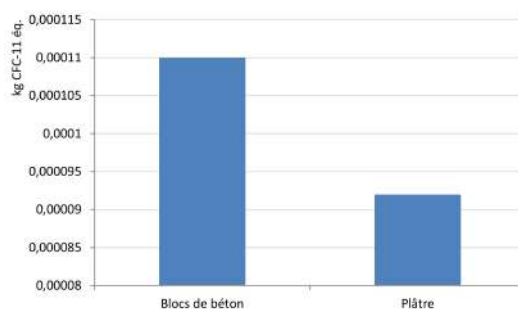


FIGURE 5.10 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions des constituants de la cloison intérieure traditionnelle

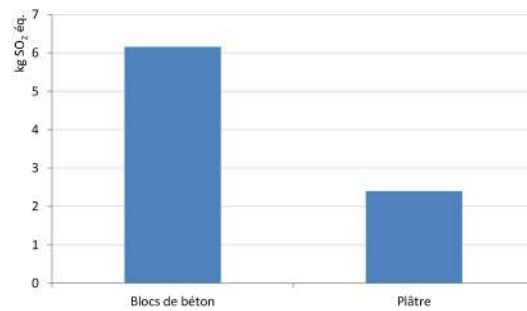


FIGURE 5.11 – Acidification - Émissions des constituants de la cloison intérieure traditionnelle

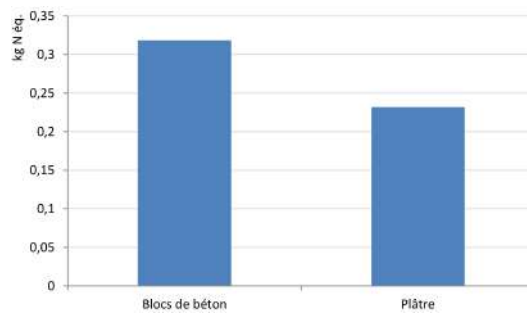


FIGURE 5.12 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison intérieure traditionnelle

En ce qui concerne la différence entre les quantités réellement utilisées et les quantités produites (Figures 5.13 à 5.16), elle reste relativement réduite. On observe que la différence est du même ordre de grandeur pour les deux matériaux, soit une augmentation de 20% de chacun des types d'émissions.

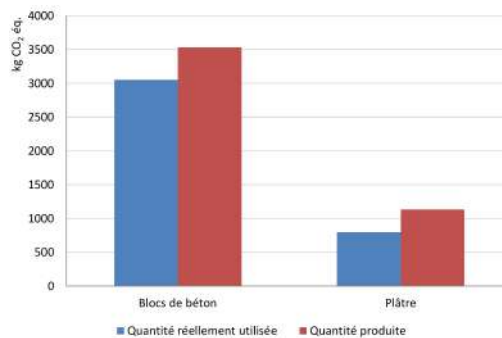


FIGURE 5.13 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison intérieure traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites

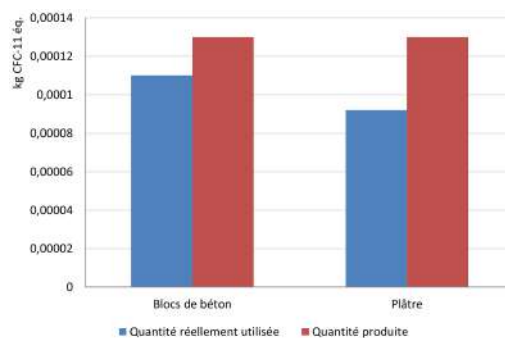


FIGURE 5.14 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions des constituants de la cloison intérieure traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites

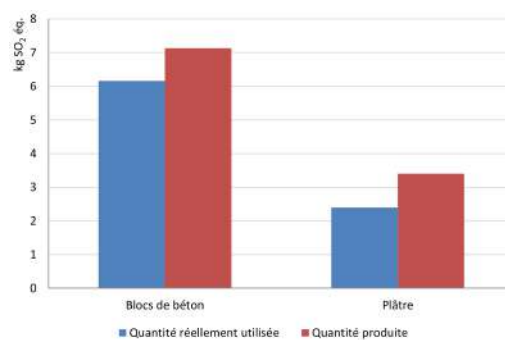


FIGURE 5.15 – Acidification - Émissions des constituants de la cloison intérieure traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites

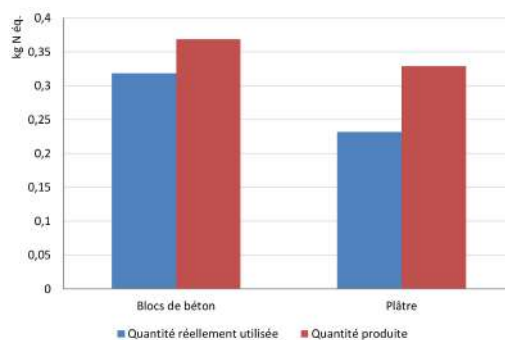


FIGURE 5.16 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison intérieure traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites

5.3 Plancher

En observant les Figures 5.17 à 5.20 qui indiquent les émissions des quantités réellement mises en œuvre dans la construction, nous constatons que le revêtement de sol, soit le carrelage, est le matériau ayant les émissions les plus importantes pour l'ensemble des quatre critères étudiés. Elles représentent ainsi environ 35% des émissions totales dans le cadre du réchauffement climatique, 65 % des émissions à l'origine de la diminution de la couche d'ozone et 40% des émissions du plancher en terme d'acidification et d'eutrophisation. Un tel résultat est dû, me semble-t-il au nombre important d'étapes pour la fabrication de la céramique et plus particulièrement l'étape de cuisson. Les hourdis et le béton de la dalle de compression ne sont pas en reste en ce qui concerne les émissions de dioxyde de carbone. L'isolant synthétique se démarque quant à lui pour deux autres critères, soit l'acidification et l'eutrophisation.

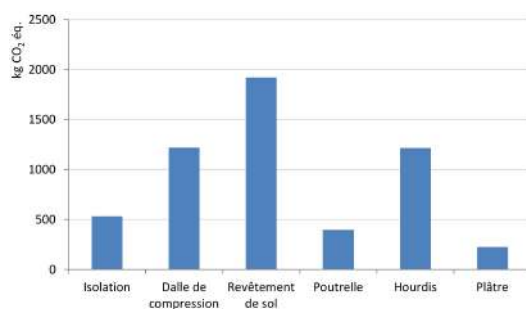


FIGURE 5.17 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants du plancher traditionnel

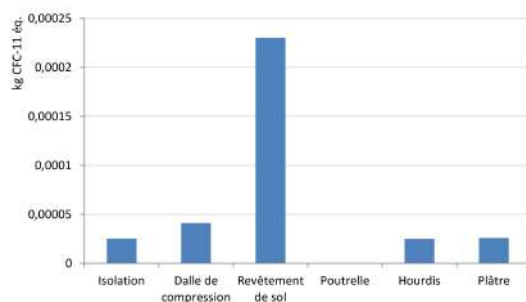


FIGURE 5.18 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants du plancher traditionnel

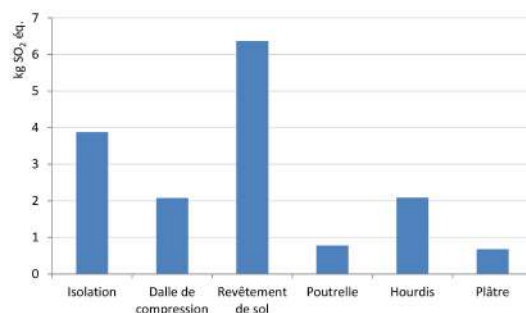


FIGURE 5.19 – Acidification - Émissions des constituants du plancher traditionnel

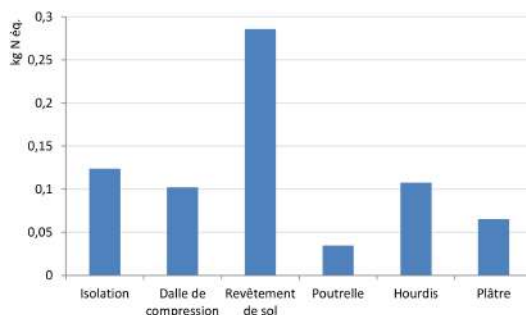


FIGURE 5.20 – Eutrophisation - Émissions des constituants du plancher traditionnel

Si l'on se concentre à présent sur la différence entre les quantités réellement utilisées et les quantités produites (Figures 5.21 à 5.24), nous pouvons constater que les découpes sont relativement peu importantes dans le cas du plancher.

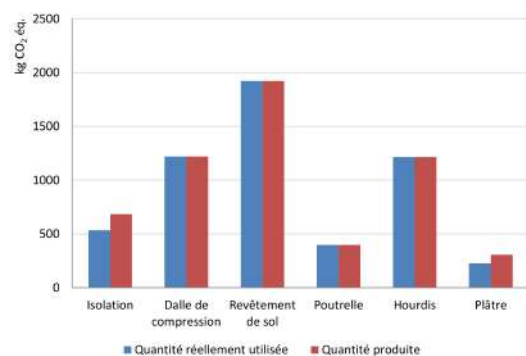


FIGURE 5.21 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants du plancher traditionnel - Quantités utilisées vs. produites

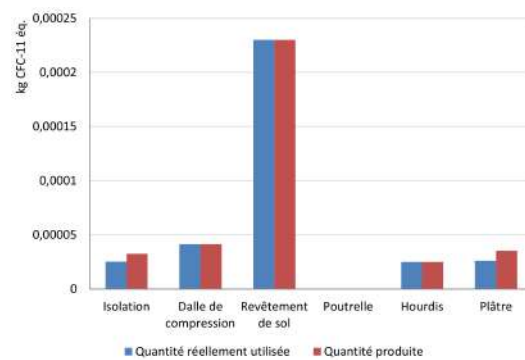


FIGURE 5.22 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions des constituants du plancher traditionnel - Quantités utilisées vs. produites

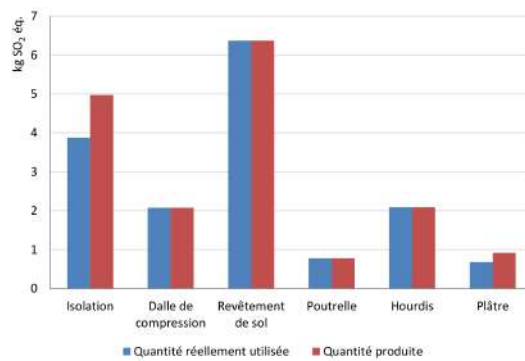


FIGURE 5.23 – Acidification - Émissions des constituants du plancher traditionnel - Quantités utilisées vs. produites

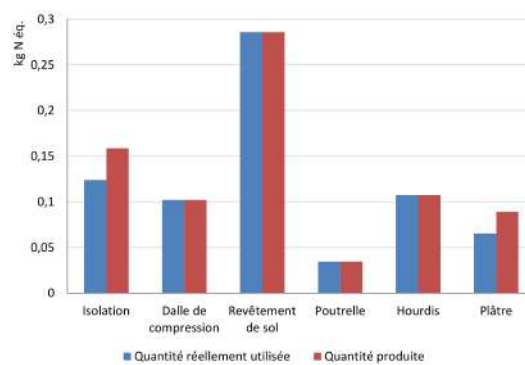


FIGURE 5.24 – Eutrophisation - Émissions des constituants du plancher traditionnel - Quantités utilisées vs. produites

5.4 Toiture

Nous analysons à présent les émissions produites par les quantités réellement mises en œuvre pour la toiture (Figures 5.25 à 5.28). On note que la dalle de béton est le matériau ayant l'impact le plus significatif. La différence avec les émissions des autres constituants de la toiture est clairement marqué. En effet, la dalle de béton constitue à elle seule plus de 80% des émissions à l'origine du réchauffement climatique, plus de 55% de celles responsables de la diminution de la couche d'ozone et des phénomènes d'acidification et eutrophisation. L'isolant synthétique n'est d'ailleurs pas en reste dans ces deux dernières catégories. Finalement, nous pouvons observer que la membrane bitumineuse joue un rôle relativement important dans la diminution de la couche d'ozone.

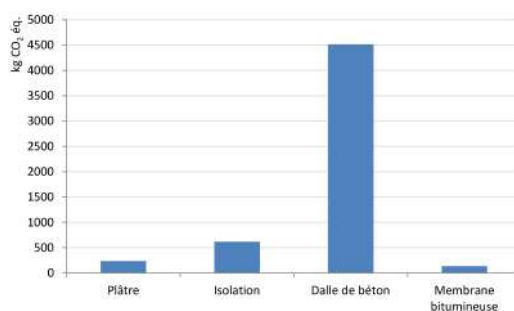


FIGURE 5.25 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la toiture traditionnelle

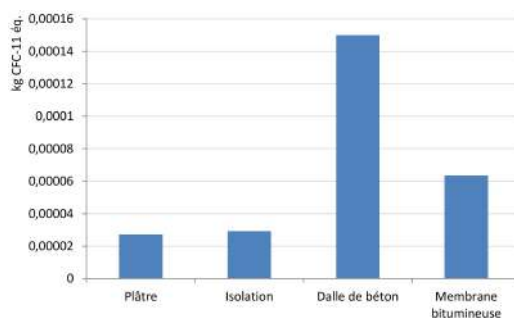


FIGURE 5.26 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la toiture traditionnelle

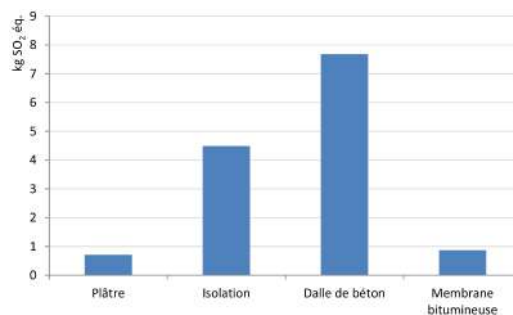


FIGURE 5.27 – Acidification - Émissions des constituants de la toiture traditionnelle

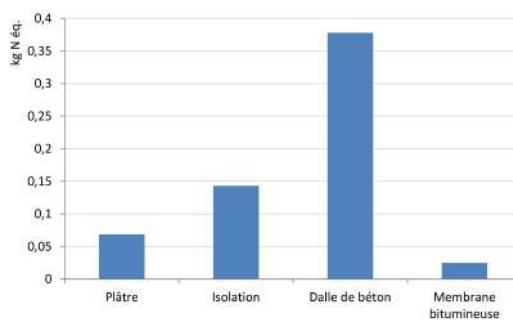


FIGURE 5.28 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la toiture traditionnelle

Si l'on s'intéresse à présent à la différence entre les quantités réellement utilisées et les quantités produites (Figures 5.29 à 5.32), nous pouvons constater que les découpes sont relativement peu importantes dans le cas de la toiture.

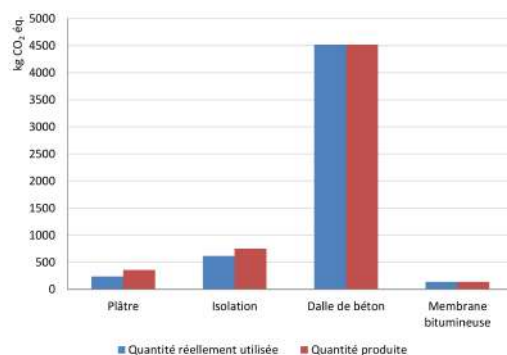


FIGURE 5.29 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la toiture traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites

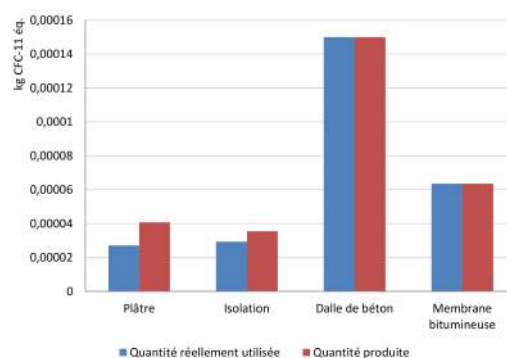


FIGURE 5.30 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions des constituants de la toiture traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites

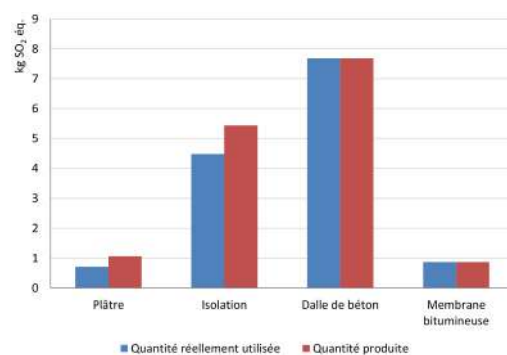


FIGURE 5.31 – Acidification - Émissions des constituants de la toiture traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites

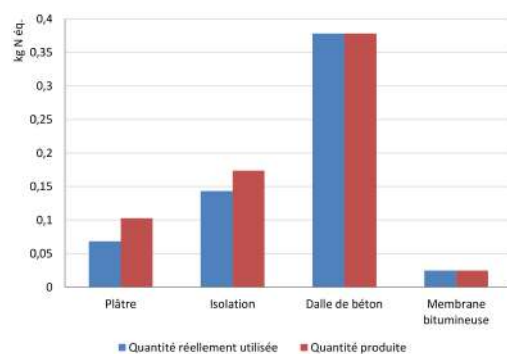


FIGURE 5.32 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la toiture traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites

5.5 Maison complète

Analysons maintenant la construction traditionnelle dans son ensemble. En premier lieu, nous pouvons comparer l'impact de chaque type de cloison grâce aux Figures 5.33 à 5.36. Nous remarquons donc que ce sont les cloisons extérieures qui sortent du lots, de manière défavorable, puisqu'elles ont les émissions les plus importantes pour l'ensemble des quatre critères étudiés. Elles représentent en effet plus de 50% de l'impact du bâtiment sur le réchauffement climatique, près de 60% des émissions influençant la diminution de la couche d'ozone et environ 55% des émissions provoquant acidification et eutrophisation.

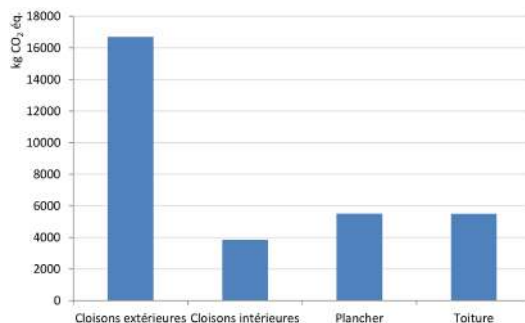


FIGURE 5.33 – Réchauffement climatique - Émissions des parois de la construction traditionnelle

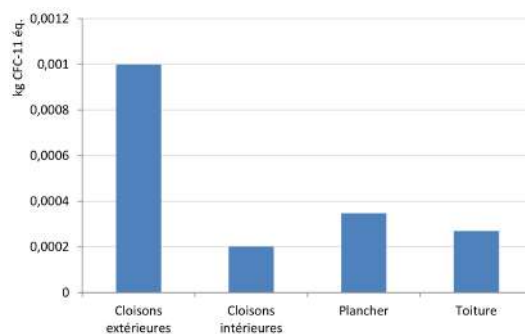


FIGURE 5.34 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des parois de la construction traditionnelle

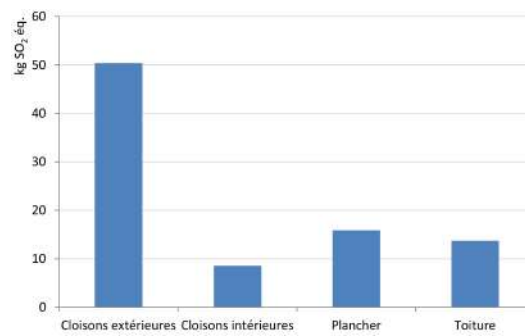


FIGURE 5.35 – Acidification - Émissions des parois de la construction traditionnelle

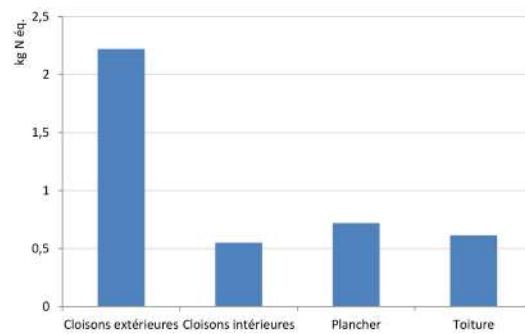


FIGURE 5.36 – Eutrophisation - Émissions des parois de la construction traditionnelle

A présent, nous pouvons entrer dans les détails en analysant les émissions dues à chaque type de matériau différent rencontré dans ce type de construction (Figures 5.37 à 5.40). Il n'y a aucun doute sur le fait que les briques et le béton (coulé et sous forme de blocs) sont les deux matériaux à l'origine de l'essentiel des émissions. A eux deux, ils représentent en effet 70% des émissions de dioxyde de carbone de la maison, 60% des émissions de trichlorofluorométhane (CFC-11), 50% des émissions de dioxyde de soufre et 55% des émissions d'azote.

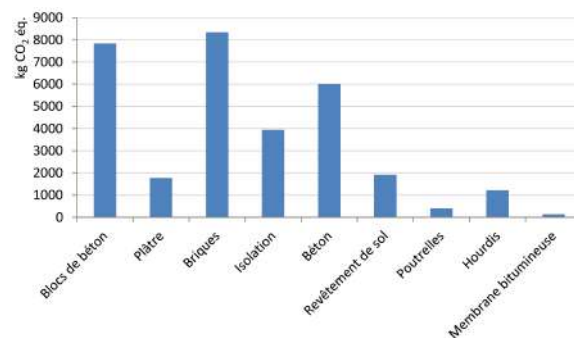


FIGURE 5.37 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la construction traditionnelle

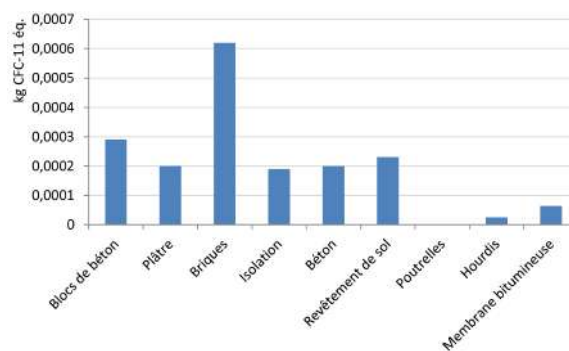


FIGURE 5.38 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions des constituants de la construction traditionnelle

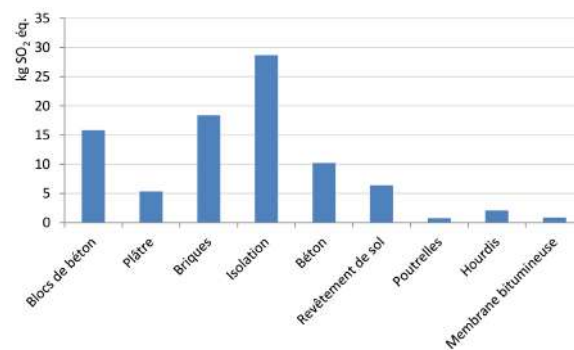


FIGURE 5.39 – Acidification - Émissions des constituants de la construction traditionnelle

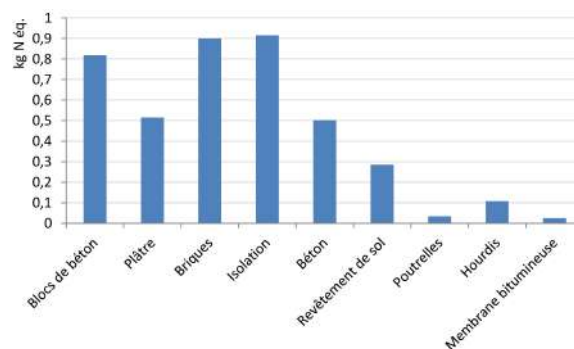


FIGURE 5.40 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la construction traditionnelle

Enfin, si l'on se concentre sur la différence entre les quantités réellement utilisées et les quantités produites (Figures 5.41 à 5.44), nous pouvons constater que l'isolation reste le matériau qui présente la différence la plus marquée.

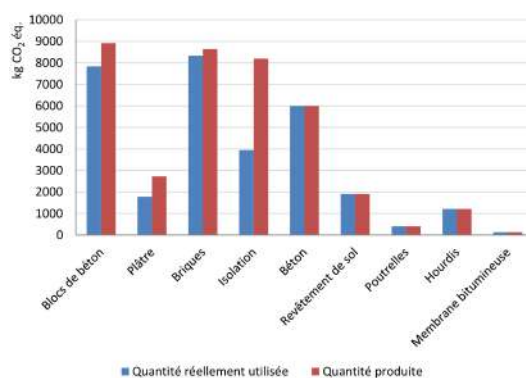


FIGURE 5.41 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la construction traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites

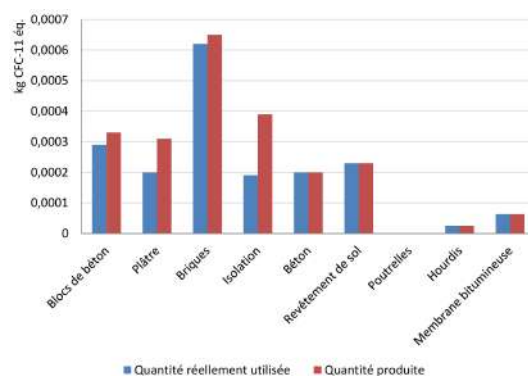


FIGURE 5.42 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions des constituants de la construction traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites

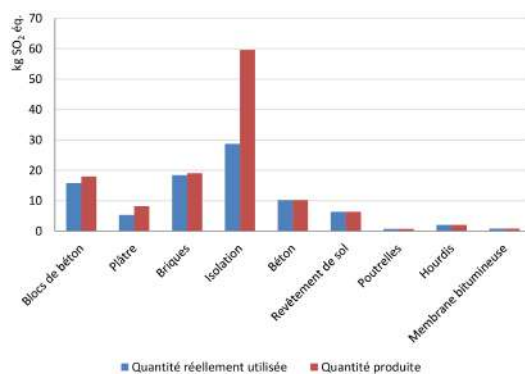


FIGURE 5.43 – Acidification - Émissions des constituants de la construction traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites

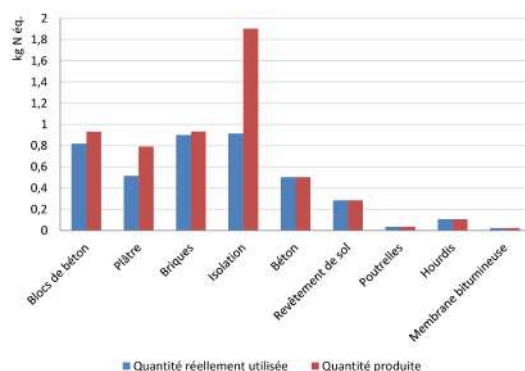


FIGURE 5.44 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la construction traditionnelle - Quantités utilisées vs. produites

5.6 Phase d'utilisation

Dans la phase d'utilisation, l'énergie pour le chauffage et les divers remplacements sont donc comptabilisés. C'est bien évidemment l'énergie pour le chauffage pour les 50 années de durée de vie de la maison qui est l'élément le plus impactant comme le montre les Figures 5.45 à 5.48.

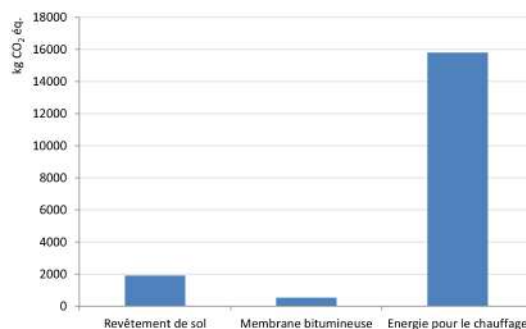


FIGURE 5.45 – Réchauffement climatique - Émissions de la construction traditionnelle en phase d'utilisation (50 ans)

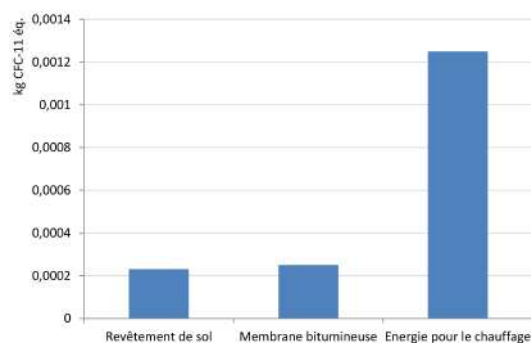


FIGURE 5.46 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions de la construction traditionnelle en phase d'utilisation (50 ans)

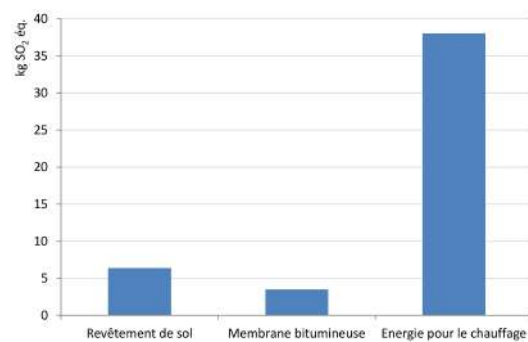


FIGURE 5.47 – Acidification - Émissions de la construction traditionnelle en phase d'utilisation (50 ans)

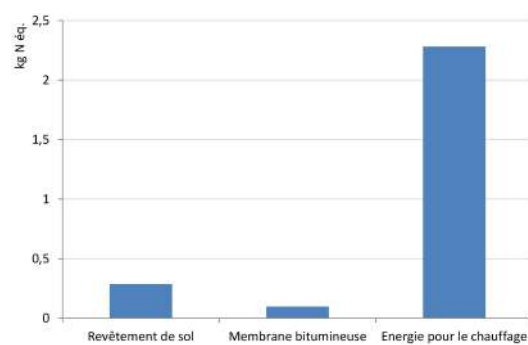


FIGURE 5.48 – Eutrophisation - Émissions de la construction traditionnelle en phase d'utilisation (50 ans)

5.7 Coût du cycle de vie

Le prix de la construction (produits et pose) est tout d'abord déterminé. Il s'élève à 82 716.65 € pour la maison complète, soit près de 41 000 € pour les cloisons extérieures, 15 000 € pour les cloisons intérieures, 14 000 € pour le plancher et 12 000 € pour la toiture.

Si nous nous concentrons maintenant sur l'argent à posséder au temps présent afin d'assurer la construction de la maison, le paiement de l'énergie pour le chauffage et les éventuels remplacements, trois scénarios ont été mis en œuvre. Ils permettent de donner un ordre de grandeur minimum et maximum de la somme à posséder actuellement.

Le scénario de base considère un taux d'actualisation réel nominal de 4%, un taux de croissance des prix de l'énergie de 4% et un taux de croissance des prix pour les matériaux et les travaux de 2,5%. La valeur nette actuelle à posséder dans ce cas est de 103 225 €.

Le premier scénario alternatif considère un taux d'actualisation réel nominal de 6%, un taux de croissance des prix de l'énergie de 4% et un taux de croissance des prix pour les matériaux et les travaux de 2,5%. La valeur nette actuelle à posséder dans ce cas est de 95 990 €.

Le second scénario alternatif considère un taux d'actualisation réel nominal de 4%, un taux de croissance des prix de l'énergie de 6% et un taux de croissance des prix pour les matériaux et les travaux de 2,5%. La valeur nette actuelle à posséder dans ce cas est de 105 200 €.

Vous trouverez les tableaux reprenant l'ensemble des détails en annexes (10.9).

6

Résultats - Construction IsoHemp

6.1 Cloisons extérieures

Nous analysons tout d'abord les émissions des cloisons extérieures de la paroi IsoHemp grâce aux Figures 6.1 à 6.4. On remarque en premier lieu l'impact négatif des blocs de béton de chanvre en terme de réchauffement climatique, impact qui, de plus, se veut relativement important. Cela s'explique par la quantité importante de chènevotte nécessaire (près de 82 tonnes au total). En effet, pour obtenir 1 tonne de chènevotte, il faut récolter un peu plus de 2 tonnes de paille¹. Ainsi, des quantités importantes de dioxyde de carbone sont absorbées lors de l'étape culturale. Le revers de la médaille est cependant visible dans les résultats obtenus pour les trois autres critères, où le béton de chanvre représente les impacts les plus conséquents. On peut attribuer ces chiffres selon moi au type d'agriculture choisi et aux pesticides / engrais / herbicides etc employés dans les champs. Au vu de la quantité importante de paille à produire, la quantité épandue est loin d'être négligeable.

1. Le chanvre est une plante qui se présente sous la forme d'une tige. Ainsi, lors de la récolte, sont récupérées graines (chènevis) et paille. La chènevotte est la partie centrale de la tige. C'est elle qui constitue les granulats de chanvre qui entrent dans la composition des blocs de béton de chanvre IsoHemp.

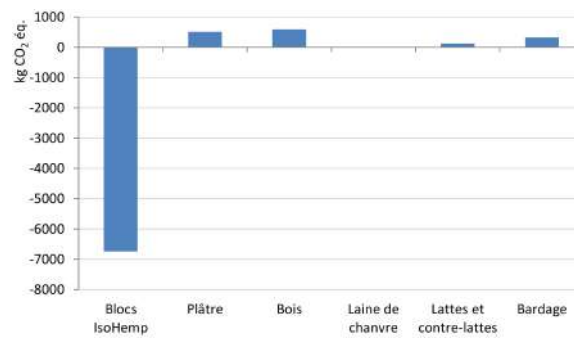


FIGURE 6.1 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison extérieure IsoHemp

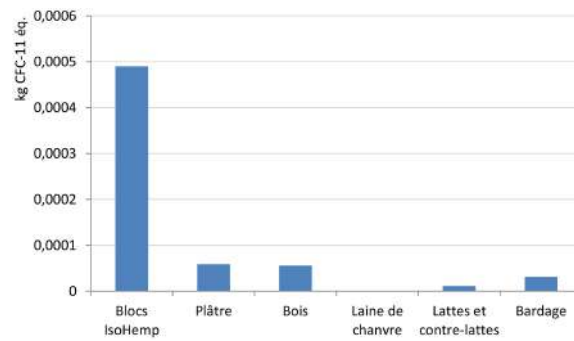


FIGURE 6.2 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la cloison extérieure IsoHemp

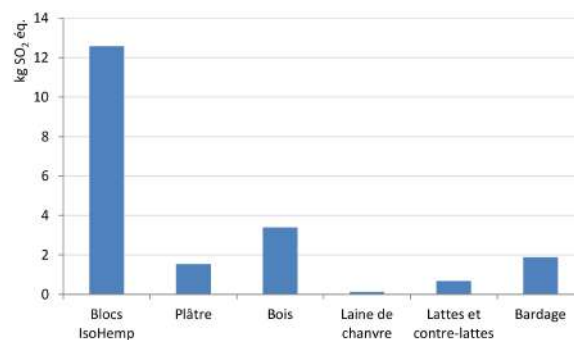


FIGURE 6.3 – Acidification - Émissions des constituants de la cloison extérieure IsoHemp

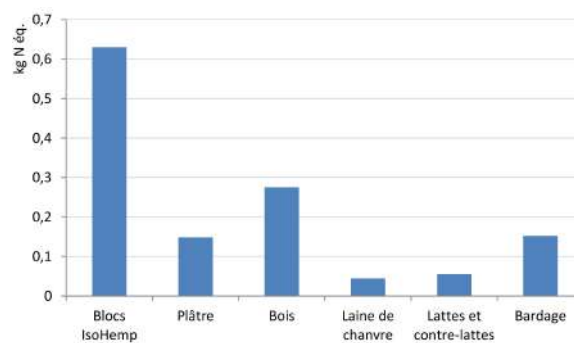


FIGURE 6.4 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison extérieure IsoHemp

Si nous nous intéressons à la différence entre les quantités réellement utilisées et les quantités produites (Figures 6.5 à 6.8), nous pouvons constater que les découpes restent relativement peu importantes et que les émissions augmentent peu.

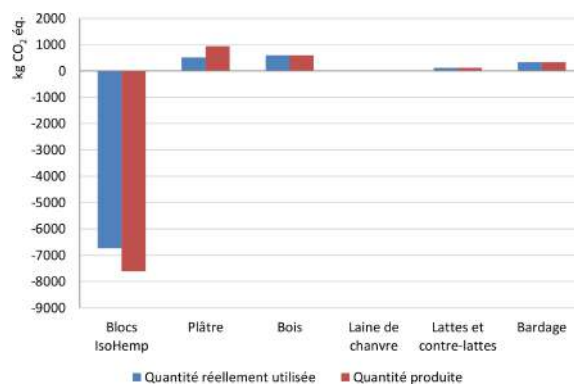


FIGURE 6.5 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison extérieure IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites

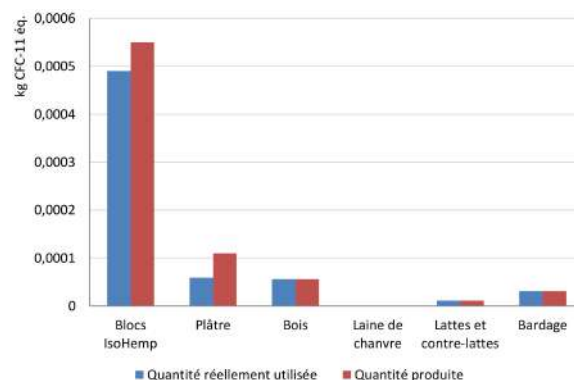


FIGURE 6.6 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions des constituants de la cloison extérieure IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites

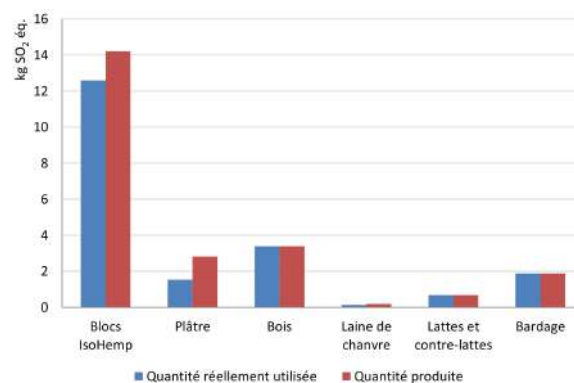


FIGURE 6.7 – Acidification - Émissions des constituants de la cloison extérieure IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites

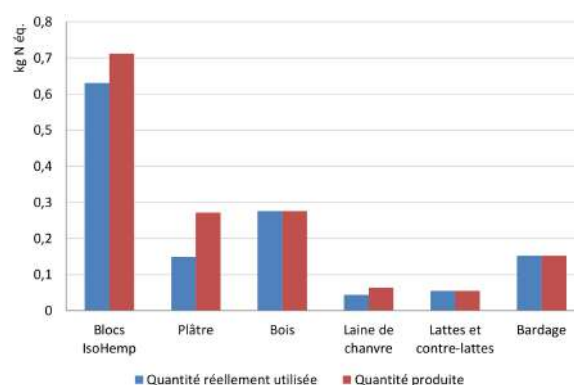


FIGURE 6.8 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison extérieure IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites

6.2 Cloisons intérieures

Les Figures 6.9 à 6.12 représentent les émissions des quantités réellement mises en œuvre dans la construction. Nous pouvons à nouveau constater à quel point le béton de chanvre peut s'avérer positif en terme de réchauffement climatique mais moins bon en ce qui concerne les trois autres critères d'analyse. Il faut relativiser les résultats car ils convient de noter que, de manière générale, les ordres de grandeurs de chaque critère ne possèdent pas la même amplitude (centaine de kg de gaz ou millième par exemple).

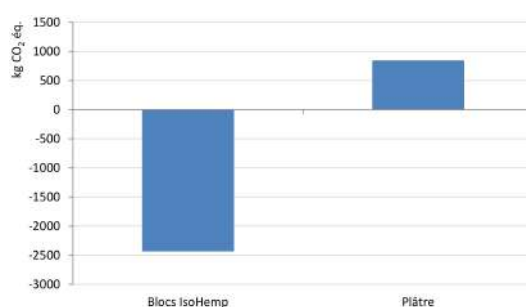


FIGURE 6.9 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison intérieure IsoHemp

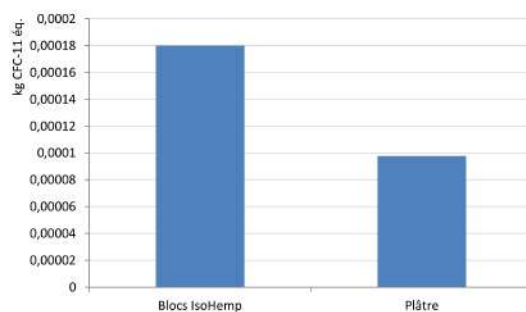


FIGURE 6.10 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la cloison intérieure IsoHemp

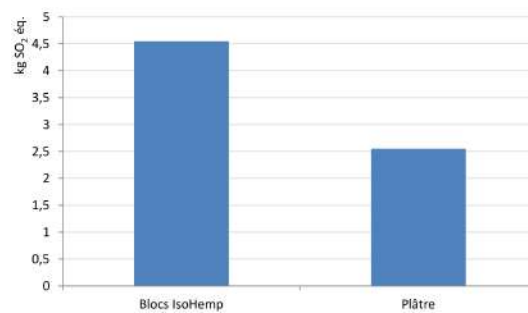


FIGURE 6.11 – Acidification - Émissions des constituants de la cloison intérieure IsoHemp

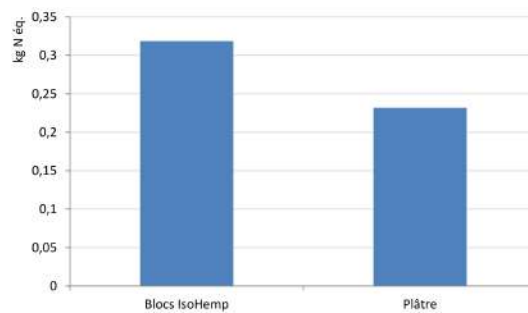


FIGURE 6.12 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison intérieure IsoHemp

Si nous analysons plus en détail la différence entre les quantités réellement utilisées et les quantités produites (Figures 6.13 à 6.16), nous constatons une fois de plus que l'écart est relativement peu important.

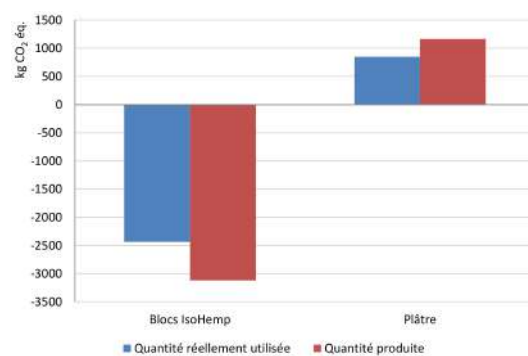


FIGURE 6.13 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison intérieure IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites

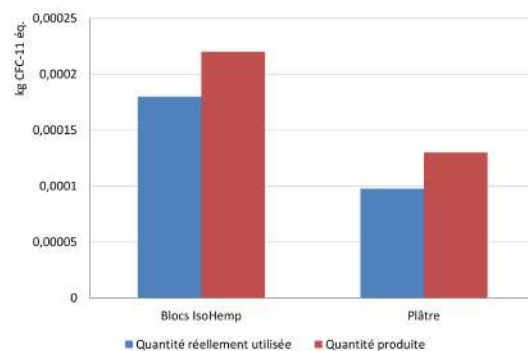


FIGURE 6.14 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions des constituants de la cloison intérieure IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites

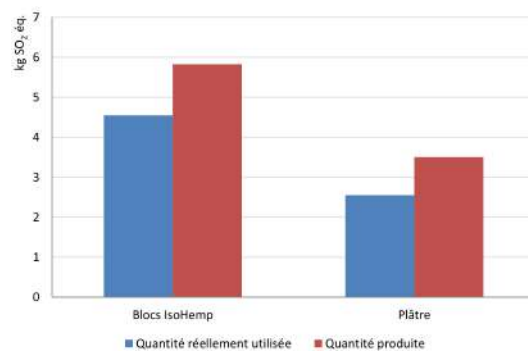


FIGURE 6.15 – Acidification - Émissions des constituants de la cloison intérieure IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites

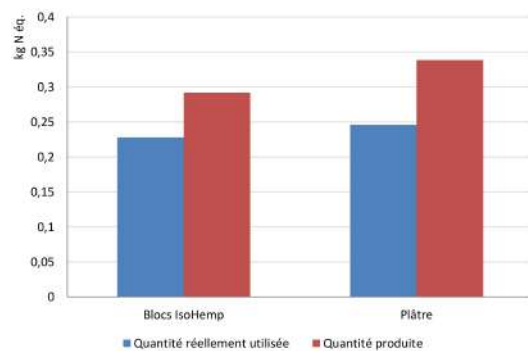


FIGURE 6.16 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison intérieure IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites

6.3 Plancher

Si nous analysons maintenant les quantités réellement utilisées dans le cas du plancher (Figures 6.17 à 6.20), le constat est à nouveau identique : le béton de chanvre se démarque. On notera également que parmi les autres matériaux, les panneaux OSB représentent une des émissions les plus importantes. Cela pourrait s'expliquer par la présence de la résine synthétique utilisée pour encoller les lamelles de bois formant les panneaux. Le même raisonnement peut être appliqué au bois lamellé-collé.

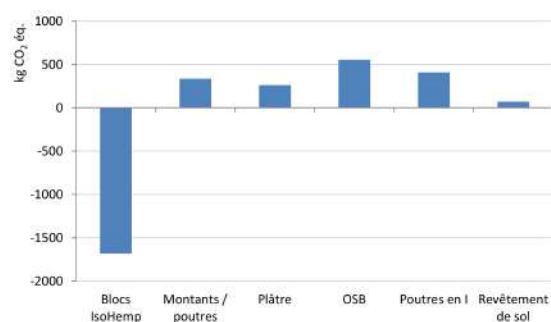


FIGURE 6.17 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants du plancher IsoHemp

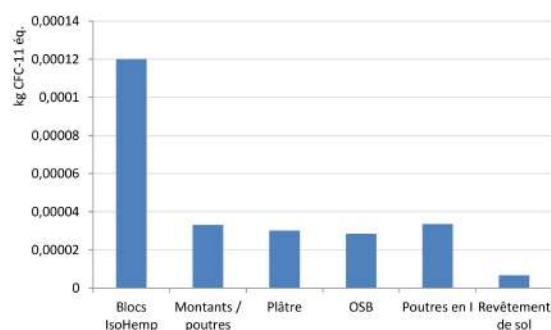


FIGURE 6.18 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions des constituants du plancher IsoHemp

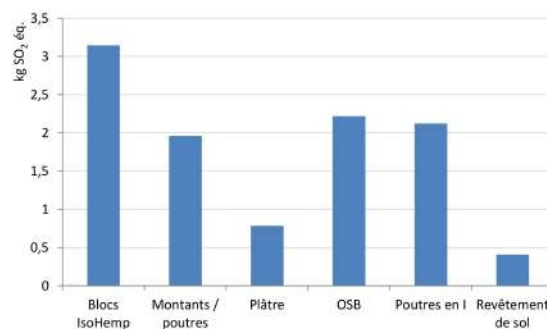


FIGURE 6.19 – Acidification - Émissions des constituants du plancher IsoHemp

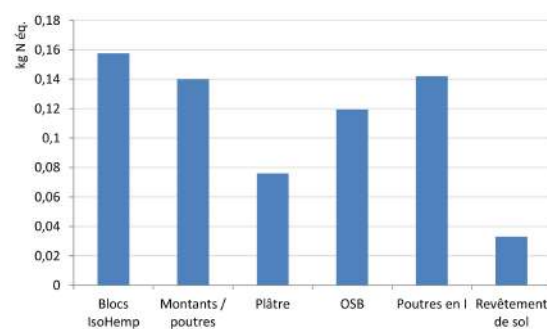


FIGURE 6.20 – Eutrophisation - Émissions des constituants du plancher IsoHemp

Enfin, si nous observons la différence entre les quantités réellement utilisées et les quantités produites (Figures 6.21 à 6.24), nous constatons à nouveau que l'écart est relativement peu important.

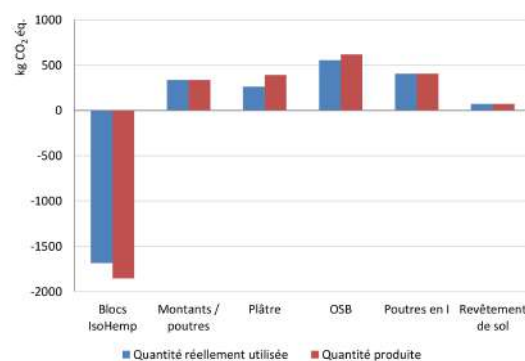


FIGURE 6.21 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants du plancher IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites

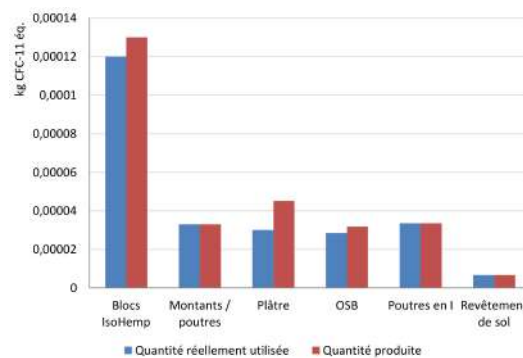


FIGURE 6.22 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions des constituants du plancher IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites

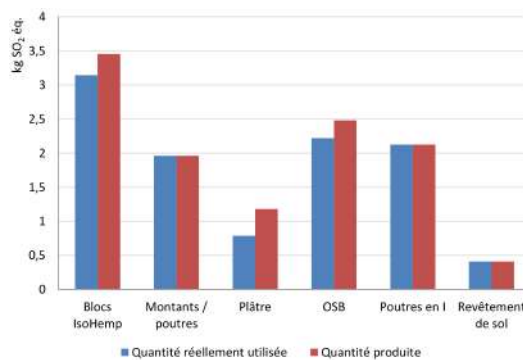


FIGURE 6.23 – Acidification - Émissions des constituants du plancher IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites

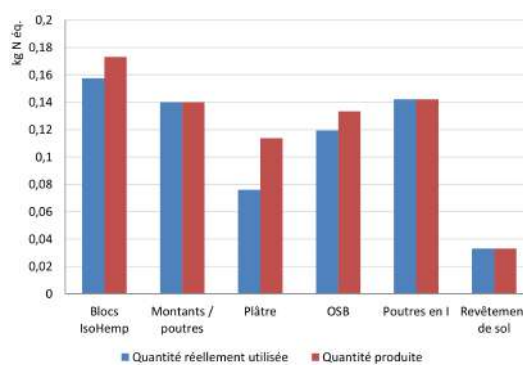


FIGURE 6.24 – Eutrophisation - Émissions des constituants du plancher IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites

6.4 Toiture

Observons à présent le dernier type de parois de la construction IsoHemp, sa toiture. Commençons l'analyse par les émissions pour les quantités réellement mises en œuvre (Figures 6.25 à 6.28). Comme précédemment, on remarque que les panneaux OSB et le bois lamellé-collé sortent légèrement du lot. Le matériau qui se distingue réellement pour son impact important sur l'environnement sont les panneaux isolants. Il s'agit de polystyrène, c'est-à-dire d'un isolant synthétique. Au vu de cette information et des conséquences sur l'environnement de ce type de matériaux, je pense que le résultat semble tout à fait logique.

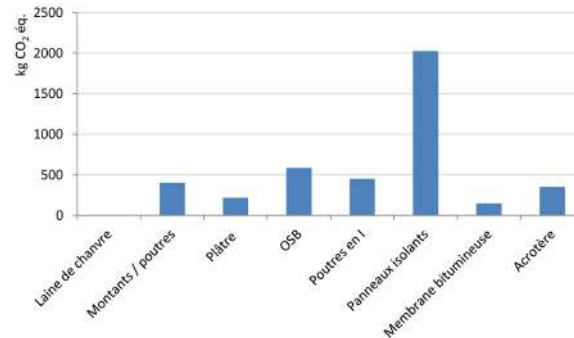


FIGURE 6.25 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la toiture IsoHemp

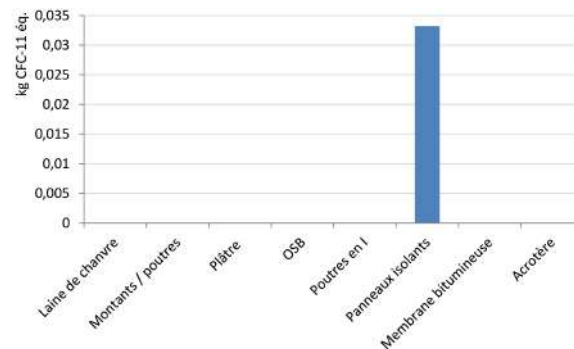


FIGURE 6.26 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la toiture IsoHemp

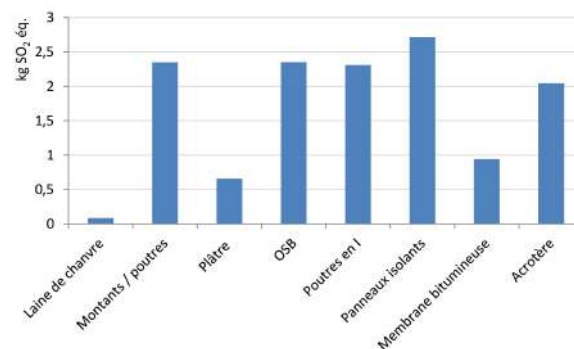


FIGURE 6.27 – Acidification - Émissions des constituants de la toiture IsoHemp

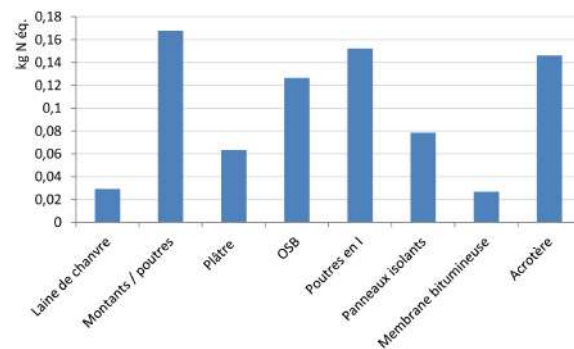


FIGURE 6.28 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la toiture IsoHemp

Si nous analysons plus en détail la différence entre les quantités réellement utilisées et les quantités produites (Figures 6.29 à 6.32), nous observons l'écart le plus important pour l'isolant synthétique (polystyrène). Au vu de ses mauvaises performances, la moindre découpe augmente fortement les quantités de gaz émises et creuse donc davantage l'intervalle.

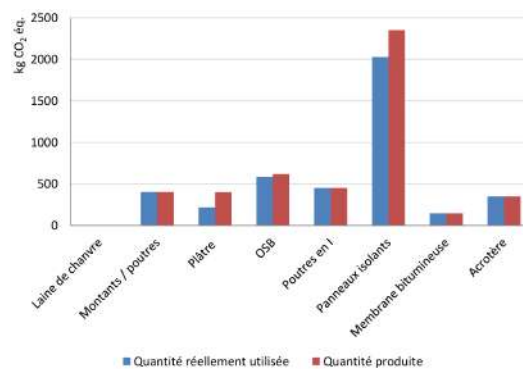


FIGURE 6.29 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la toiture IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites

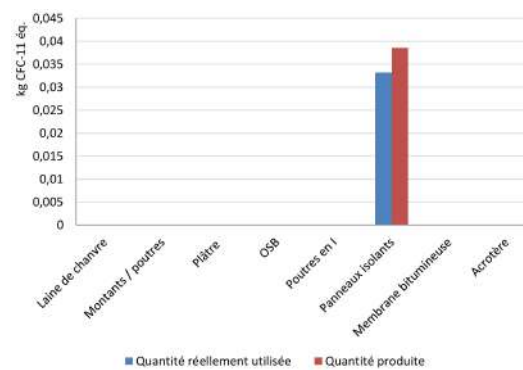


FIGURE 6.30 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la toiture IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites

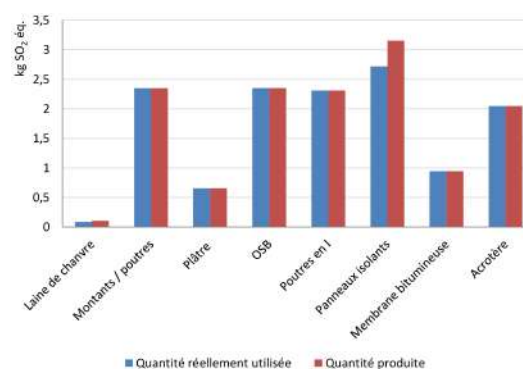


FIGURE 6.31 – Acidification - Émissions des constituants de la toiture IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites

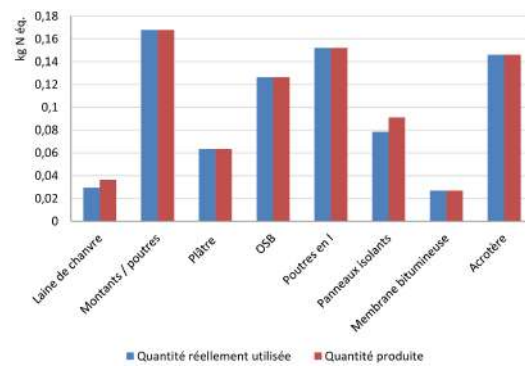


FIGURE 6.32 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la toiture IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites

6.5 Maison complète

Étudions maintenant la construction IsoHemp dans son ensemble. Tout d'abord, comparons l'impact des différents types de parois (Figures 6.33 à 6.36). Il est important de noter que, grâce à l'impact positif important de ses cloisons, les émissions de la totalité du bâtiment restent négatives en terme de réchauffement climatique. On note aussi qu'en terme de diminution de la couche d'ozone, la quasi totalité des émissions est imputée à la toiture (à cause de l'isolation mise en œuvre). En ce qui concerne l'acidification et l'eutrophisation, les cloisons extérieures ont l'impact le plus négatif notamment en raison de la culture du chanvre (environ 40% des émissions totales pour chacun de ces deux critères).

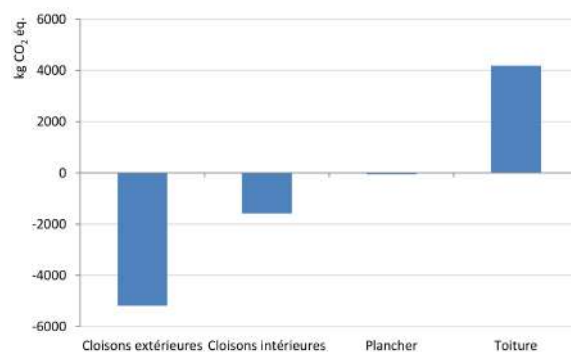


FIGURE 6.33 – Réchauffement climatique - Émissions des parois de la construction IsoHemp

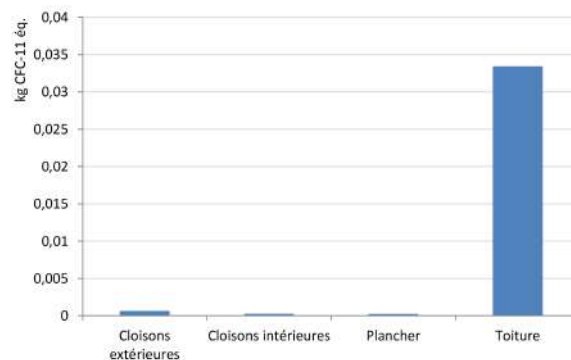


FIGURE 6.34 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des parois de la construction IsoHemp

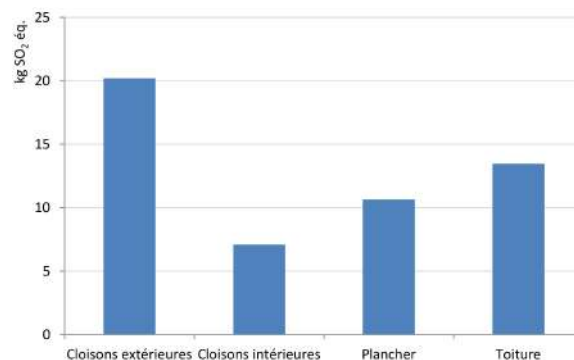


FIGURE 6.35 – Acidification - Émissions des parois de la construction IsoHemp

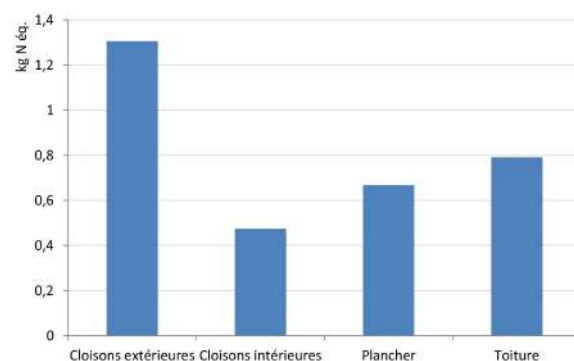


FIGURE 6.36 – Eutrophisation - Émissions des parois de la construction IsoHemp

Nous entrons à présent dans les détails, grâce aux émissions émises par chaque type de matériau différent rencontré dans cette construction (Figure 6.37 à 6.40). Le matériau présentant l'émission la plus faible en terme de réchauffement climatique est bien entendu le béton de chanvre, puisqu'il capte du dioxyde de carbone. Au contraire, les matériaux présentant les impacts les plus importants sont le plâtre (de part la quantité totale importante mise en œuvre), le bois lamellé-collé et les panneaux OSB (de part leur fabrication) ainsi que l'isolant synthétique comme mentionné précédemment. La tendance pour ces matériaux aux émissions importantes reste identique pour les autres critères étudiés. On notera tout de même qu'en terme de diminution de la couche d'ozone, l'isolant synthétique utilisé en toiture représente à lui seul la quasi totalité des impacts potentiels.

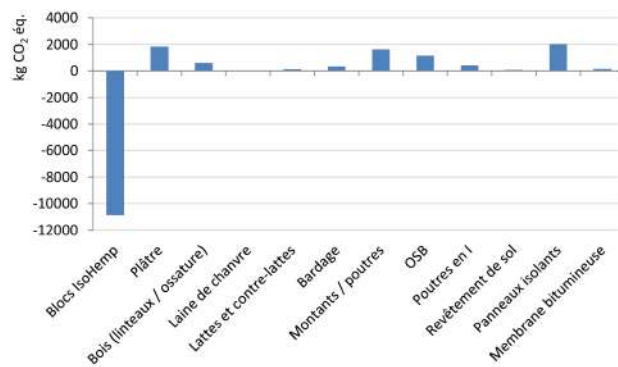


FIGURE 6.37 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la construction IsoHemp

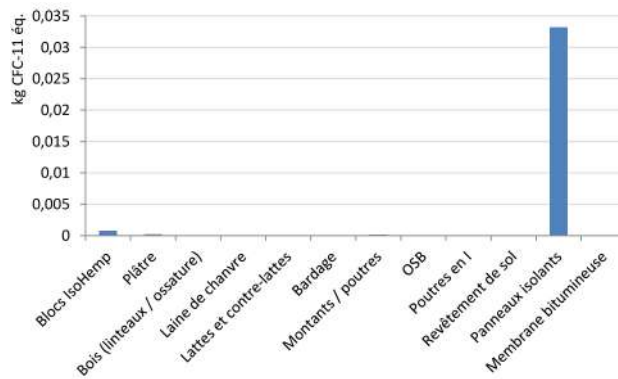


FIGURE 6.38 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la construction IsoHemp

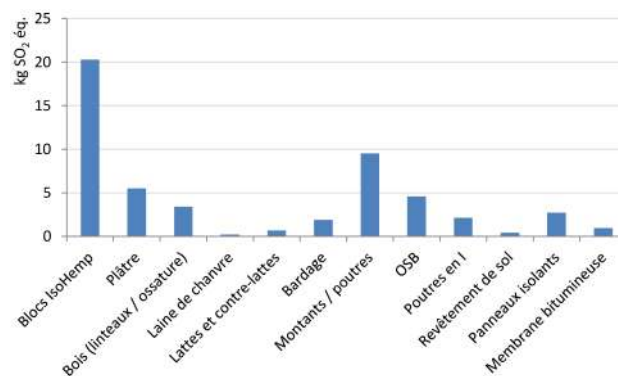


FIGURE 6.39 – Acidification - Émissions des constituants de la construction IsoHemp

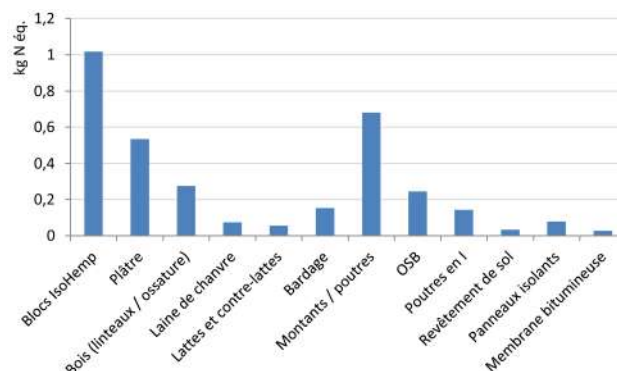


FIGURE 6.40 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la construction IsoHemp

Pour terminer, nous effectuons la même analyse en considérant, cette fois, la différence entre les quantités réellement mises en œuvre et les quantités produites (Figures 6.41 à 6.44). Ce sont le béton de chanvre et le plâtre qui présente les écarts les plus importants. Cela semble logique puisqu'il s'agit des matériaux dont les quantités présentes dans la maison sont les plus importantes.

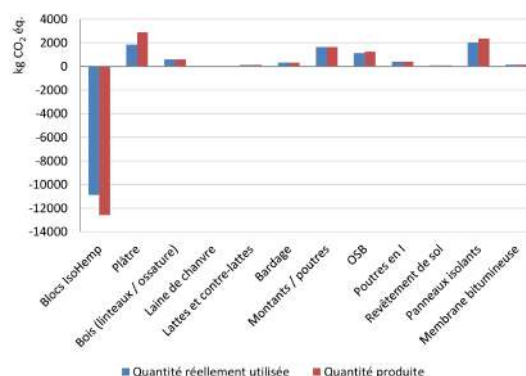


FIGURE 6.41 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la construction IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites

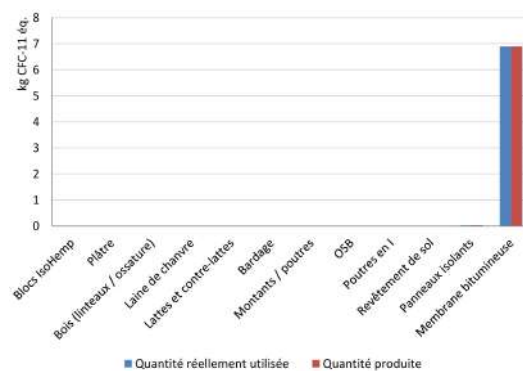


FIGURE 6.42 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions des constituants de la construction IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites

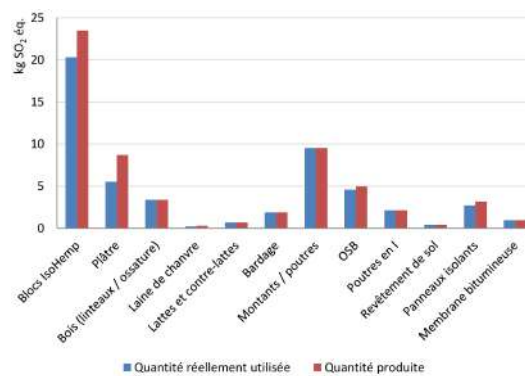


FIGURE 6.43 – Acidification - Émissions des constituants de la construction IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites

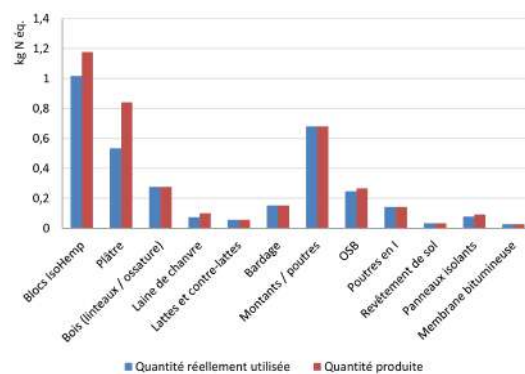


FIGURE 6.44 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la construction IsoHemp - Quantités utilisées vs. produites

6.6 Phase d'utilisation

Dans la phase d'utilisation, l'énergie pour le chauffage et les divers remplacements sont donc comptabilisés. C'est bien logiquement l'énergie pour le chauffage pour les 50 années de durée de vie de la maison qui est l'élément le plus impactant comme le montrent les Figures 5.45 à 5.48.

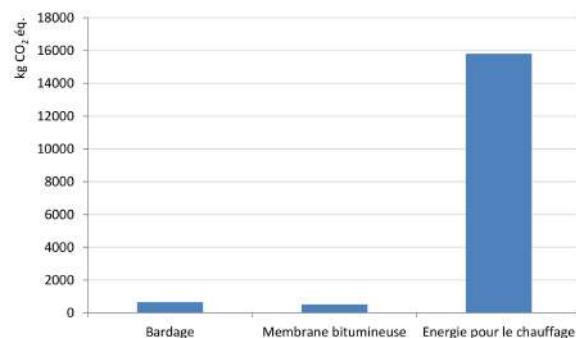


FIGURE 6.45 – Réchauffement climatique - Émissions de la construction IsoHemp en phase d'utilisation (50 ans)

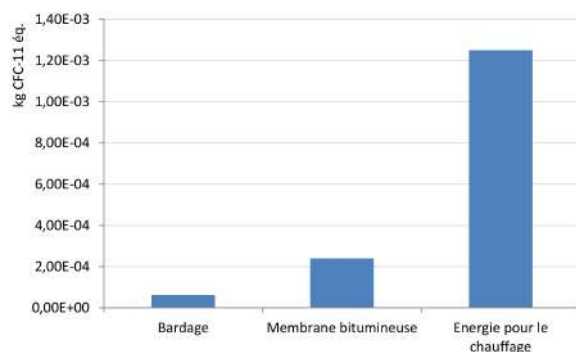


FIGURE 6.46 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions de la construction IsoHemp en phase d'utilisation (50 ans)

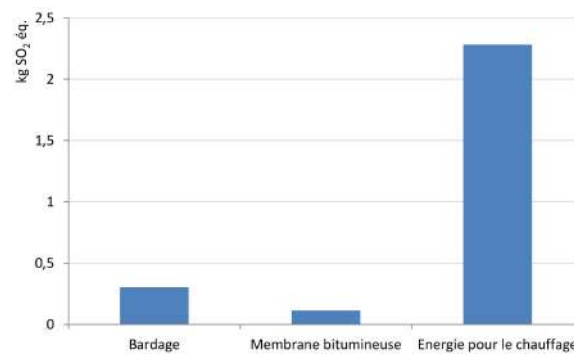


FIGURE 6.47 – Acidification - Émissions de la construction IsoHemp en phase d'utilisation (50 ans)

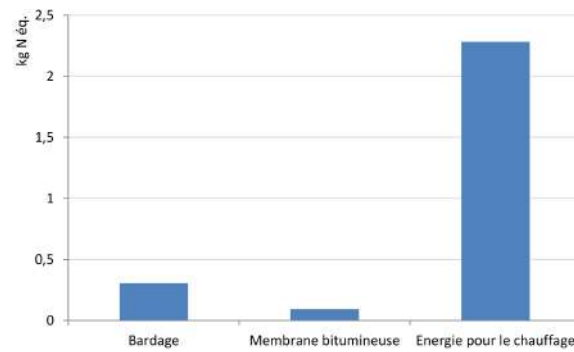


FIGURE 6.48 – Eutrophisation - Émissions de la construction IsoHemp en phase d'utilisation (50 ans)

6.7 Coût du cycle de vie

Le prix de la construction (produits et pose) est tout d'abord déterminé. Il s'élève à 110 810 € pour la maison complète, soit près de 41 000 € pour les cloisons extérieures, 16 000 € pour les cloisons intérieures, 17 600 € pour le plancher et 20 450 € pour la toiture.

Nous nous concentrons maintenant sur l'argent à posséder au temps présent afin d'assurer la construction de la maison, le paiement de l'énergie pour le chauffage et les éventuels remplacements.

Le scénario de base considère un taux d'actualisation réel nominal de 4%, un taux de croissance des prix de l'énergie de 4% et un taux de croissance des prix pour les matériaux et les travaux de 2,5%. La valeur nette actuelle à posséder dans ce cas est de 163 535 €.

Le premier scénario alternatif considère un taux d'actualisation réel nominal de 6%, un taux de croissance des prix de l'énergie de 4% et un taux de croissance des prix pour les matériaux et les travaux de 2,5%. La valeur nette actuelle à posséder dans ce cas est de 143 204 €.

Le second scénario alternatif considère un taux d'actualisation réel nominal de 4%, un taux de croissance des prix de l'énergie de 6% et un taux de croissance des prix pour les matériaux et les travaux de 2,5%. La valeur nette actuelle à posséder dans ce cas est de 165 485 €.

7

Résultats - Construction ArgiMob

7.1 Cloisons extérieures

Nous analysons tout d'abord les émissions des cloisons extérieures. Les quantités prises en compte sont celles réellement mises en œuvre dans le bâtiment (Figure 7.1 à 7.4). Nous observons que les panneaux de contreventement (panneaux en fibres de bois) et la cellulose insufflée ont les émissions les plus importantes. Les panneaux de fibres de bois représentent en effet plus de 20% des émissions responsables du réchauffement climatique, de l'acidification et de l'eutrophisation ainsi que 30% des gaz entraînant une diminution de la couche d'ozone. La cellulose est quant à elle responsable de près de 20% des émissions de dioxyde de carbone, de trichlorofluorométhane et d'azote ainsi que de 30% des émissions de dioxyde de soufre. En ce qui concerne les panneaux de fibres de bois, les liants employés me semblent responsables de ce résultat. Pour ce qui est de la cellulose, elle est fabriquée grâce à un procédé écologique, puisqu'il s'agit de papier journal recyclé. Cependant, la quantité nécessaire pour ce cas d'étude est supérieure à celle des autres matériaux, ce qui explique l'importance de ses émissions.

Comme vous pouvez l'apercevoir dans les graphes ci-dessous, parmi les constituants de la paroi, on retrouve trois termes qui ne mentionnent pas un matériau. Cela est dû au fait que Mobic livre les parois complètes, hors finition extérieure, car elles sont préfabriquées. Ainsi, sont comptabilisés l'électricité mix belge et l'électricité photovoltaïque, utilisées au sein de l'usine, et le transport des marchandises, depuis les fournisseurs jusqu'à l'usine Mobic.

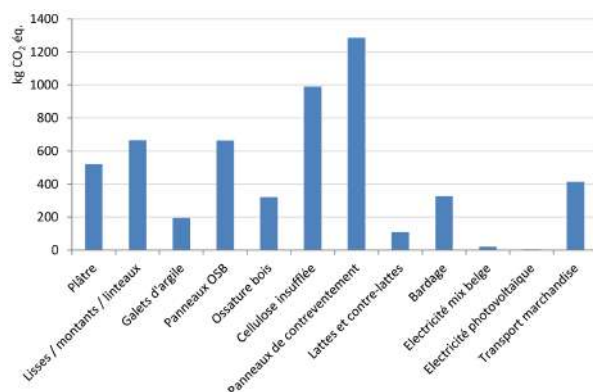


FIGURE 7.1 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison extérieure ArgiMob

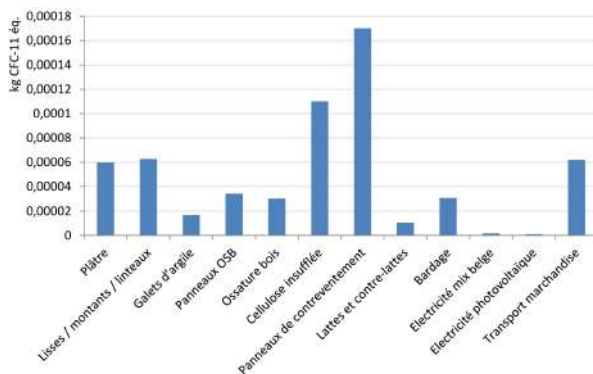


FIGURE 7.2 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la cloison extérieure ArgiMob

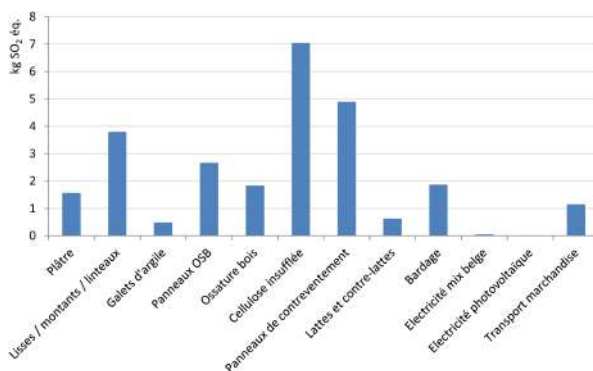


FIGURE 7.3 – Acidification - Émissions des constituants de la cloison extérieure ArgiMob

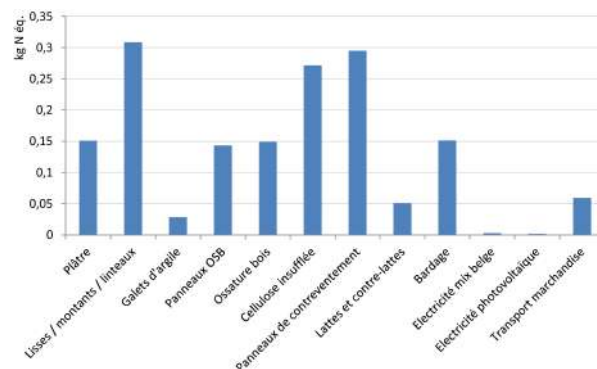


FIGURE 7.4 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison extérieure ArgiMob

Analysons maintenant plus en détail la différence entre les quantités réellement mises en œuvre et les quantités produites (Figure 7.5 à 7.8). L'avantage d'un isolant insufflé comme la cellulose est l'absence de découpe. On remarque un écart important dans les quantités au niveau des panneaux OSB et des panneaux de fibres de bois. Cela peut s'expliquer par la taille importante des éléments types et le fait que c'est l'hypothèse la plus défavorable qui a été choisie pour effectuer ce calcul (une fois le panneau coupé, la partie restante, peu importe sa dimension, est considérée comme un déchet).

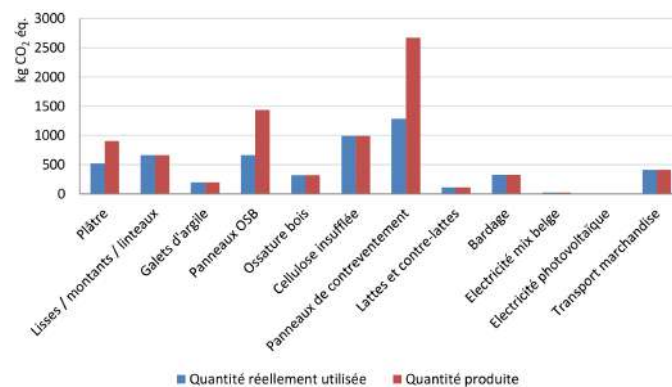


FIGURE 7.5 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison extérieure ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites

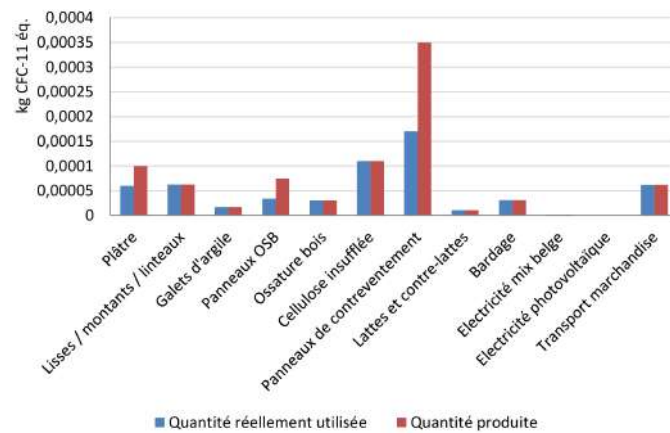


FIGURE 7.6 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions des constituants de la cloison extérieure ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites

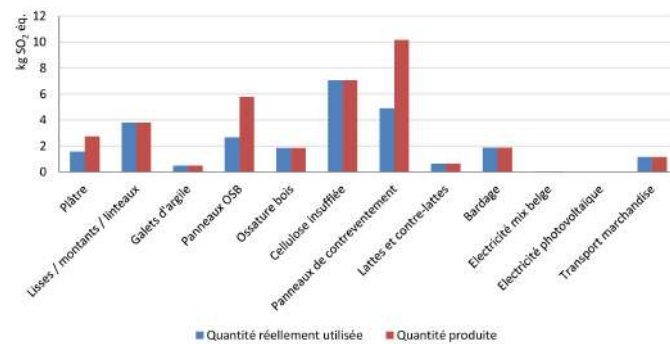


FIGURE 7.7 – Acidification - Émissions des constituants de la cloison extérieure ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites

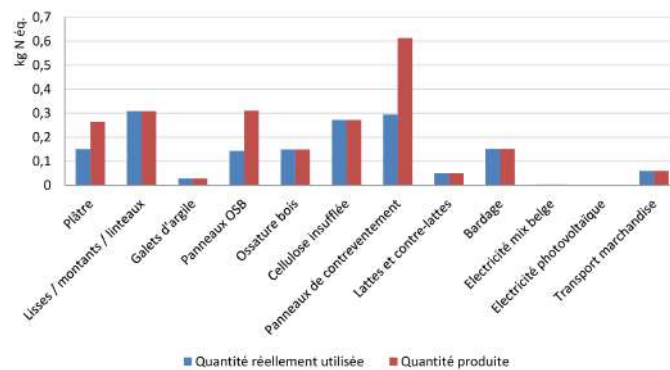


FIGURE 7.8 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison extérieure ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites

7.2 Cloisons intérieures

Observons à présent les cloisons intérieures de la construction, les quantités considérées étant celles réellement mises en œuvre dans la construction (Figures 7.9 à 7.12) Le plâtre est le premier matériau à se distinguer. Au vu des surfaces à couvrir, le résultat semble logique. Le bois sort également du lot. Il est relativement abondant dans ce type de construction. Les résultats obtenus sont donc dus au traitement qu'il subit en scierie, combiné avec la quantité présente dans les parois. Il convient tout de même de noter que l'émission totale de ces parois intérieures reste relativement faible par rapport à celle des autres cas étudiés.

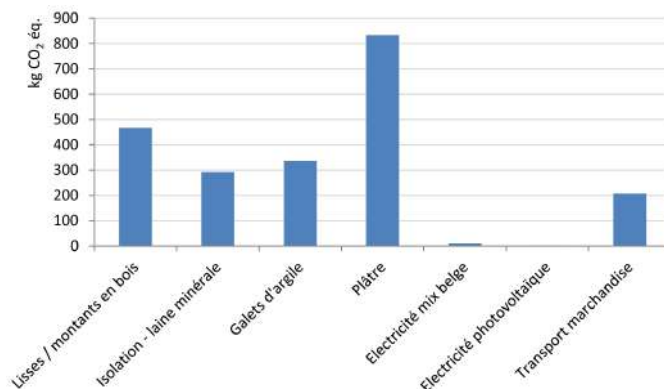


FIGURE 7.9 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison intérieure ArgiMob

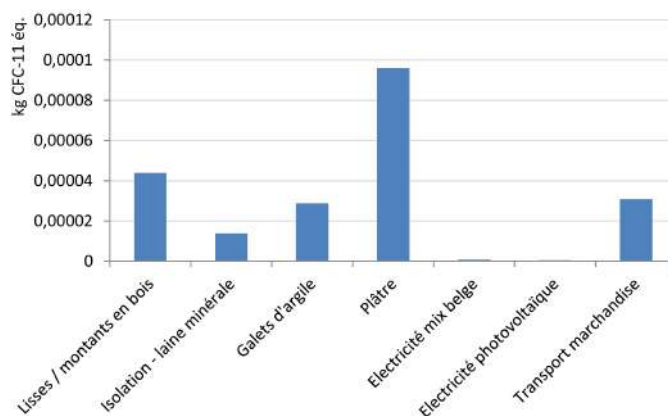


FIGURE 7.10 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la cloison intérieure ArgiMob

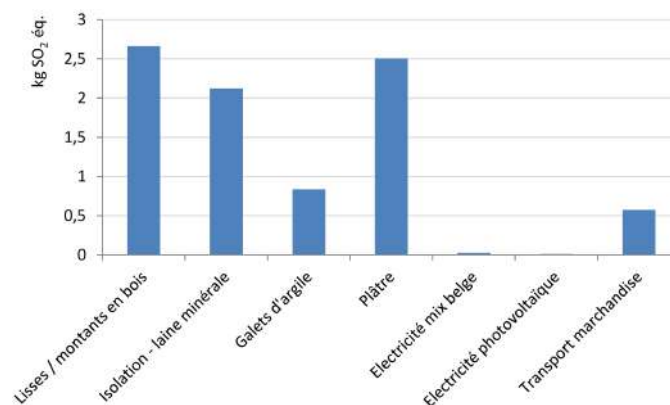


FIGURE 7.11 – Acidification - Émissions des constituants de la cloison intérieure ArgiMob

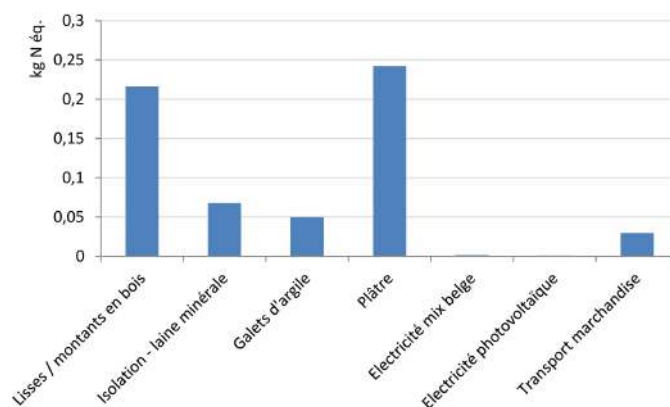


FIGURE 7.12 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison intérieure ArgiMob

Si nous comparons les quantités réellement mises en œuvre et les quantités produites (Figures 7.13 à 7.16), on constate que seuls les panneaux isolants et les plaques de carton-plâtre subissent des découpes. L'écart reste cependant limité.

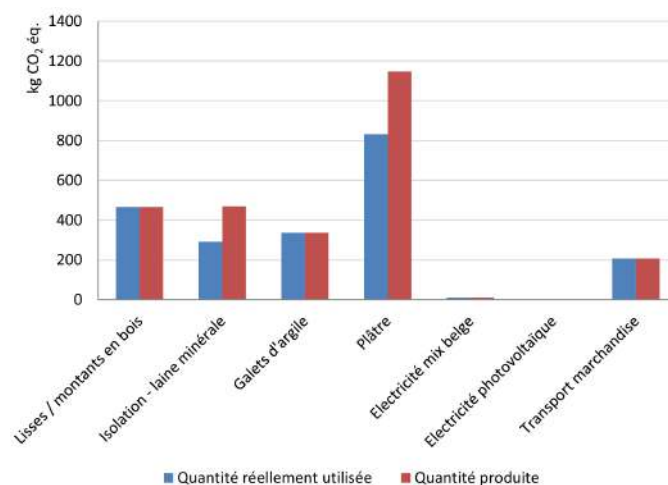


FIGURE 7.13 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison intérieure ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites

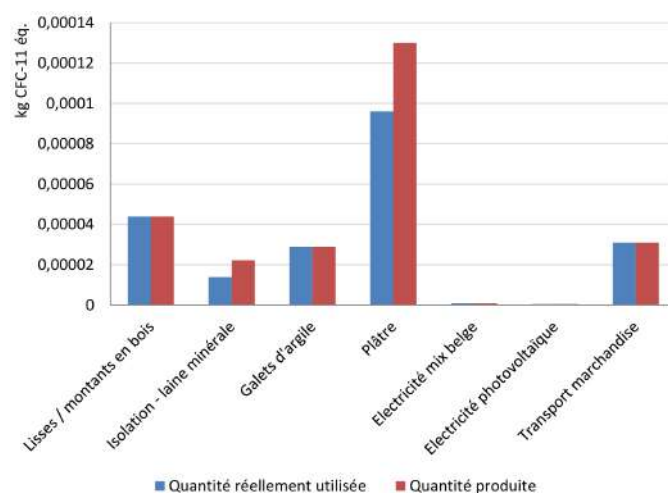


FIGURE 7.14 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la cloison intérieure ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites

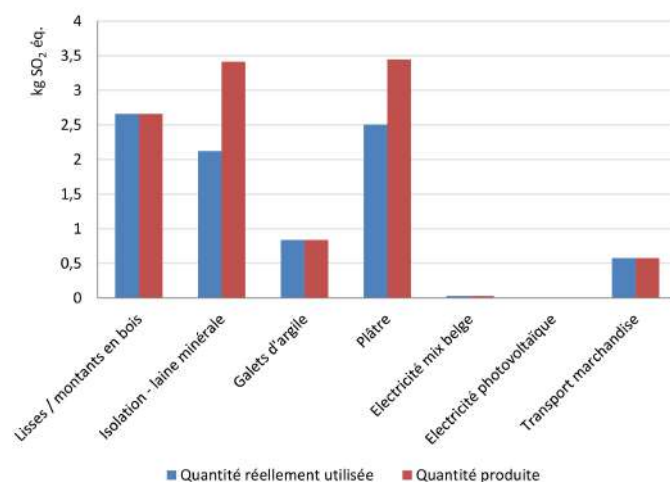


FIGURE 7.15 – Acidification - Émissions des constituants de la cloison intérieure ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites

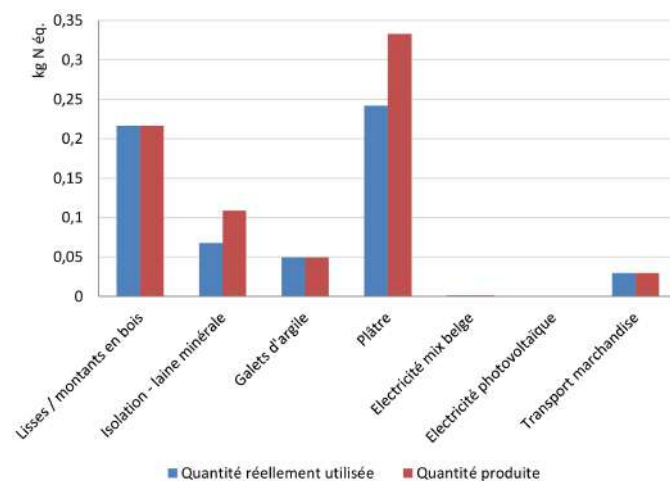


FIGURE 7.16 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison intérieure ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites

7.3 Plancher

Analysons à présent les émissions du plancher, en ne tenant compte que des quantités réellement mise en œuvre dans la construction (Figures 7.17 à 7.20). Une fois de plus, les panneaux OSB sont parmi les matériaux ayant les émissions les plus importantes. Cependant, dans ce cas-ci, de nombreux matériaux semblent être à l'origine d'impacts environnementaux. Se distinguent ainsi, en plus des panneaux OSB, le bois lamellé-collé et la poutre en I en bois. L'âme de cette dernière est réalisée en OSB et ses semelles en lamellé-collé : ce résultat est donc tout à fait logique. Ensemble, ces trois matériaux représentent 70% des émissions de dioxyde de carbone, 60% des émissions de CFC-11 équivalent, 80% des émissions de dioxyde de soufre et 75% des émissions d'azote. L'origine de cette quantité de gaz étant identique à chaque matériau, soit un liant synthétique.

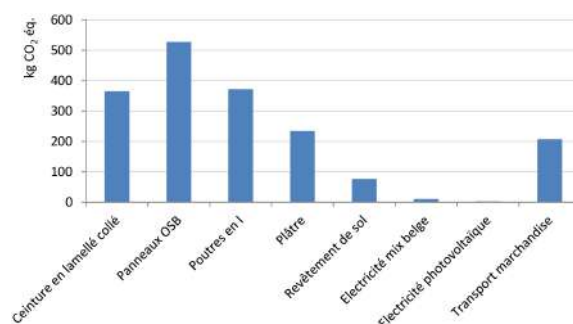


FIGURE 7.17 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants du plancher ArgiMob

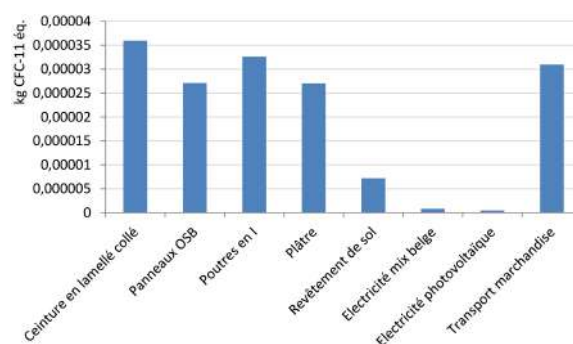


FIGURE 7.18 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants du plancher ArgiMob

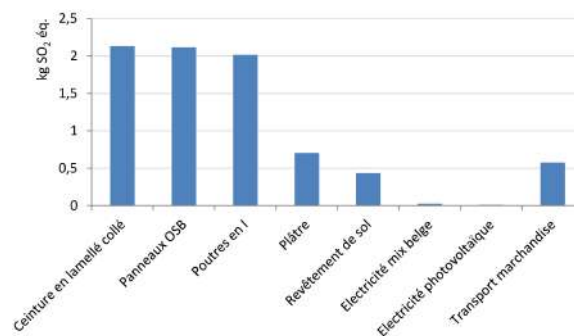


FIGURE 7.19 – Acidification - Émissions des constituants du plancher Argi-Mob

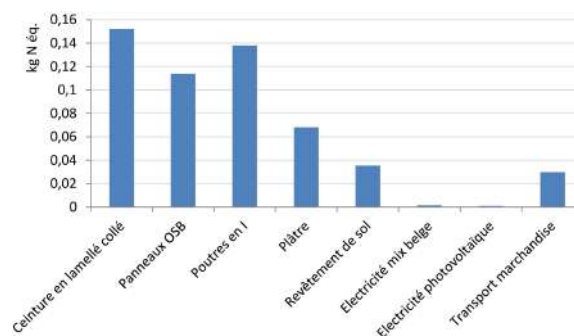


FIGURE 7.20 – Eutrophisation - Émissions des constituants du plancher ArgiMob

Confrontons à présent les quantités réellement mises en œuvre et les quantités produites de ces matériaux (Figures 7.21 à 7.24). Les panneaux OSB sont une fois de plus le seul matériau à sortir du lot.

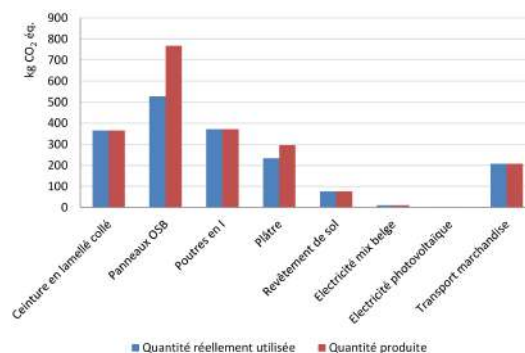


FIGURE 7.21 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants du plancher ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites

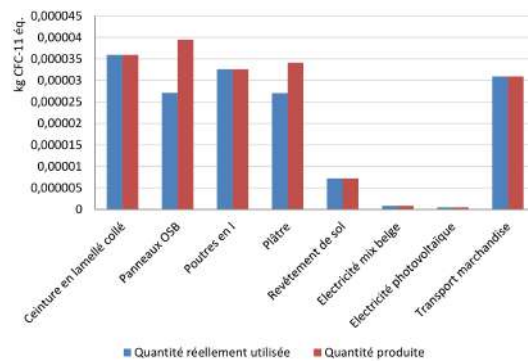


FIGURE 7.22 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions des constituants du plancher ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites

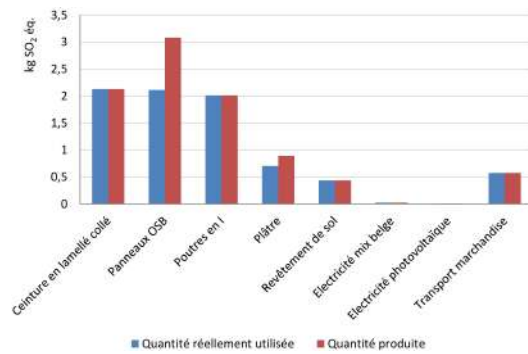


FIGURE 7.23 – Acidification - Émissions des constituants du plancher ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites

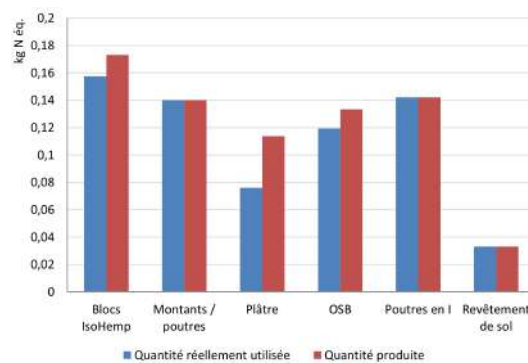


FIGURE 7.24 – Eutrophisation - Émissions des constituants du plancher ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites

7.4 Toiture

Terminons ce listing par la dernière des parois de la construction ArgiMob, soit la toiture. Nous observons tout d'abord les quantités réellement mise en œuvre dans le bâtiment (Figures 7.25 à 7.28). Les résultats obtenus sont conformes à ce qui a été dit pour les parois précédentes. Ainsi, les impacts les plus importants sont dus principalement aux panneaux de fibres de bois, à la cellulose insufflée et aux panneaux OSB.

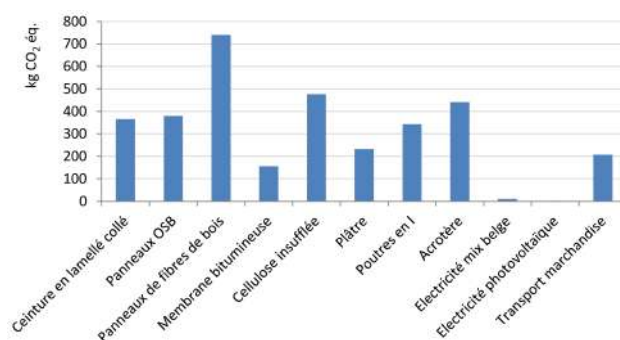


FIGURE 7.25 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la toiture ArgiMob

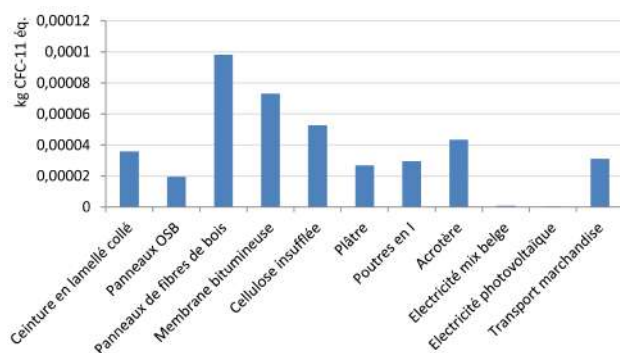


FIGURE 7.26 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la toiture ArgiMob

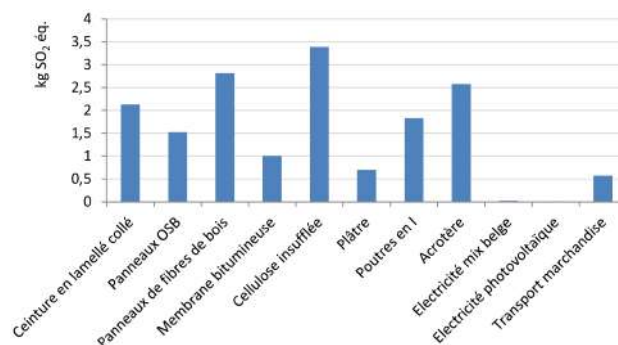


FIGURE 7.27 – Acidification - Émissions des constituants de la toiture ArgiMob

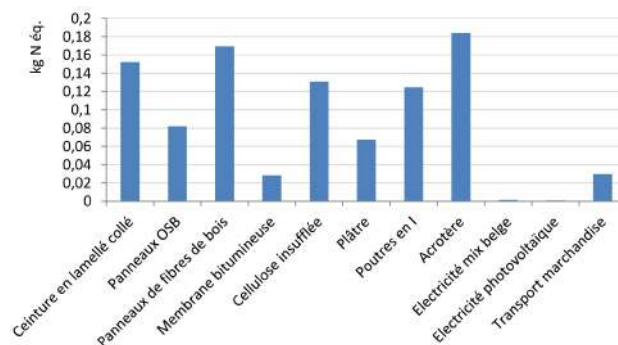


FIGURE 7.28 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la toiture ArgiMob

Si nous nous intéressons à la différence entre les quantités réellement utilisées et les quantités produites (Figures 7.29 à 7.32), nous pouvons constater que les découpes restent relativement peu importantes et que les émissions des divers matériaux augmentent peu, exception faite des panneaux OSB, des panneaux de fibres de bois et du plâtre comme dans les parois précédentes de la construction ArgiMob.

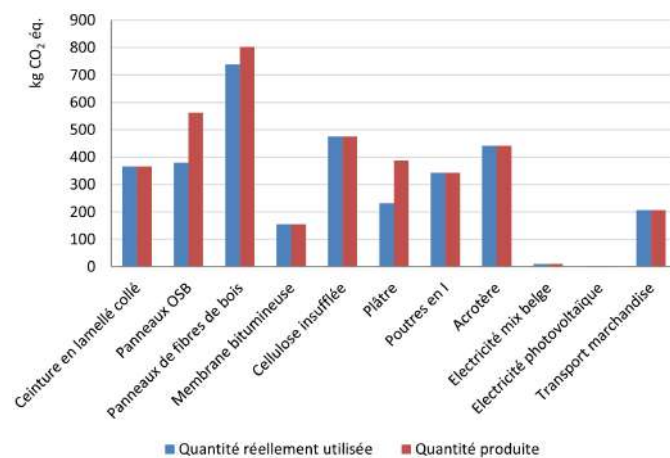


FIGURE 7.29 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la toiture ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites

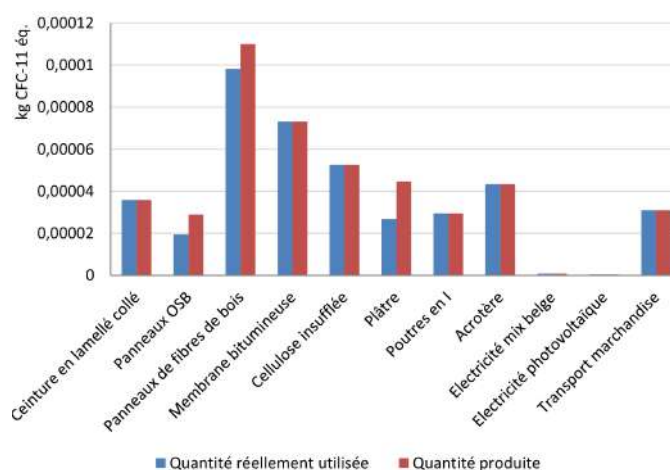


FIGURE 7.30 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la toiture ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites

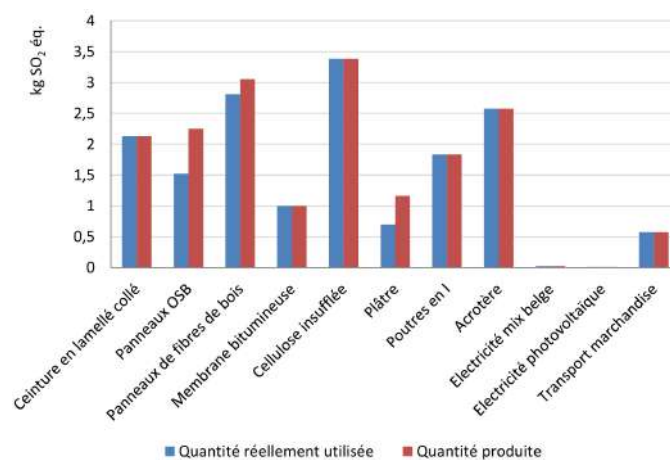


FIGURE 7.31 – Acidification - Émissions des constituants de la toiture ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites

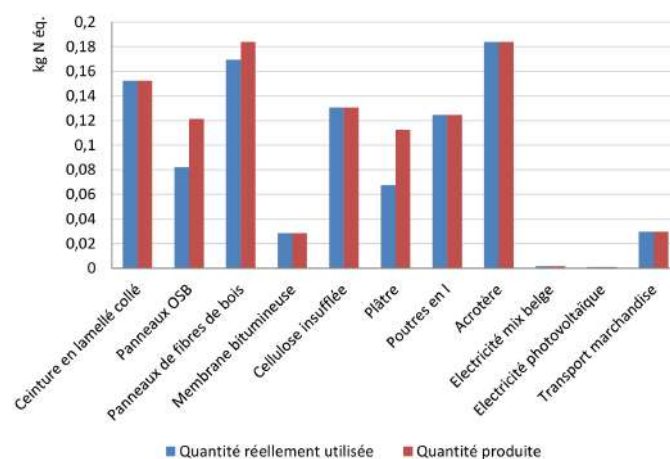


FIGURE 7.32 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la toiture ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites

7.5 Maison complète

Observons à présent la construction dans son ensemble. En premier lieu, nous comparons l'impact des différentes parois (Figures 7.33 à 7.36). On constate que les cloisons extérieures sont les parois qui ont le plus d'impacts sur l'environnement. Cela semble logique, plus particulièrement au vu de la quantité de matériaux mis en œuvre. Elles sont directement suivies par la toiture. Or, la surface couverte est bien inférieure. C'est donc l'utilisation de panneaux de fibres de bois et de panneaux OSB qui est à l'origine de ce résultat.

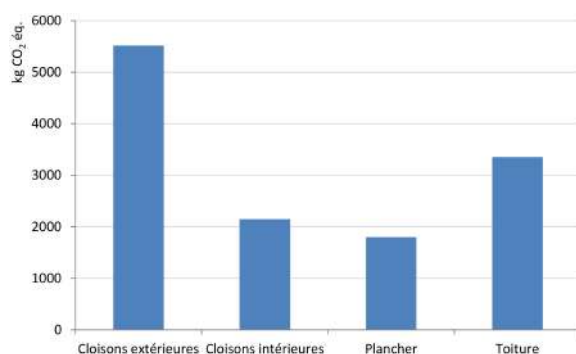


FIGURE 7.33 – Réchauffement climatique - Émissions des parois de la construction ArgiMob

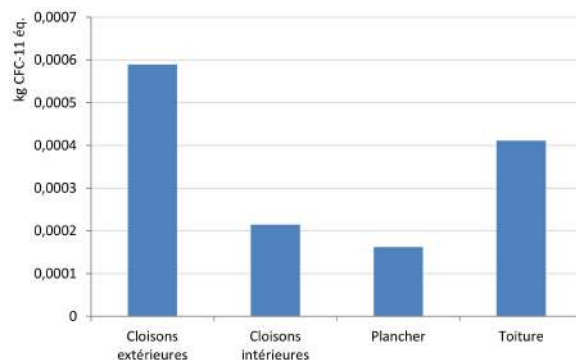


FIGURE 7.34 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des parois de la construction ArgiMob

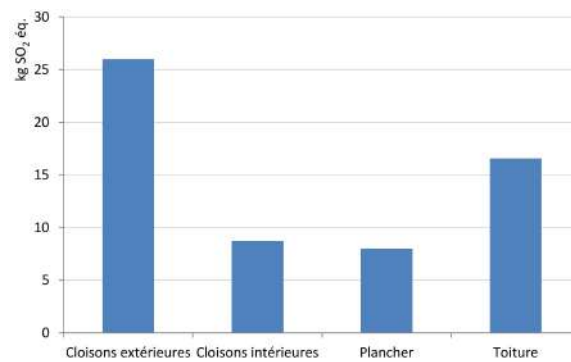


FIGURE 7.35 – Acidification - Émissions des parois de la construction Argi-Mob

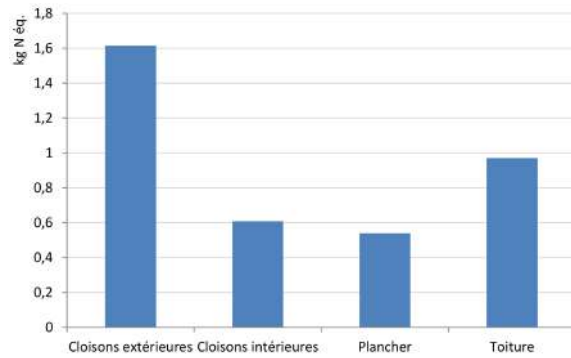


FIGURE 7.36 – Eutrophisation - Émissions des parois de la construction ArgiMob

Nous entrons dès à présent dans les détails, en analysant les émissions de chaque type de matériaux distincts rencontrés dans la construction (Figures 7.37 à 7.40). Comme on peut s'y attendre au vu des résultats présentés ci-dessus, les panneaux de fibres de bois, les panneaux OSB et le plâtre sont les matériaux les plus polluants dans le cas de la construction Argimob.

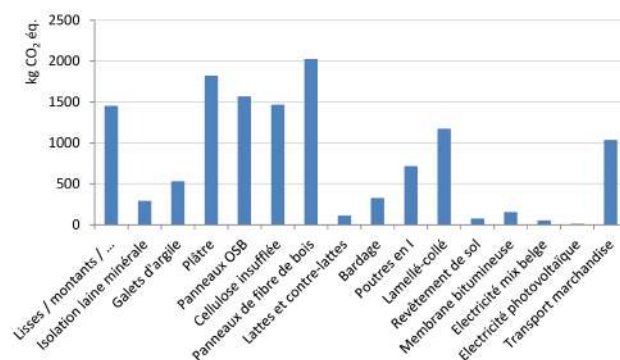


FIGURE 7.37 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la construction ArgiMob

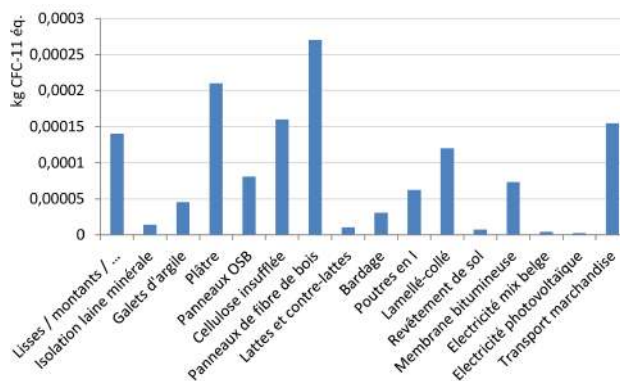


FIGURE 7.38 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la construction ArgiMob

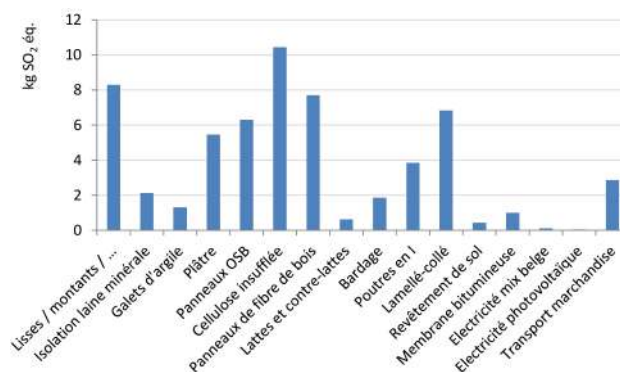


FIGURE 7.39 – Acidification - Émissions des constituants de la construction ArgiMob

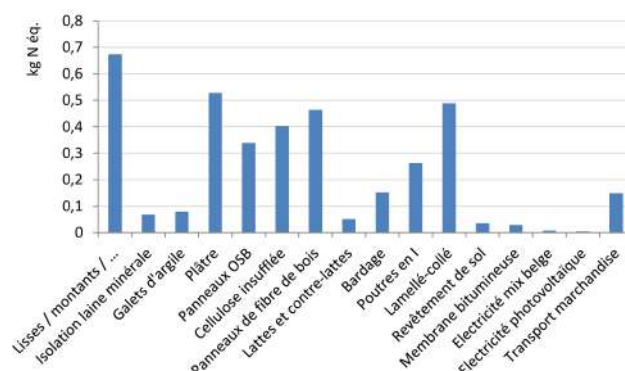


FIGURE 7.40 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la construction ArgiMob

Pour terminer, nous effectuons la même analyse en considérant les quantités réellement mises en œuvre et les quantités produites (Figures 7.41 à 7.44). Ce sont à nouveau les trois mêmes matériaux qui impliquent la pollution et les découpes les plus importantes.

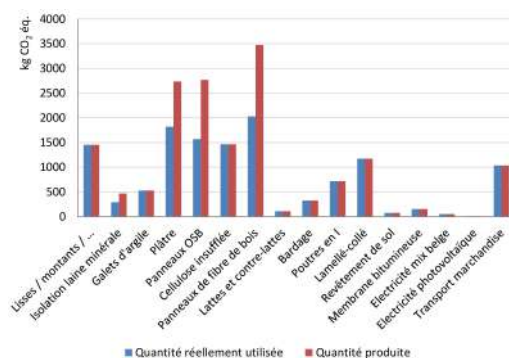


FIGURE 7.41 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la construction ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites

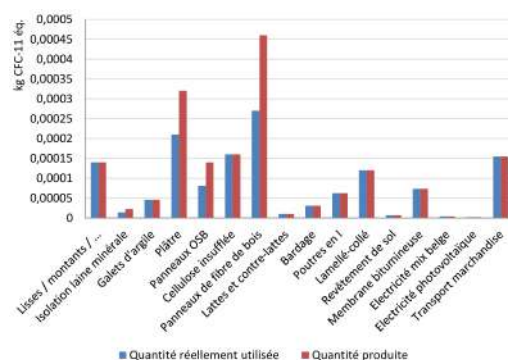


FIGURE 7.42 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions des constituants de la construction ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites

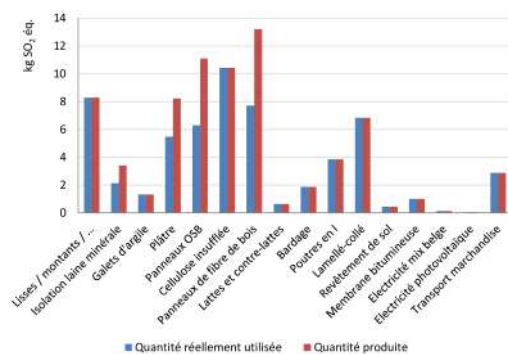


FIGURE 7.43 – Acidification - Émissions des constituants de la construction ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites

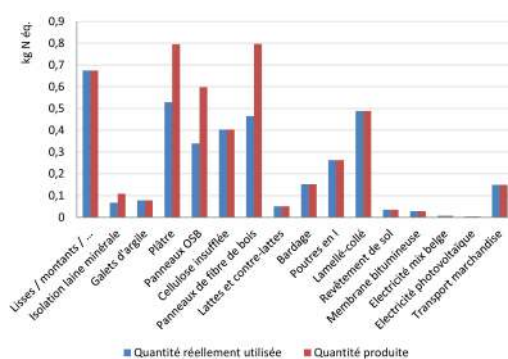


FIGURE 7.44 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la construction ArgiMob - Quantités utilisées vs. produites

7.6 Phase d'utilisation

Dans la phase d'utilisation, l'énergie pour le chauffage et les divers remplacements sont donc comptabilisés. C'est bien logiquement l'énergie pour le chauffage pour les 50 années de durée de vie de la maison qui est l'élément le plus impactant comme le montrent les Figures 7.45 à 7.48.

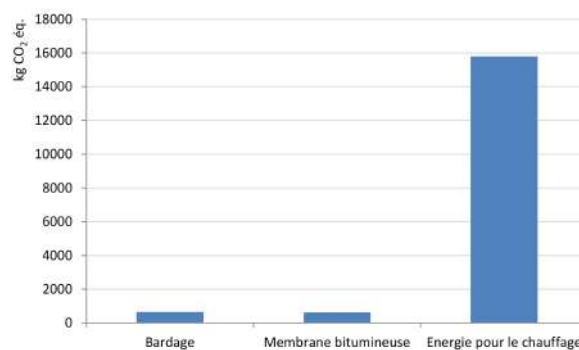


FIGURE 7.45 – Réchauffement climatique - Émissions de la construction ArgiMob en phase d'utilisation (50 ans)

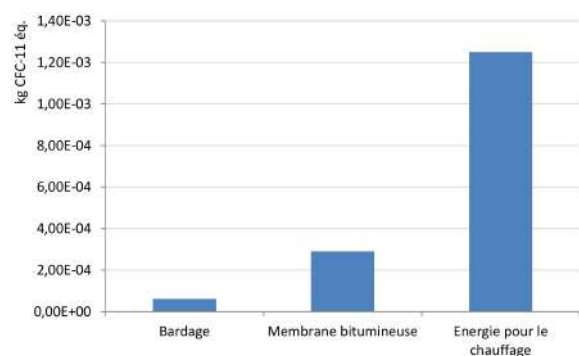


FIGURE 7.46 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions de la construction ArgiMob en phase d'utilisation (50 ans)

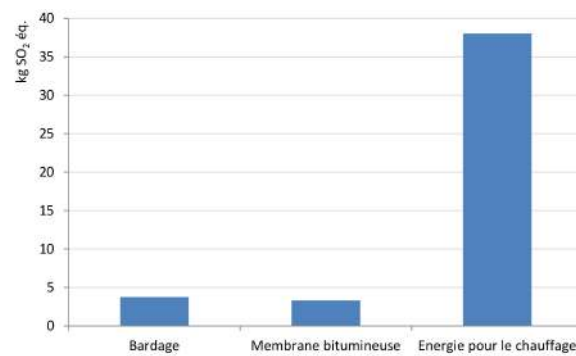


FIGURE 7.47 – Acidification - Émissions de la construction ArgiMob en phase d'utilisation (50 ans)

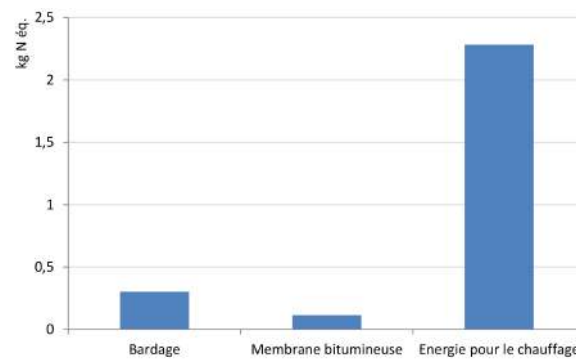


FIGURE 7.48 – Eutrophisation - Émissions de la construction ArgiMob en phase d'utilisation (50 ans)

7.7 Coût du cycle de vie

Le prix de la construction (produits et pose) est tout d'abord déterminé. Il s'élève à 85 200 € pour la maison complète, soit près de 55 335 € pour les cloisons extérieures, 11 560 € pour les cloisons intérieures, 10 470 € pour le plancher et 7 840 € pour la toiture.

Nous nous concentrons maintenant sur l'argent à posséder au temps présent afin d'assurer la construction de la maison, le payement de l'énergie pour le chauffage et les éventuels remplacements.

Le scénario de base considère un taux d'actualisation réel nominal de 4%, un taux de croissance des prix de l'énergie de 4% et un taux de croissance des prix pour les matériaux et les travaux de 2,5%. La valeur nette actuelle à posséder dans ce cas est de 138 715 €.

Le premier scénario alternatif considère un taux d'actualisation réel nominal de 6%, un taux de croissance des prix de l'énergie de 4% et un taux de croissance des prix pour les matériaux et les travaux de 2,5%. La valeur nette actuelle à posséder dans ce cas est de 118 161 €.

Le second scénario alternatif considère un taux d'actualisation réel nominal de 4%, un taux de croissance des prix de l'énergie de 6% et un taux de croissance des prix pour les matériaux et les travaux de 2,5%. La valeur nette actuelle à posséder dans ce cas est de 140 660 €.

8

Résultats - Construction PailleTech

8.1 Cloisons extérieures

Nous analysons tout d'abord les émissions des cloisons extérieures de la construction PailleTech grâce aux Figures 8.1 à 8.4. On remarque en premier lieu l'impact négatif des ballots de paille en ce qui concerne le réchauffement climatique. Ses émissions sont cependant positives et plus importantes que celles des autres matériaux pour les trois autres critères d'analyse. En effet, dans cette étude, la paille est considérée comme un co-produit de l'agriculture. Les émissions observées dans les graphiques sont donc dues aux pesticides, engrais, herbicides, etc. utilisés. On note également que le pare-pluie (panneau de fibres de bois) sort du lot, de part les liants employés pour sa fabrication. L'émission totale de dioxyde de carbone de la paroi est bien négative au total, la quantité captée par la paille étant supérieure à celle émise par l'ensemble des autres matériaux.

Comme vous pouvez l'apercevoir dans les graphes ci-dessous, parmi les constituants de la paroi, on retrouve deux termes qui ne mentionnent pas un matériau. Cela est dû au fait que PailleTech livre les parois complètes, hors finition extérieure, car elles sont préfabriquées. Ainsi, sont comptabilisés l'électricité mix belge, utilisée au sein de l'usine, et le transport des marchandises, depuis le fournisseur jusqu'à l'usine PailleTech.

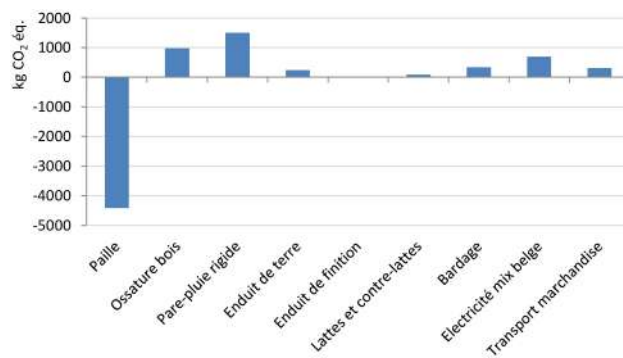


FIGURE 8.1 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison extérieure PailleTech

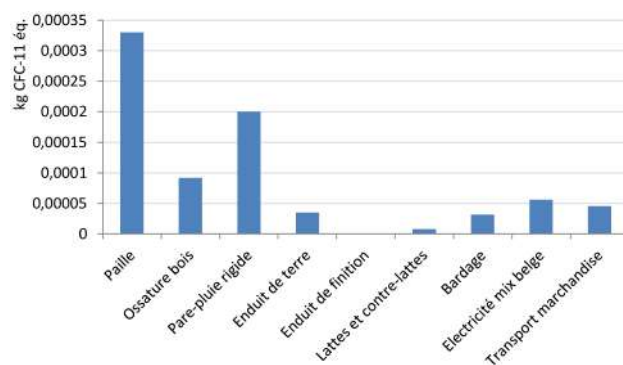


FIGURE 8.2 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions des constituants de la cloison extérieure PailleTech

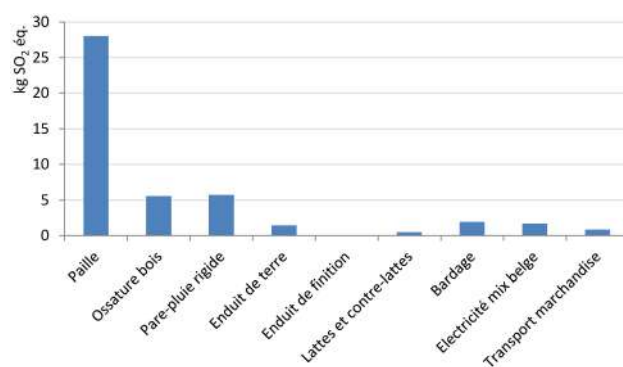


FIGURE 8.3 – Acidification - Émissions des constituants de la cloison extérieure PailleTech

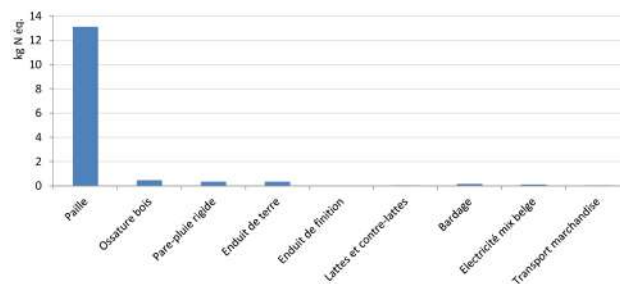


FIGURE 8.4 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison extérieure PailleTech

Nous nous intéressons maintenant à la différence entre les quantités réellement utilisées et les quantités produites (Figures 8.5 à 8.8). On constate que les découpes des panneaux rigides (panneaux de fibres de bois) entraînent un écart important entre les émissions qui sont ici environ deux fois plus importantes.

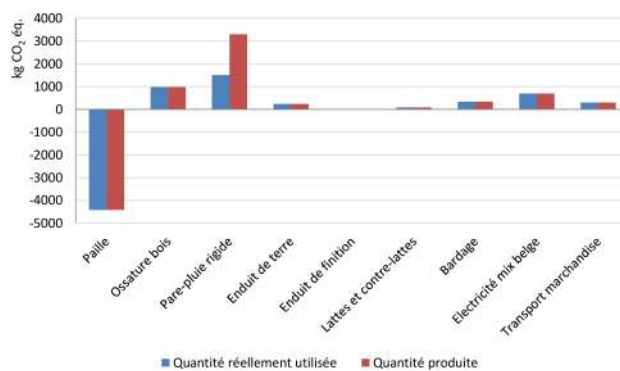


FIGURE 8.5 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison extérieure PailleTech - Quantités utilisées vs. produites

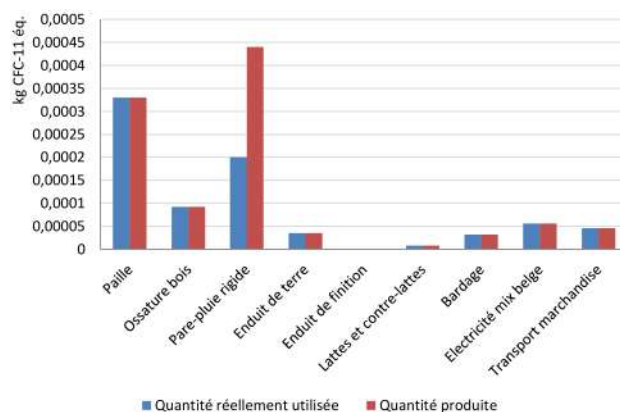


FIGURE 8.6 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions des constituants de la cloison extérieure PailleTech - Quantités utilisées vs. produites

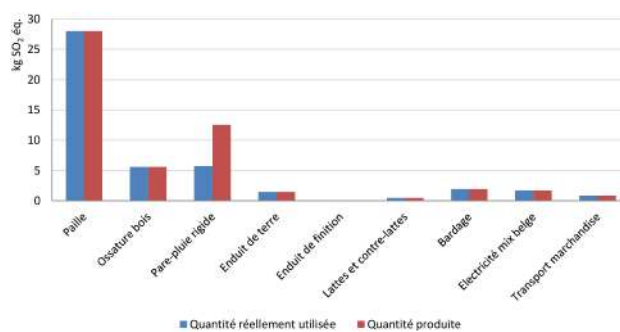


FIGURE 8.7 – Acidification - Émissions des constituants de la cloison extérieure PailleTech - Quantités utilisées vs. produites

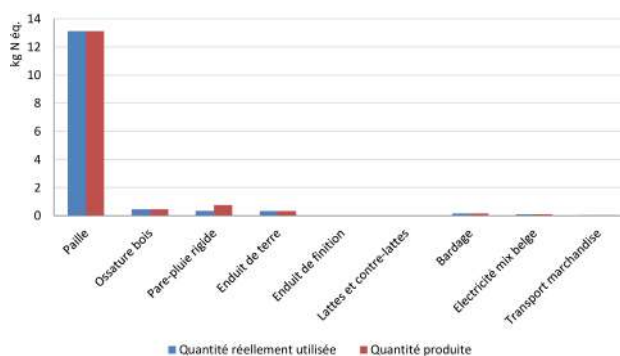


FIGURE 8.8 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison extérieure PailleTech - Quantités utilisées vs. produites

8.2 Cloisons intérieures

Les Figures 8.9 à 8.12 représentent les émissions des quantités réellement mises en œuvre dans la construction. La quasi totalité de la paroi étant composée de bois massif, il est donc logique que l'impact le plus important lui soit associé.

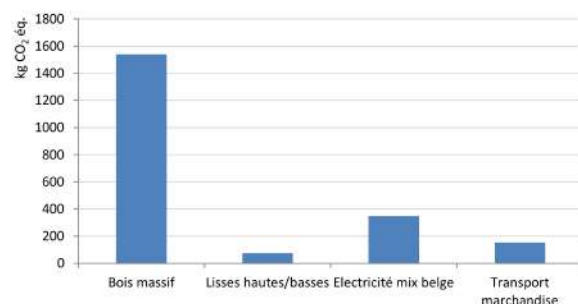


FIGURE 8.9 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison intérieure PailleTech

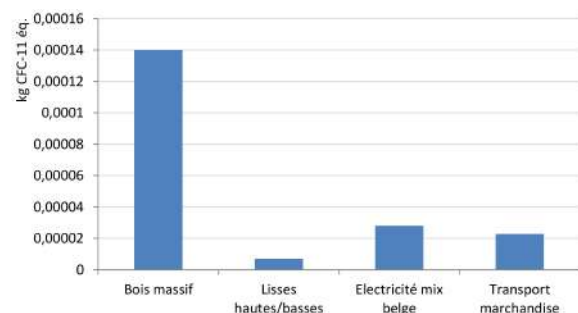


FIGURE 8.10 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la cloison intérieure PailleTech

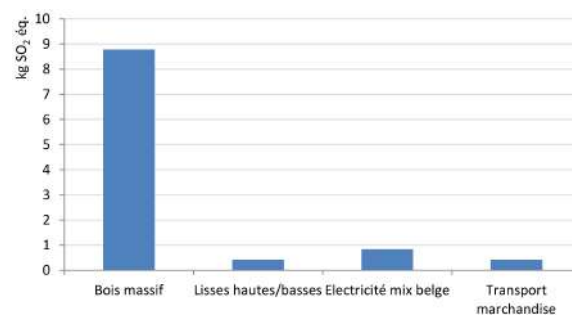


FIGURE 8.11 – Acidification - Émissions des constituants de la cloison intérieure PailleTech

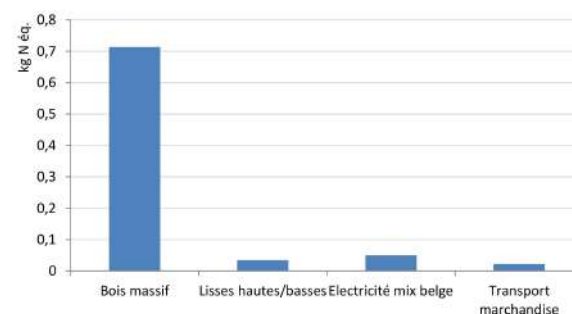


FIGURE 8.12 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison intérieure PailleTech

Si nous analysons plus en détails la différence entre les quantités réellement utilisées et les quantités produites (Figures 8.13 à 8.16), on constate qu'il n'y a aucune différence dues aux découpes.

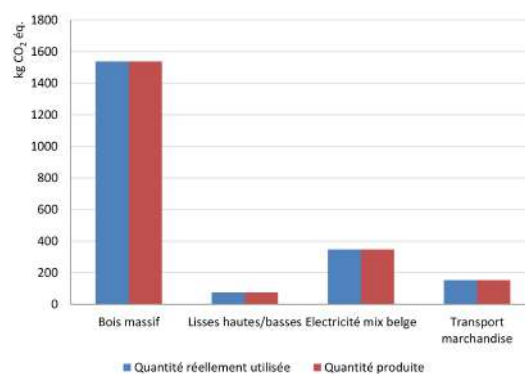


FIGURE 8.13 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la cloison intérieure PailleTech - Quantités utilisées vs. produites

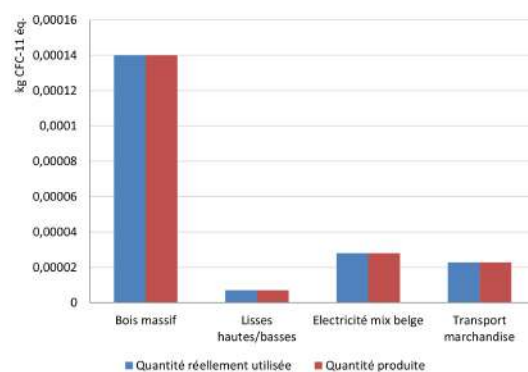


FIGURE 8.14 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions des constituants de la cloison intérieure PailleTech - Quantités utilisées vs. produites

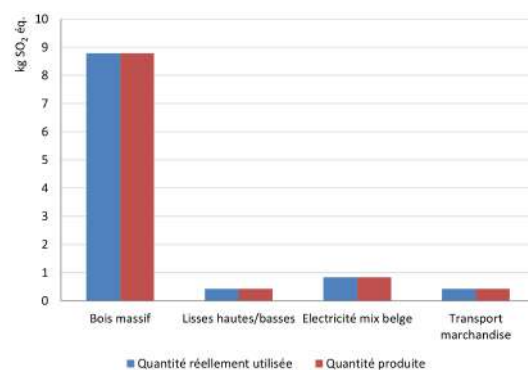


FIGURE 8.15 – Acidification - Émissions des constituants de la cloison intérieure PailleTech - Quantités utilisées vs. produites

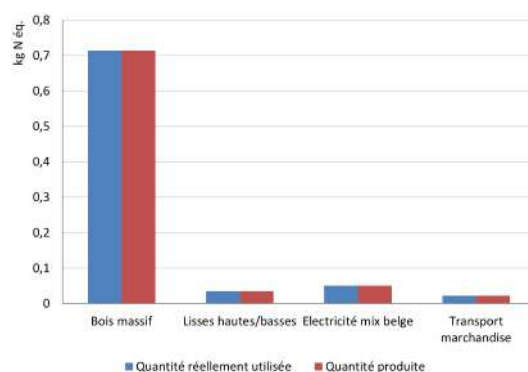


FIGURE 8.16 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la cloison intérieure PailleTech - Quantités utilisées vs. produites

8.3 Plancher

Observons à présent les quantités réellement utilisées dans le cas du plancher (Figures 8.17 à 8.20), Le constat est identique à celui des cloisons intérieures puisque le matériau principal est à nouveau le bois massif.

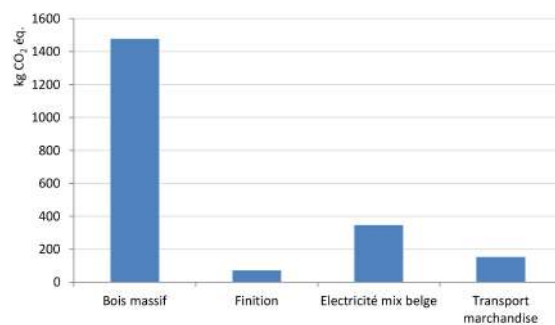


FIGURE 8.17 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants du plancher PailleTech

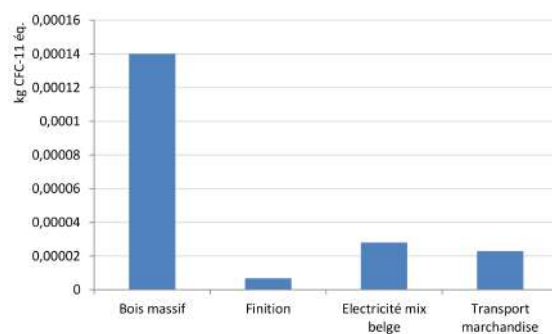


FIGURE 8.18 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions des constituants du plancher PailleTech

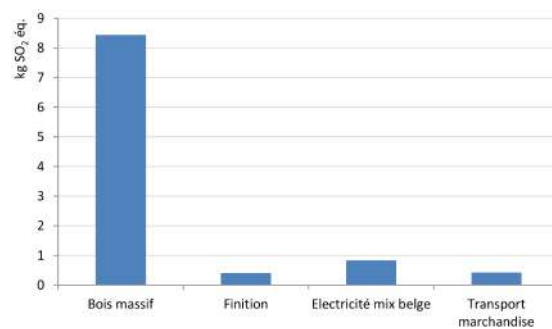


FIGURE 8.19 – Acidification - Émissions des constituants du plancher PailleTech

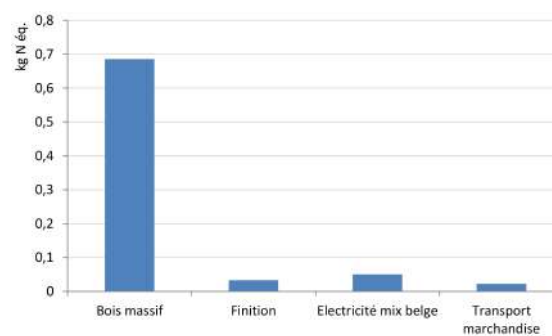


FIGURE 8.20 – Eutrophisation - Émissions des constituants du plancher PailleTech

Si nous analysons plus en détails la différence entre les quantités réellement utilisées et les quantités produites (Figures 8.21 à 8.24), on constate qu'il n'y a aucune différence dues aux découpes.

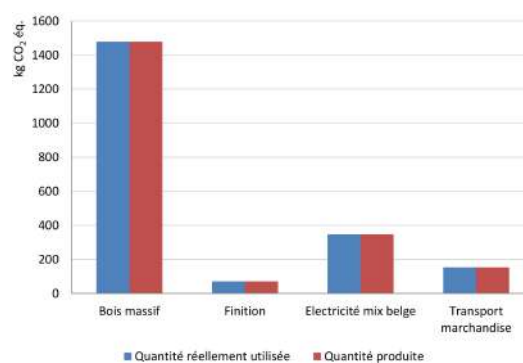


FIGURE 8.21 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants du plancher PailleTech - Quantités utilisées vs. produites

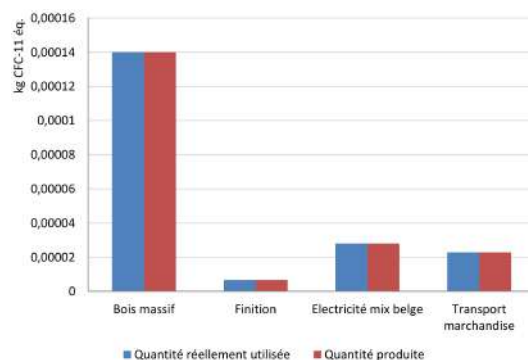


FIGURE 8.22 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions des constituants du plancher PailleTech - Quantités utilisées vs. produites

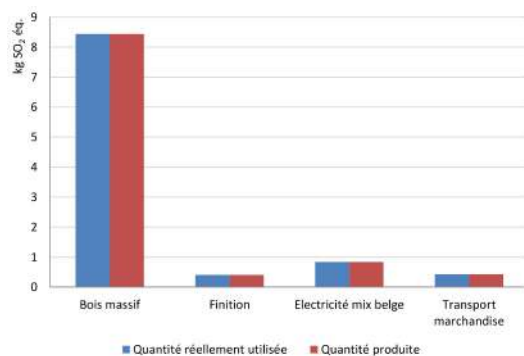


FIGURE 8.23 – Acidification - Émissions des constituants du plancher PailleTech - Quantités utilisées vs. produites

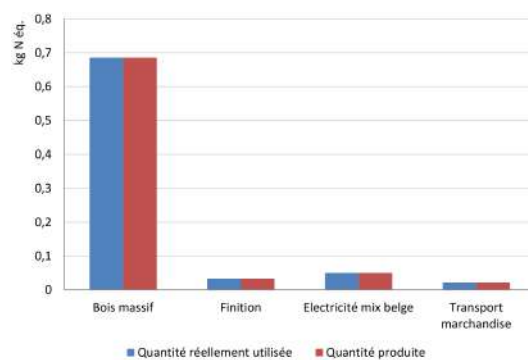


FIGURE 8.24 – Eutrophisation - Émissions des constituants du plancher PailleTech - Quantités utilisées vs. produites

8.4 Toiture

Pour terminer, nous analysons la toiture de la construction PailleTech, en considérant les quantités réellement mises en œuvre (Figures 8.25 à 8.28). Nous observons à nouveau que la paille se distingue, tout comme dans les cloisons extérieures, par ses émissions négatives. Il en va de même pour les panneaux rigides (panneaux de fibres de bois) qui, une fois de plus, sont à l'origine des émissions les plus importantes de dioxyde de carbone.

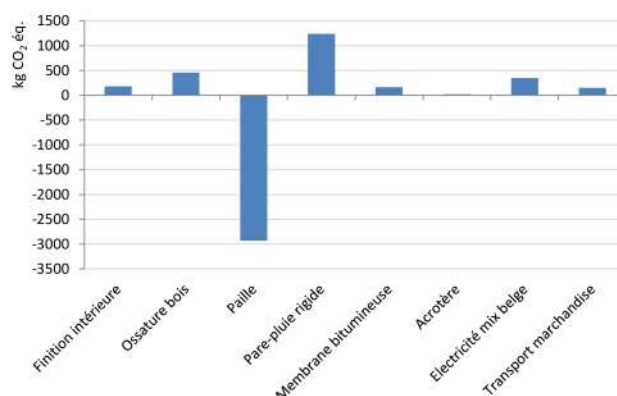


FIGURE 8.25 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la toiture PailleTech

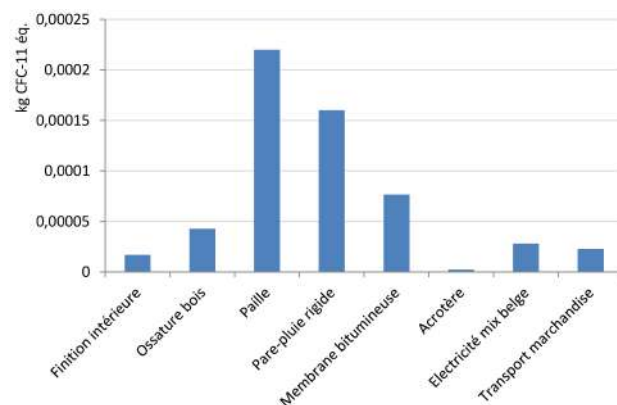


FIGURE 8.26 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la toiture PailleTech

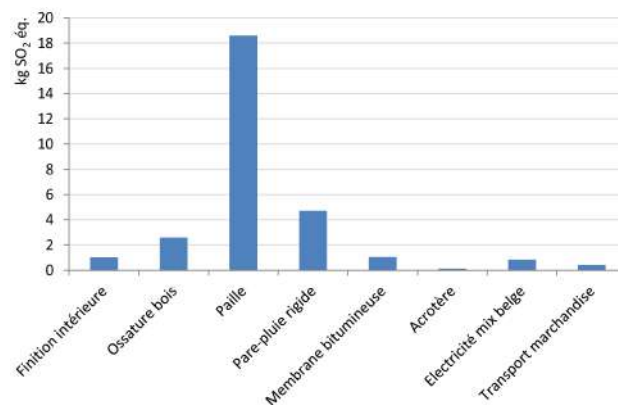


FIGURE 8.27 – Acidification - Émissions des constituants de la toiture Paille-Tech

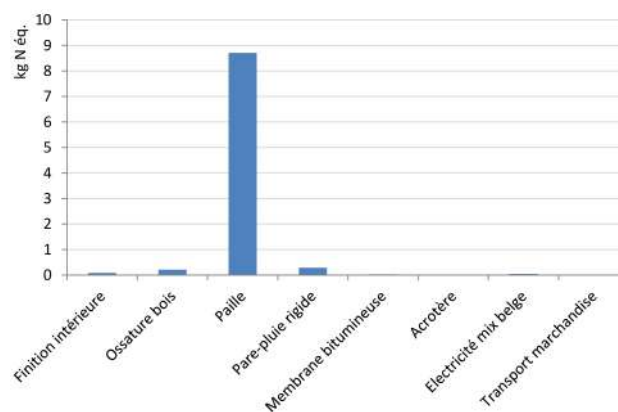


FIGURE 8.28 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la toiture PailleTech

Si nous analysons plus en détail la différence entre les quantités réellement utilisées et les quantités produites (Figures 8.29 à 8.32), nous observons que l'écart se creuse uniquement pour les panneaux de fibres de bois.

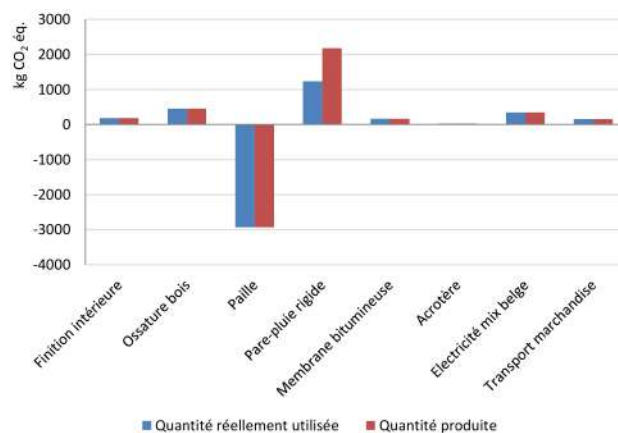


FIGURE 8.29 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la toiture PailleTech - Quantités utilisées vs. produites

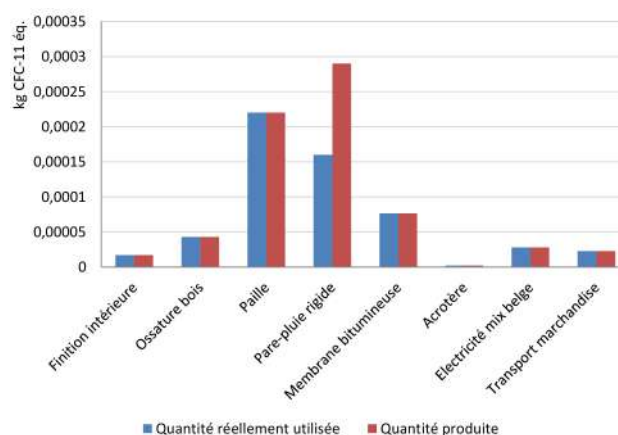


FIGURE 8.30 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la toiture PailleTech - Quantités utilisées vs. produites

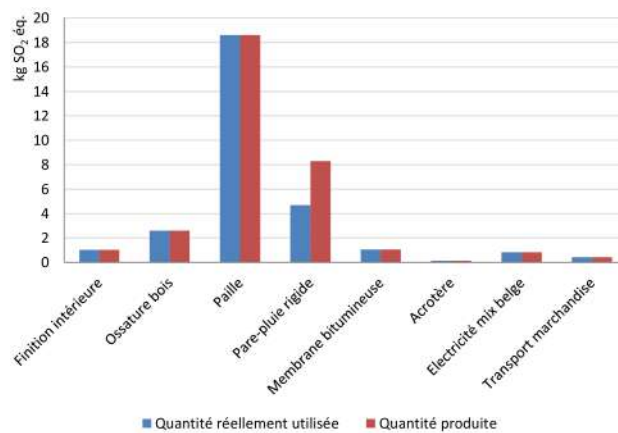


FIGURE 8.31 – Acidification - Émissions des constituants de la toiture Paille-Tech - Quantités utilisées vs. produites

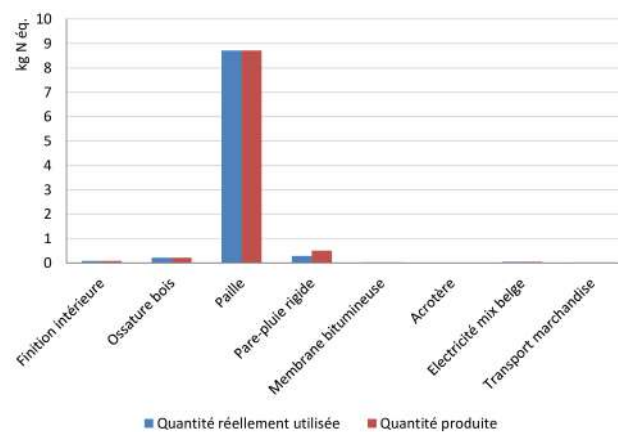


FIGURE 8.32 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la toiture PailleTech - Quantités utilisées vs. produites

8.5 Maison complète

Étudions maintenant la construction PailleTech dans son ensemble. Tout d'abord, comparons l'impact des différents types de parois (Figures 8.33 à 8.36). Il est important de noter que, malgré l'impact négatif de la paille dans les cloisons et la toiture, les émissions de la totalité du bâtiment restent positives en terme de réchauffement climatique. En ce qui concerne les trois autres critères analysés, on constate que ce sont ces mêmes parois qui possèdent les impacts les plus importants pour les raisons exprimées précédemment.

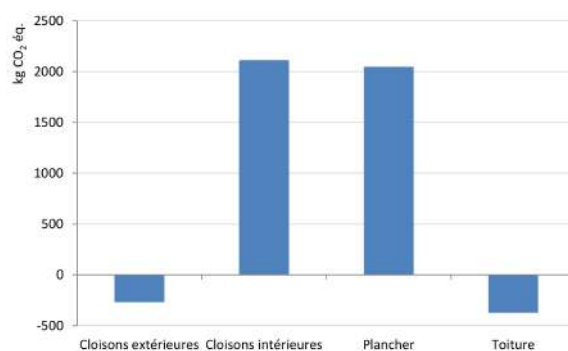


FIGURE 8.33 – Réchauffement climatique - Émissions des parois de la construction PailleTech

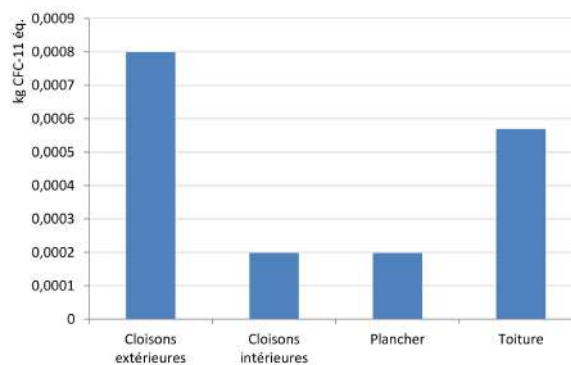


FIGURE 8.34 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des parois de la construction PailleTech

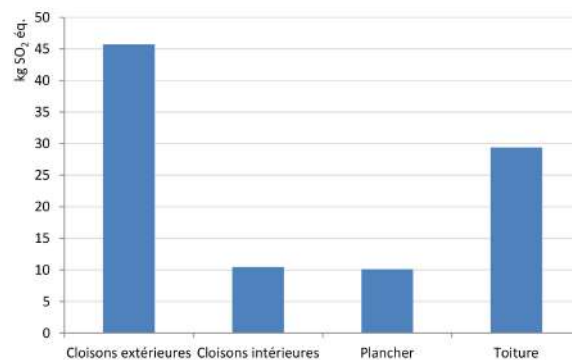


FIGURE 8.35 – Acidification - Émissions des parois de la construction Paille-Tech

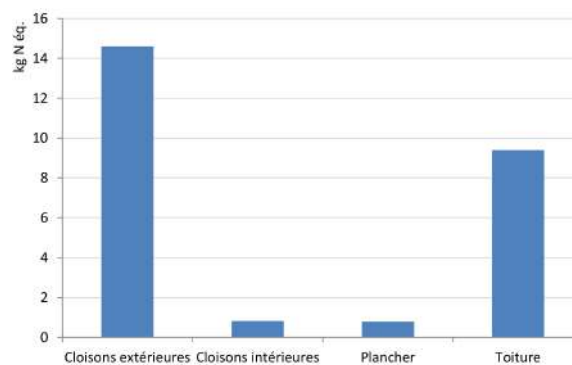


FIGURE 8.36 – Eutrophisation - Émissions des parois de la construction PailleTech

Nous entrons à présent dans les détails, grâce aux émissions de chaque type de matériau différent rencontré dans cette construction (Figure 8.37 à 8.40). On constate à nouveau l'impact négatif important de la paille dans les émissions de dioxyde de carbone et ses émissions importantes de CFC-11, de dioxyde de soufre et d'azote. Le bois massif a un impact relativement important aussi mais cela s'explique uniquement par les quantités mises en œuvre puisqu'il est presque l'unique composant des cloisons intérieures et du plancher. Les panneaux rigides se démarquent aussi dans ce sens mais l'explication vient ici de sa méthode de fabrication.

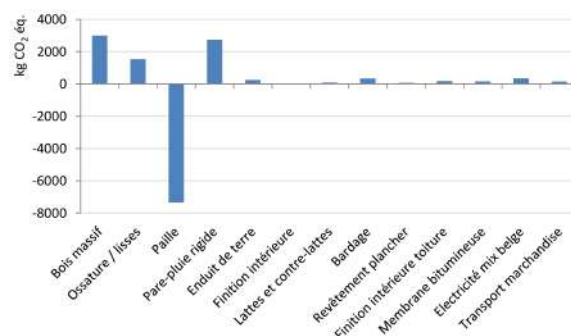


FIGURE 8.37 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la construction PailleTech

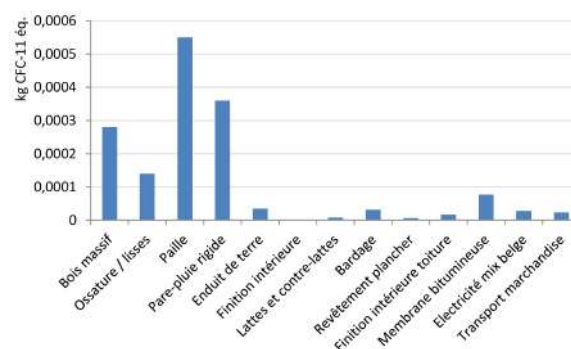


FIGURE 8.38 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des constituants de la construction PailleTech

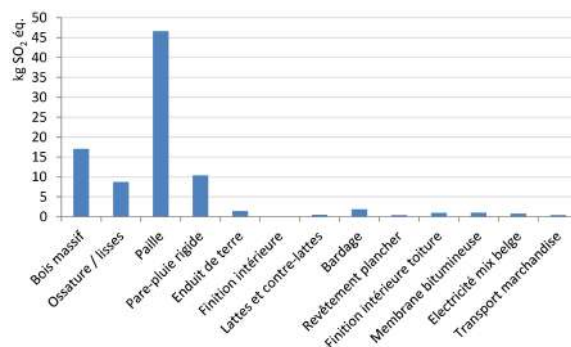


FIGURE 8.39 – Acidification - Émissions des constituants de la construction PailleTech

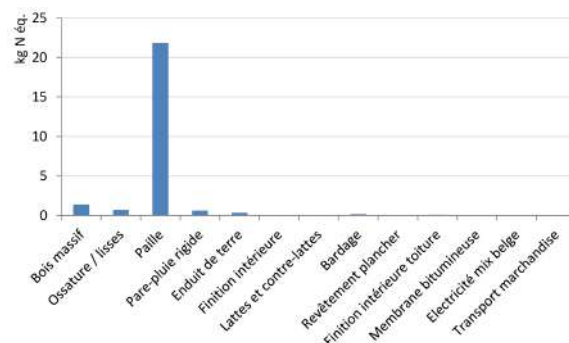


FIGURE 8.40 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la construction PailleTech

Pour terminer, nous effectuons la même analyse en considérant, cette fois, la différence entre les quantités réellement mises en œuvre et les quantités produites (Figures 8.41 à 8.44). C'est donc les panneaux de fibres de bois qui montrent l'écart le plus important.

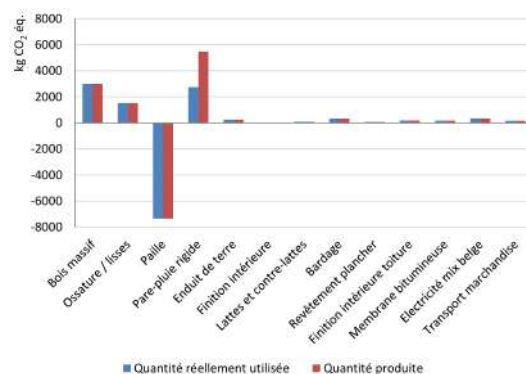


FIGURE 8.41 – Réchauffement climatique - Émissions des constituants de la construction PailleTech - Quantités utilisées vs. produites

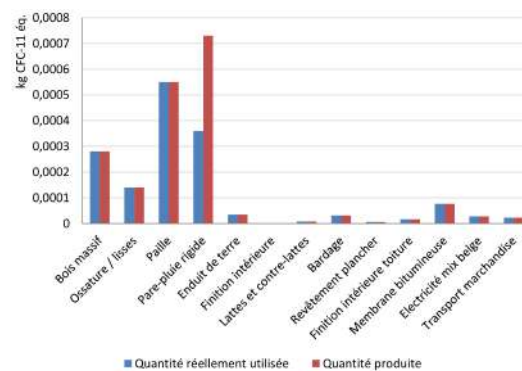


FIGURE 8.42 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions des constituants de la construction PailleTech - Quantités utilisées vs. produites

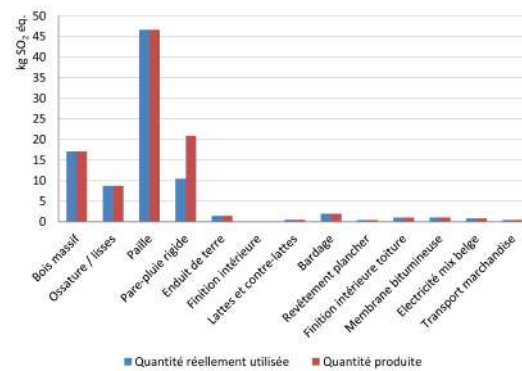


FIGURE 8.43 – Acidification - Émissions des constituants de la construction PailleTech - Quantités utilisées vs. produites

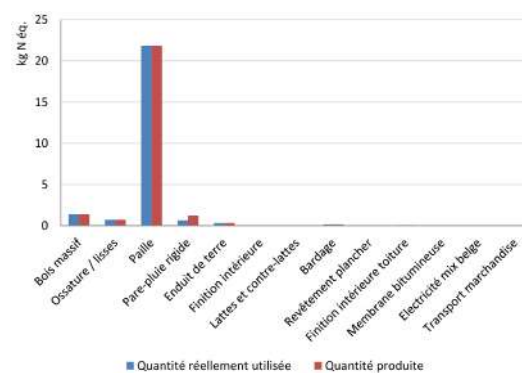


FIGURE 8.44 – Eutrophisation - Émissions des constituants de la construction PailleTech - Quantités utilisées vs. produites

8.6 Phase d'utilisation

Dans la phase d'utilisation, l'énergie pour le chauffage et les divers remplacements sont donc comptabilisés. C'est bien logiquement l'énergie pour le chauffage pour les 50 années de durée de vie de la maison qui est l'élément le plus impactant comme le montrent les Figures 8.45 à 8.48.

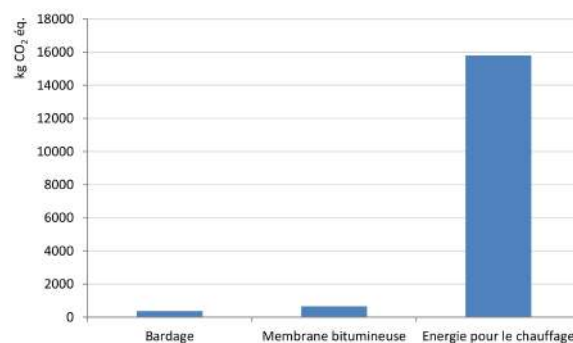


FIGURE 8.45 – Réchauffement climatique - Émissions de la construction PailleTech en phase d'utilisation (50 ans)

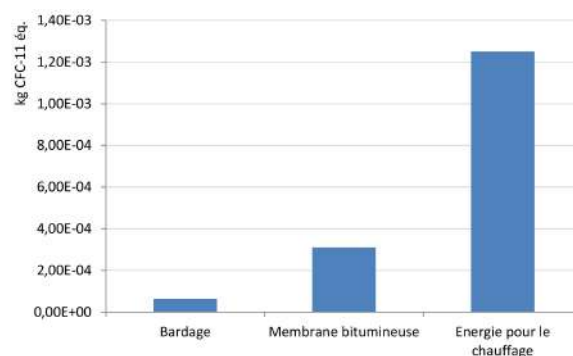


FIGURE 8.46 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions de la construction PailleTech en phase d'utilisation (50 ans)

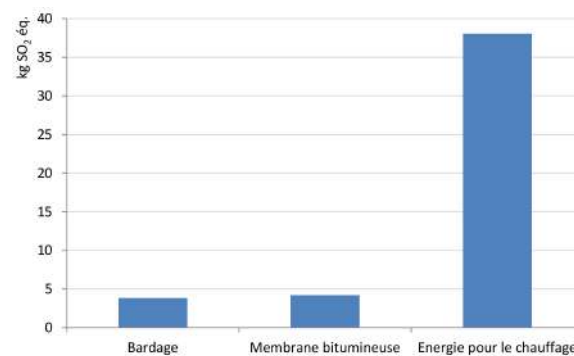


FIGURE 8.47 – Acidification - Émissions de la construction PailleTech en phase d'utilisation (50 ans)

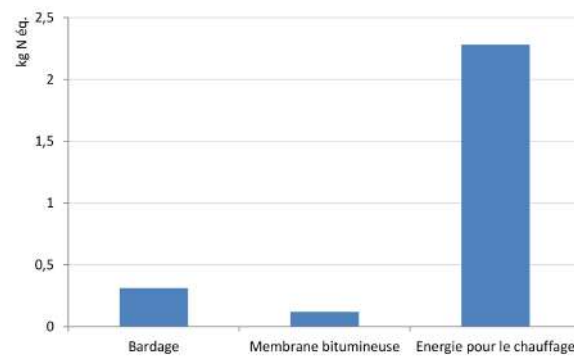


FIGURE 8.48 – Eutrophisation - Émissions de la construction PailleTech en phase d'utilisation (50 ans)

8.7 Coût du cycle de vie

Le prix de la construction (produits et pose) est tout d'abord déterminé. Il s'élève à 158 255 € pour la maison complète, soit près de 88 871 € pour les cloisons extérieures, 16 950 € pour les cloisons intérieures, 18 960 € pour le plancher et 33 480 € pour la toiture.

Nous nous concentrons maintenant sur l'argent à posséder au temps présent afin d'assurer la construction de la maison, le paiement de l'énergie pour le chauffage et les éventuels remplacements.

Le scénario de base considère un taux d'actualisation réel nominal de 4%, un taux de croissance des prix de l'énergie de 4% et un taux de croissance des prix pour les matériaux et les travaux de 2,5%. La valeur nette actuelle à posséder dans ce cas est de 213 555 €.

Le premier scénario alternatif considère un taux d'actualisation réel nominal de 6%, un taux de croissance des prix de l'énergie de 4% et un taux de croissance des prix pour les matériaux et les travaux de 2,5%. La valeur nette actuelle à posséder dans ce cas est de 192 330 €.

Le second scénario alternatif considère un taux d'actualisation réel nominal de 4%, un taux de croissance des prix de l'énergie de 6% et un taux de croissance des prix pour les matériaux et les travaux de 2,5%. La valeur nette actuelle à posséder dans ce cas est de 215 505 €.

9

Analyse comparative

Nous comparons d'abord les émissions totales de chaque construction complète. Par la suite, sont présentés les comparaisons des diverses parois afin d'entrer dans les détails et de comprendre les résultats obtenus pour les habitations dans leur totalité.

Nous observons tout d'abord que la construction traditionnelle est celle qui émet le plus de dioxyde de carbone (Figure 9.1). Puisqu'il s'agit, selon moi, du critère le plus important, la réponse à la question de départ qui était « Est-il possible, en Belgique, de construire différemment de la manière traditionnelle, tout en étant plus durable ? » est donc oui. En effet, les trois cas d'étude mettant en œuvre des matériaux régénératifs ont un impact potentiel moindre sur le réchauffement climatique. Celui de la construction IsoHemp est même négatif. C'est donc la construction la plus performante de ce point de vue puisqu'elle capte plus de dioxyde de carbone qu'elle n'en émet.

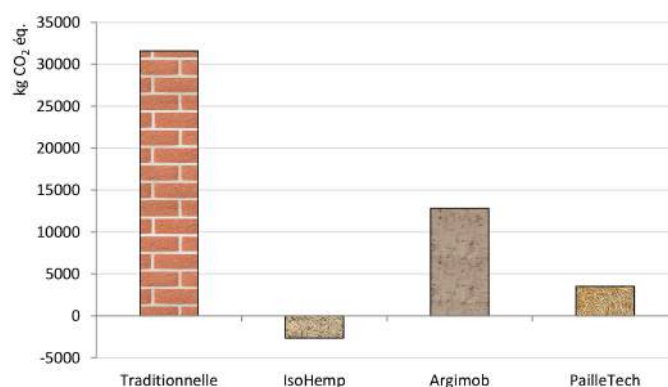


FIGURE 9.1 – Réchauffement climatique - Émissions des différents types de construction

Si nous poursuivons avec le critère suivant, qui est la diminution de la couche d'ozone (Figure 9.2), nous constatons que les résultats s'inversent. Cette fois, c'est la construction IsoHemp qui possède le plus mauvais résultat. Nous déterminerons plus loin dans le chapitre pourquoi nous pouvons observer un tel résultat (Figure 9.18). Les émissions de trichlorofluorométhane (CFC-11) de la construction traditionnelle sont équivalentes à celles des habitations ArgiMob et PailleTech.

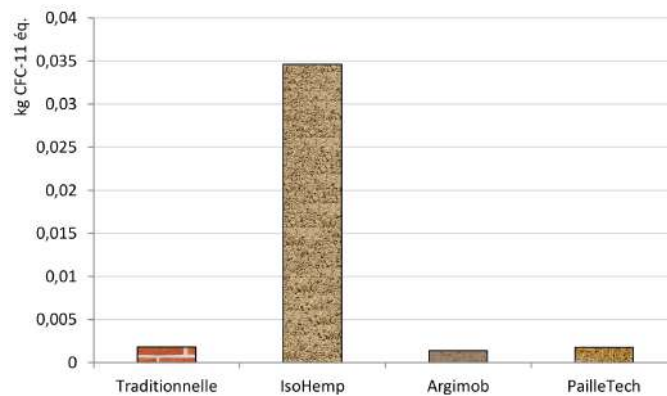


FIGURE 9.2 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des différents types de construction

L'analyse continue avec le troisième critère qui est l'acidification (Figure 9.3). Cette fois, c'est la construction PailleTech qui se distingue de part son émission importante de dioxyde de soufre. La maison traditionnelle la suit de très près. C'est à nouveau la construction IsoHemp qui est à l'origine du plus petit impact.

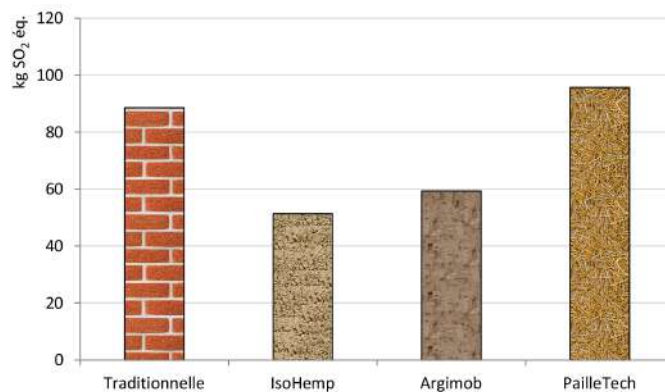


FIGURE 9.3 – Acidification - Émissions des différents types de construction

Analysons à présent le quatrième critère de l'analyse du cycle de vie, soit les émissions d'azote, à l'origine du phénomène d'eutrophisation (Figure 9.4). Comme précédemment, c'est la paille qui sort du lot. Les trois autres types de constructions ont des résultats équivalents, IsoHemp étant le meilleur d'entre eux.

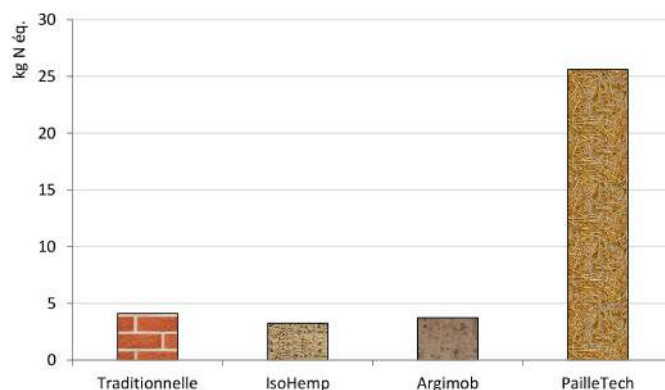


FIGURE 9.4 – Eutrophisation - Émissions des différents types de construction

Afin d'être aussi complet que possible, j'ai choisi de faire intervenir également dans ce chapitre le coût du cycle de vie par le biais d'une comparaison avec le taux d'émission de dioxyde de carbone (Table 9.1). On constate que l'habitation la moins coûteuse est celle qui est la plus polluante, soit la construction traditionnelle. Cependant la maison la plus onéreuse n'est pas celle qui est la plus écologique. En effet, la construction PailleTech est la plus chère : la préfabrication des parois se fait en usine avec une partie du travail effectuée à la main. De plus, peu de construction de ce type sont réalisées chaque année (plus ou moins 10). La construction la moins chère est en réalité la construction ArgiMob : la fabrication des parois est presque entièrement automatisée en usine et la société fournit des quantités importantes d'ossature bois chaque année, ce qui lui permet d'avoir un prix plus compétitif.

TABLE 9.1 – Comparaison entre les émissions de dioxyde de carbone des habitations et leur coût

Nom	Dioxyde de carbone [kg éq.]	Prix [€]
Traditionnel	31 562.55467	82 716.65
IsoHemp	-2 643,94169	110 806.82
Argimob	12 810.70138	85 198.76
PailleTech	3 517.782325	158 253.43

Pour mieux comprendre le résultat obtenu, nous pouvons comparer les impacts de chaque type de parois des quatre cas étudiés. Il convient bien évidemment de garder à l'esprit que seules les cloisons extérieures possèdent le même U et sont donc comparables. Les autres parois sont les parois types associées à chaque construction et ne sont donc présentées qu'à titre indicatif. Elles permettent également de lancer des pistes de réflexion dans le but d'améliorer les résultats obtenus en remplaçant certains matériaux par d'autres, mis en œuvre dans un autre cas et ayant donc fait la preuve qu'ils sont moins nocifs pour l'environnement que le matériau que nous pourrions chercher à modifier.

En ce qui concerne les cloisons extérieures (Figures 9.5 à 9.8), on observe que la paroi traditionnelle est celle ayant le plus mauvais impact pour trois des quatre critères, l'eutrophisation étant la seule exception. Nous avons vu dans les chapitres précédents que l'utilisation de la brique est en grande partie responsable de ce résultat. Une amélioration potentielle de la paroi traditionnelle pourrait donc se faire en modifiant sa finition extérieure et en la remplaçant par du bardage bois par exemple, celui-ci ayant fait ses preuves dans les trois autres cas d'étude. Les blocs de béton sont également responsables d'une partie non négligeable des émissions. Une bonne alternative aurait pu être de les remplacer par des blocs de béton de chanvre qui, eux, ont un impact négatif. Mais, ces derniers ne sont pas porteurs ce qui rend cette hypothèse invalide. Nous pouvons également noter que les panneaux en fibres de bois sont à l'origine d'une part importante des émissions de la paroi ArgiMob. Ils sont également présent dans la paroi PailleTech. A l'heure actuelle, je n'ai cependant pas d'alternative plus respectueuse de l'environnement et possédant les mêmes caractéristiques à proposer.

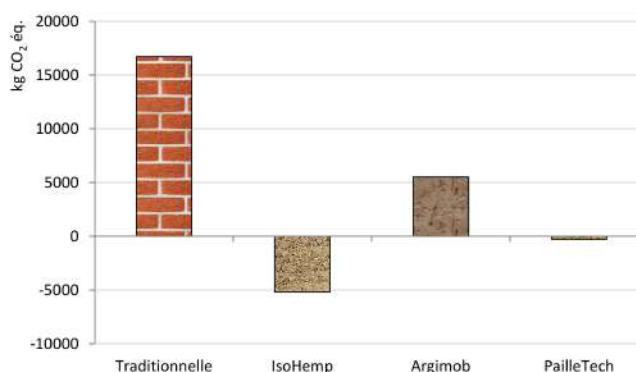


FIGURE 9.5 – Réchauffement climatique - Émissions des cloisons extérieures des différents types de construction

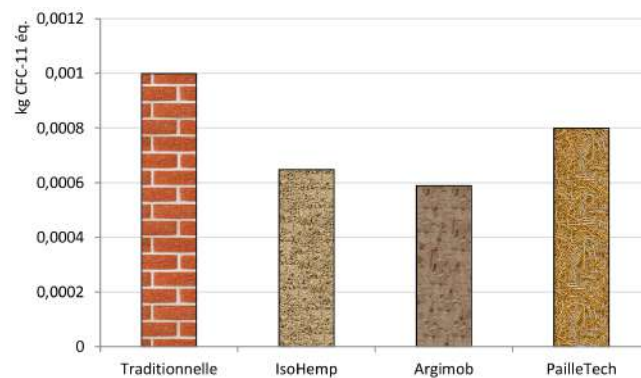


FIGURE 9.6 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions des cloisons extérieures des différents types de construction



FIGURE 9.7 – Acidification - Émissions des cloisons extérieures des différents types de construction

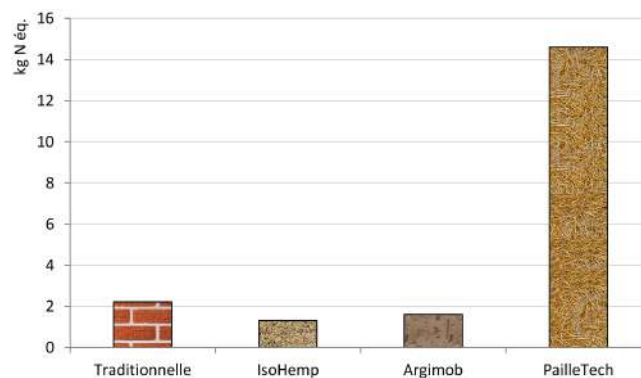


FIGURE 9.8 – Eutrophisation - Émissions des cloisons extérieures des différents types de construction

Nous constatons par ailleurs que, pour l'ensemble des critères étudiés, la paille et le chanvre ont un comportement relativement distinct, malgré le fait qu'ils soient tous deux issus de l'agriculture. Selon moi, cela s'explique pour plusieurs raisons. Premièrement, la construction PailleTech nécessite une plus grande quantité de paille que la construction IsoHemp. Près de 10 tonnes de paille sont ici utilisées contre 8 tonnes de granulats de chanvre. Deuxièmement, la culture du chanvre et celle du froment ne sont pas réalisées de la même manière, la plante évoluant différemment. Ainsi, la culture du chanvre ne nécessite aucun herbicide car la plante est relativement couvrante. Elle ne possède pas d'ennemis connus dans la nature : aucun pesticide ou insecticide n'est employé. Elle demande uniquement un apport en azote au moment des semis. Pour la culture du froment, c'est une toute autre histoire puisque pesticide, herbicides et fertilisants sont employés. Le dernier point à éclaircir est celle de l'allocation. En effet, pour la culture du froment, la paille est considérée dans le cadre de cette étude comme un co-produit de la céréale. Les produits résultants de la culture du chanvre sont quant à eux les chènevis (graines), la chènevotte (granulats) et les fibres de chanvre. Or, dans cette étude, seule la paille nous intéresse dans le premier cas et la chènevotte dans le second cas. J'ai donc choisi d'appliquer une allocation massique qui me permet de ne prendre en compte que les impacts dus au produit utilisé. Ainsi, dans le cas de la culture de froment, la paille est responsable de 63% des émissions totales et, dans le cas de la culture du chanvre, la chènevotte est responsable de 48% de l'impact. Ainsi, en combinant ces trois informations, les résultats et différences s'expliquent. Il serait dès lors intéressant d'étudier ces mêmes résultats en modifiant les modes de culture.

Si nous comparons maintenant ces cloisons en terme de coûts (Table 9.2), nous constatons que c'est bel et bien la cloison traditionnelle qui est la moins chère et la plus polluante. La cloison IsoHemp est quand à elle la plus écologique et la cloison PailleTech la plus onéreuse. C'est la construction ArgiMob qui se révèle être la moins chère parmi les constructions écologiques, IsoHemp la suivant de très près. Ainsi, les conclusions pour l'habitation complète sont également valables pour ces parois.

TABLE 9.2 – Comparaison entre les émissions de dioxyde de carbone des cloisons extérieures et leur coût

Nom	Dioxyde de carbone [kg éq.]	Prix [€]
Traditionnel	16 700.76486	41 243.99
IsoHemp	-5 184.25667	56 744.90
Argimob	5 518.34238	55 334.01
PailleTech	-270.02324	88 871.06

En ce qui concerne les cloisons intérieures (Figures 9.9 à 9.12), on observe que la cloison traditionnelle ne fournit à nouveau pas de bons résultats en terme d'émission de dioxyde de carbone mais, pour les autres critères, la différence n'est plus aussi marquée. On constate que l'utilisation de bois massif s'avère un bon choix en terme de réchauffement climatique mais pas en ce qui concerne les émissions de gaz à l'origine des problèmes d'acidification et d'eutrophisation. Cela ne me semble donc pas être une alternative possible afin de remplacer les blocs de béton dans la construction traditionnelle. Le plus efficace serait selon moi de réaliser les murs non porteurs en blocs de béton de chanvre. Même si leur impact sur la couche d'ozone est important, ils restent efficace pour les autres critère. Combinés avec des blocs de béton pour les murs porteurs, nous pourrions ainsi diminuer les émissions de dioxyde de carbone, de dioxyde de soufre et d'azote et maintenir à un niveau correct les émissions de CFC-11.

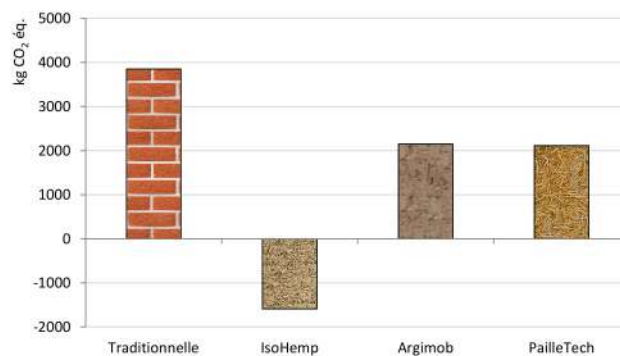


FIGURE 9.9 – Réchauffement climatique - Émissions des cloisons intérieures des différents types de construction

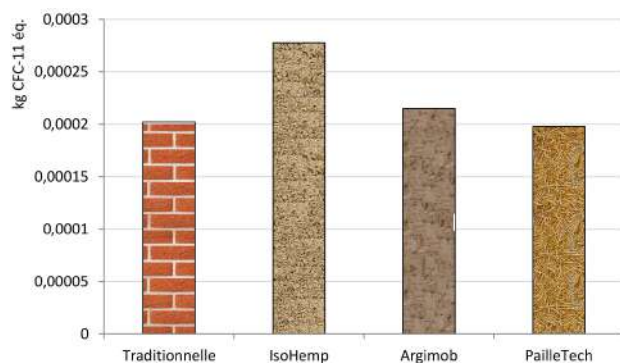


FIGURE 9.10 – Diminution de la couche d'ozone - Émissions des cloisons intérieures des différents types de construction

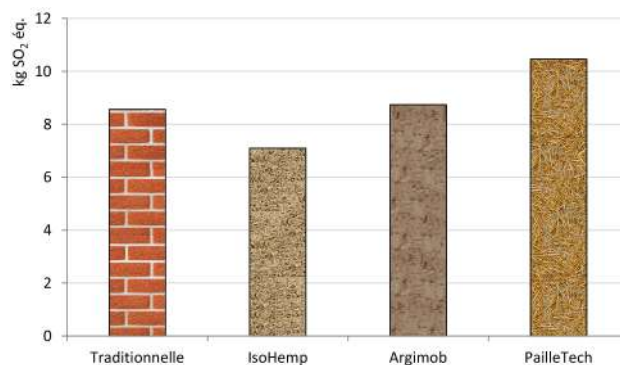


FIGURE 9.11 – Acidification - Émissions des cloisons intérieures des différents types de construction

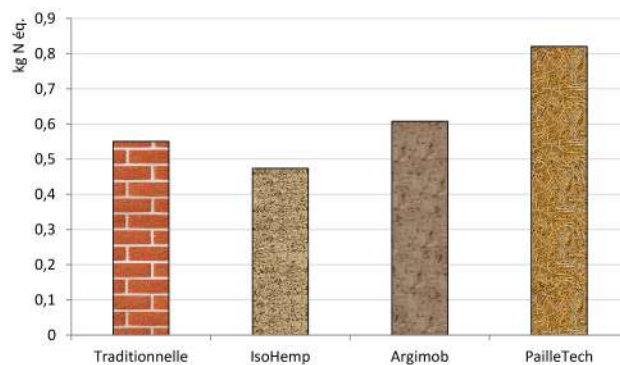


FIGURE 9.12 – Eutrophisation - Émissions des cloisons intérieures des différents types de construction

En terme de comparaison coût / émission de dioxyde de carbone (Table 9.3), nous n’observons pas cette fois les mêmes conclusions que précédemment. En effet, c’est la cloison intérieure ArgiMob qui est la plus intéressante économiquement. Au niveau écologique, c’est à nouveau la paroi IsoHemp qui sort son épingle du jeu avec un impact négatif. La construction traditionnelle reste tout de même la plus polluante. Il convient de garder à l’esprit, durant l’analyse de ces résultats, qu’il s’agit des parois types associées aux constructions étudiées. Ces parois n’ont donc pas les mêmes propriétés et ne sont pas véritablement comparables. Le but ici est bien de donner des résultats à titre indicatif et d’ouvrir le débat afin de réfléchir à diverses alternatives de construction qui pourraient éventuellement se révéler plus efficace.

TABLE 9.3 – Comparaison entre les émissions de dioxyde de carbone des cloisons intérieures et leur coût

Nom	Dioxyde de carbone [kg éq.]	Prix [€]
Traditionnel	3 849.65495	15 126.06
IsoHemp	-1 588.22464	16 021.40
Argimob	2 147.279296	11 556.00
PailleTech	2 112.344605	16 948.80

En ce qui concerne les planchers (Figures 9.13 à 9.16), il est à nouveau clairement visible que la construction traditionnelle est la solution la moins performante. Une manière de l'améliorer serait notamment de changer le revêtement de sol : le carrelage peut être remplacé par du bois, évitant ainsi l'étape de cuisson qui a un impact non négligeable sur l'environnement. Nous pouvons également observer que la paroi ArgiMob obtient de très bons résultats. Il convient cependant de garder en mémoire qu'il s'agit du seul plancher non isolé (perte de chaleur du rez de chaussée vers l'étage, mauvaise isolation phonique).

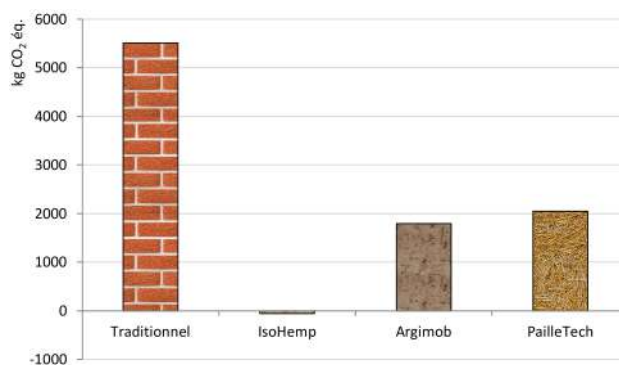


FIGURE 9.13 – Réchauffement climatique - Émissions du plancher des différents types de construction

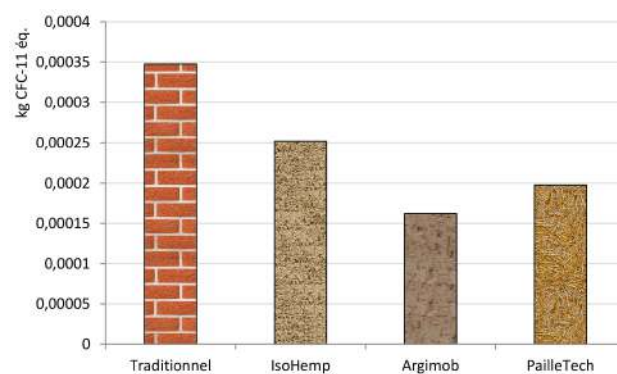


FIGURE 9.14 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions du plancher des différents types de construction

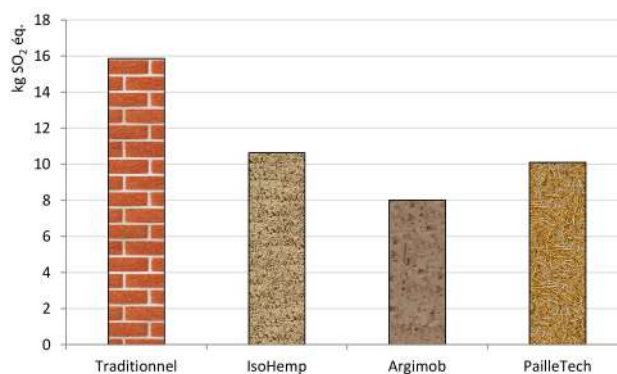


FIGURE 9.15 – Acidification - Émissions du plancher des différents types de construction

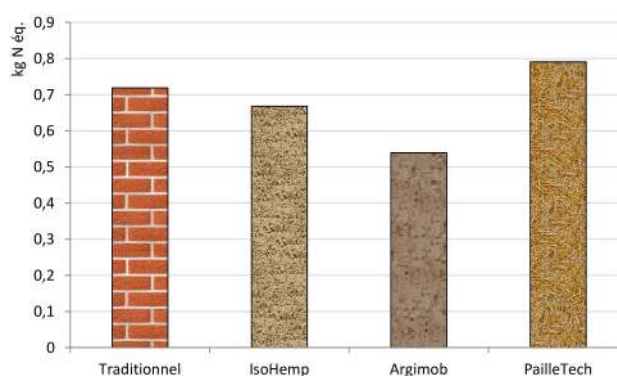


FIGURE 9.16 – Eutrophisation - Émissions du plancher des différents types de construction

En terme de coûts, c'est le plancher ArgiMob qui tire son épingle du jeu. En plus d'être le moins cher, il est une des solutions les moins polluantes. Il est cependant le seul à ne pas être isolé.

TABLE 9.4 – Comparaison entre les émissions de dioxyde de carbone des planchers et leur coût

Nom	Dioxyde de carbone [kg éq.]	Prix [€]
Traditionnel	5 509.08391	13 857.68
IsoHemp	-55.70079	17 593.33
Argimob	1 794.477436	10 467.91
PailleTech	2 048.730225	18 956.60

En ce qui concerne les toitures (Figure 9.17 à 9.20), les résultats sont relativement nuancés. C'est la construction traditionnelle qui émet le plus de dioxyde de carbone de part la présence de la dalle de béton. La meilleure solution du point de vue de ce critère est dès lors la construction PailleTech. Or, cette dernière s'avère être la moins performante en terme d'acidification et d'eutrophisation, résultats dus à l'impact de l'agriculture. IsoHemp ne tire pas non plus cette fois son épingle du jeu. Si ces résultats semblent corrects pour les trois critères cités préalablement, c'est sa toiture type qui possède la moins bonne performance en terme d'émission de trichlorofluorométhane (CFC-11) avec des émissions près de 30 fois supérieures à celles des autres parois, de part l'utilisation d'un isolant rigide synthétique (polystyrène). Il n'y a donc pas de solution idéale et ces dernières sont relativement difficiles à combiner afin de créer une paroi offrant de meilleures performances.

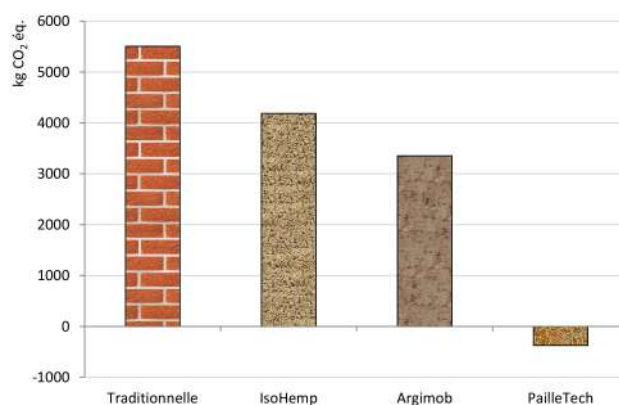


FIGURE 9.17 – Réchauffement climatique - Émissions de la toiture des différents types de construction

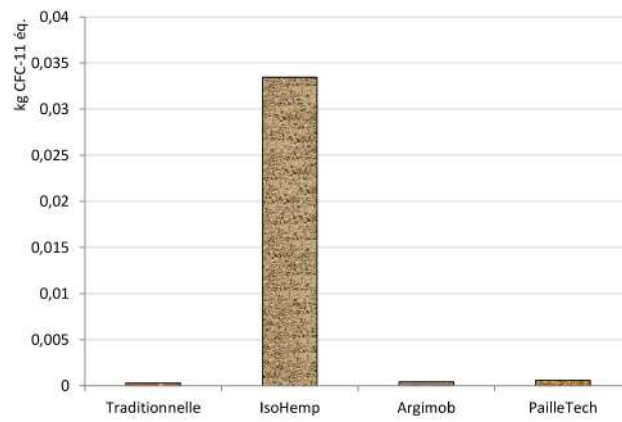


FIGURE 9.18 – Diminution de la couche d’ozone - Émissions de la toiture des différents types de construction

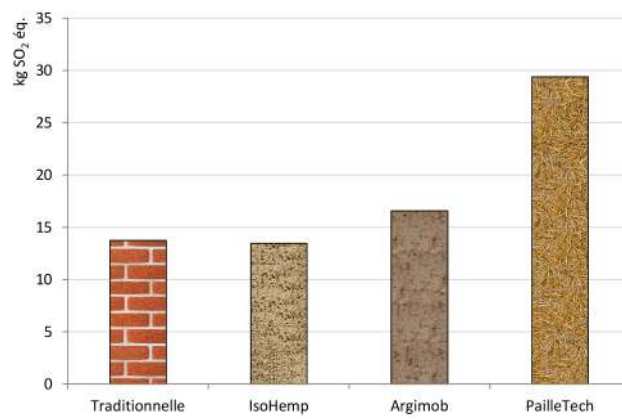


FIGURE 9.19 – Acidification - Émissions de la toiture des différents types de construction

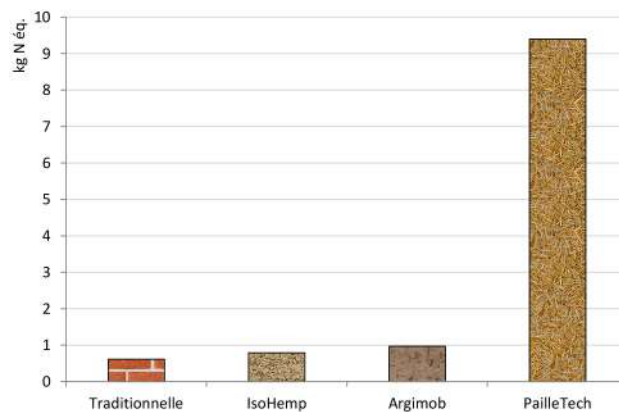


FIGURE 9.20 – Eutrophisation - Émissions de la toiture des différents types de construction

Finalement, nous allons comparer les résultats de la toiture en terme de réchauffement climatique avec les coûts associés à chaque type de toiture (Table 9.5). On constate qu'écologie et prix élevés vont de pair. La toiture traditionnelle est la moins performante écologiquement parlant. La paroi ArgiMob semble donc être un bon compromis alliant prix et pollution modérés.

TABLE 9.5 – Comparaison entre les émissions de dioxyde de carbone des toitures et leur coût

Nom	Dioxyde de carbone [kg éq.]	Prix [€]
Traditionnel	5 503.05095	12 488.92
IsoHemp	4 184.24041	20 447.19
Argimob	3 350.602266	7 840.84
PailleTech	-373.269265	33 476.97

Je terminerai ce chapitre en indiquant qu'il n'existe pas de solutions idéales à proposer. Il est tout à fait possible de construire de manière plus durable que la construction traditionnelle mais malheureusement cela a un coût. En effet, la construction traditionnelle étant celle qui est le plus fréquemment mise en œuvre, elle peut se permettre de pratiquer des coûts plus bas qu'une entreprise comme PailleTech par exemple qui se limite à 10 maisons par années. Nous retiendrons également que l'utilisation de matériaux naturels ne signifie pas qu'ils n'y a aucun impact sur l'environnement, comme nous avons pu l'apercevoir avec la paille et le chanvre.

10

Conclusion

L'analyse du cycle de vie est un outil d'évaluation de l'impact environnemental de plus en plus reconnu. Appliquée dans le cadre de cette étude, elle est couplée au calcul du coût du cycle de vie, permettant ainsi de mettre en parallèle les conséquences des diverses constructions étudiées sur l'environnement et les contraintes financières associées.

L'objectif de ce mémoire est de répondre à la question « Est-il possible, en Belgique, de construire différemment de la manière traditionnelle, tout en étant plus durable ? » La réponse est assurément positive. Mais derrière cet objectif se cache également la volonté de fournir une aide à la prise de décision aux candidats bâtisseurs et de leur faire découvrir les alternatives possibles offertes par des entreprises belges, locales, tournées vers l'avenir et conscientes de l'importance du concept de développement durable. Modifier notre manière de vivre et de construire est un des paliers du changement auquel nous devons parvenir si nous voulons assurer un avenir aux générations futures.

Il faut tout de même rester conscient du fait qu'il n'existe pas de solution idéale. A ce jour, l'architecture écologique est, je pense, avant tout une architecture de conviction. Elle reste généralement réservée à une minorité pour qui les moyens financiers ne sont pas à l'origine du choix du type de construction. Y aurait-il dès lors moyen de démocratiser cette architecture ? De mieux la faire connaître et de la rendre accessible à tout un chacun ?

Une analyse du cycle de vie est un travail de longue haleine, qui demande de la précision et qui, en règle générale, s'étend sur une longue période car la récolte de l'ensemble des données nécessaires demande beaucoup de temps (l'optimum étant de mesurer ces données soi-même et non de simplement contacter l'entrepreneur pour qu'il les fournisse). Il convient dès lors de relativiser la portée de ce mémoire. Au vu du temps imparti et du nombre de cas

étudiées, il s'est révélé indispensable d'imposer de nombreuses limites et hypothèses. Cette étude pourrait et devrait donc être approfondie et complétée.

Une première piste pour cela est d'ajouter les étapes qui n'ont pas été comptabilisées, soit le transport jusqu'au chantier, la mise en œuvre, la consommation d'eau tout au long de la vie du bâtiment, sa maintenance et son nettoyage mais aussi la fin de vie de chacun des matériaux.

La mise en œuvre est en effet distincte d'une construction à l'autre puisque les entreprises PailleTech et Mobic fournissent les cloisons complètes, diminuant ainsi le temps de chantier. C'est une façon de lancer des pistes de réflexion sur la préfabrication : permet-elle réellement de réduire les coûts et pourrait-elle constituer l'avenir de la construction ?

La fin de vie possède également un rôle important. Certains matériaux peuvent être valorisés, réutilisés, recyclés voire compostés ou même brûlés pour permettre de fournir de l'énergie. Cette étape n'a pas été abordée ici car les possibilités sont nombreuses et, celle-ci ayant lieu en fin de vie de la construction, soit dans 50 ans ou plus, elle est relativement incertaine. Une piste de réflexion qu'il serait également intéressant d'approcher est celle de l'avenir de l'habitation en tant que telle. Quelles sont ses possibilités d'évolution ou de transformations s'il y en a ? Qu'advient-il d'elle par exemple lorsque la famille change et que les enfants quittent le nid familial ? Y a-t-il moyen de l'adapter au fur et à mesure que les besoins des occupants changent ? Quels impacts cela peut-il avoir écologiquement et économiquement parlant ?

La pose d'hypothèses et plus précisément celles concernant la consommation d'énergie pour le chauffage a un impact sur l'analyse du coût du cycle de vie. En effet, au vu des limitations de l'étude et du choix de cette valeur, cette dernière n'a plus vraiment de sens et aurait pu se limiter au calcul du prix de construction des habitations. En effet, le but du calcul des coûts du cycle de vie est de mener une réflexion sur l'avenir de l'habitation en fonction des choix qui ont été faits et des coûts qu'ils engendrent. Il devient alors possible de valider certains des choix faits ou de modifier certains éléments afin que le projet soit plus intéressant économiquement parlant sur le long terme sans pour autant oublier son impact sur l'environnement. Or, dans le cas présent, les limitations posées font que seul le prix initial est un indicateur intéressant. Il aurait également été intéressant d'effectuer une simulation énergétique afin de déterminer les consommations réelles des bâtiments, qui me semble-t-il ne doivent pas être identiques dans la réalité du terrain.

Une notion qui n'a pas été abordée non plus et qui viendrait compléter ce travail avec un aspect un peu plus humain est celle du confort. Faute de temps, il n'est fait aucune mention au confort des habitants, qu'il soit hygrothermique, acoustique ou autre. Pourtant il est très différent de vivre dans une maison en béton ou dans une maison en bois par exemple. Qu'en est-il d'une maison en paille, en béton de chanvre ou comportant de grandes quantités d'argile ? C'est un aspect de la construction qui a, pour le candidat bâtisseur, autant d'intérêt, voire plus, que les considérations économiques et environnementales.

C'est donc sur ces pistes de réflexion et possibilités d'amélioration de ce travail que se conclut cette expérience enrichissante et passionnante qu'a été la réalisation de ce mémoire.

11

Références

Allacker, K. (2010). *Sustainable building - the development of an evaluation method*. Thèse de doctorat en faculté d'ingénieur civil architecte, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven.

Antohie, E. (2010). *The role of estimation on construction life cycle*. Buletinul Institutului Poletehnic Din Iasi, Universitatal Tehnica Gheorghe Asachi din Iasi, tome LVI, fascicule 1.

AproPaille (2016). *La paille, parois performantes - Vadémécum 2*. Issu de la recherche AproPaille - Appel à projet ERable sur base d'une subvention de la Région Wallonne.

Argibat (2016). *Argibat - Qui sommes-nous ?* En ligne <http://www.argibat.com/fr/qui-sommes-nous>, consulté le 15 août 2016.

AWAC (2014). *Le changement climatique*. En ligne <http://www.awac.be/index.php/thematiques/changement-climatique>, consulté le 10 mars 2016.

Azari, R. (2014). *Integrated energy and environmental life cycle assessment of office building envelopes*. Energy and Buildings, 82, 156-162. DOI : 10.1016/j.enbuild.2014.06.041.

Baumann, H. & Gluch, P. (2004). *The life cycle costing (LCC) approach : a conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making*. Building and Environment, 39, 571-580. doi : 10.1016/j.buildenv.2003.10.008

Bueno, C. ; Zwicky Hauschild, M. ; Rossignolo, J.-A. ; Ometto, A.-R. & Crespo Mendes, N. (2015). *Sensitivity analysis of the use of life cycle impact assessment methods : a case study on building materials*. Journal of Cleaner Production, 112, 2208-2220. DOI : 10.1016/j.jclepro.2015.10.006.

Byule, M. ; Braet, J. & Audenaert, A. (2013). *Life cycle assessment in the construction sector : a review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 26, 379-388. DOI : 10.1016/j.rser.2013.05.011.

Chou, J.-S. & Yeh, K.-C. (2015). *Life cycle carbon dioxide emissions simulation and environmental cost analysis for building construction*. Journal of Cleaner Production, 101, 137-147. DOI : 10.1016/j.jclepro.2015.04.001.

Confédération construction (2014). *Dossier : Construire pour 2020 - Quelle trajectoire vers le quasi zéro énergie ?* Article en ligne [http ://www.confederationconstruction.be/Portals/19/Cellule%20Energie%20Environnement/Articles%20Construction/article%20cellule%20fev.2014.pdf](http://www.confederationconstruction.be/Portals/19/Cellule%20Energie%20Environnement/Articles%20Construction/article%20cellule%20fev.2014.pdf), consulté le 10 mars 2016.

DGO4 - Architecture et Climat (sd). *La résistance thermique*. En ligne [http ://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16919](http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16919), consulté le 14 août 2016.

European Commission - Joint research centre - Institute for environment and sustainability (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for life cycle assessment - detailed guidance* (1ère éd.). Luxembourg publications office of the European Union, Luxembourg ; EUR 24708 EN.

Hoyet, N. (2013). *Matériaux et architecture durable : Fabrication et transformations - Propriétés physiques et architecturales - Approche environnementale*. Paris : Dunod.

Ingrao, C. ; Scrucca, F. ; Tricase, C. & Asdrubali, F. (2016). *A comparative life cycle assessment of external wall-compositions for cleaner construction solutions in buildings*. Journal of Cleaner Production, 124, 283-298. DOI : 10.1016/j.jclepro.2016.02.112.

ISO (2008). *ISO15686-5 Buildings and constructed assets - Service-life planning - Part 5 : Life-cycle costing* (1ère éd.). Suisse.

IsoHemp (2016). *Isohemp*. En ligne [http ://www.iso hemp.be](http://www.iso hemp.be), consulté le 15 août 2016.

Kara, S. (2014). *CIRP Encyclopedia of Production Engineering : Life Cycle Cost Definition*. The international academy for production engineering, Luc laperrière & Gunther Reinhart. DOI : 10.1007/978-3-642-20617-7.

Livios - Construire pour l'avenir (sd). *Qu'est-ce que la construction bio-écologique ?* En ligne <http://livios.be/fr/info-construction/construire-renover-ou-acheter/durable-quoi-pourquoi-comment/construction-bio-ecologique/quest-ce-que-la-construction-bio-ecologique/>, consulté le 22 mai 2016.

Martin A. (2015). *Et un de plus ! Le Libramont Exhibition and Congress rejoint la marque Ardenne*. Image en ligne sur blog.marque-ardenne.com/author/a-martinfthb-be/, consulté le 03 mai 2016.

Médias Transcontinental S.E.N.C (2015). *Architecture régénérative*. En ligne <http://www.voirvert.ca/communaute/wiki/architecture-regenerative>, consulté le 3 mars 2016.

Menet, J.-L. & Gruescu, I.-C. (2014). *A comparative life cycle assessment of exterior walls constructed using natural insulation materials*. Environmental Engineering and Sustainable Development Entrepreneurship, 1(4), 14p. HAL ID : hal-00952027.

Mengoni, J.-C ; (2011). *La construction écologique - Matériaux et techniques*. Terre vivante, France.

Monteiro, H. & Freire, F. (2011). *Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls : comparison of three impact assessment methods*. Energy and Buildings, 47, 572-583. DOI : 10.1016/j.enbuild.2011.12.032.

Mobic (2016). *Mobic - Qui sommes-nous ?* En ligne <http://www.mobicsa.be/notre-entreprise>, consulté le 15 août 2016.

NaturHome (2016). *Présentation du concept de maison Ncube*. Document non publié, Gouvvy (Belgique).

NaturHome (2016). *L'entreprise - Historique*. En ligne <http://www.naturhome.be/fr/169/Historique>, consulté le 24 mars 2016.

OpenLCA (2016). *OpenLCA - Présentation*. Image en ligne <http://www.openlca.org>, consulté le 03 mars 2016.

PailleTech (2015). *Les règles PailleTech*. Document disponible en ligne : <http://www.pailletech.be/vademecum/>, téléchargé le 27 août 2015.

PailleTech (2016). *L'histoire de PailleTech*. En ligne <http://www.pailletech.be/a-propos-2/histoire-de-paille-tech/>, consulté le 15 août 2016.

Pantoine, M.-F. (2014). *Calculer l'impact environnemental des produits - Guide sur l'analyse du cycle de vie et la production d'une déclaration environnementale de type III*. Éditions universitaires européennes, Allemagne.

Plateforme Maison Passive asbl (2013). *Vademecum résidentiel - Guide d'aide à la conception de bâtiment à haut niveau de performance énergétique* (éd.1.01.). En ligne http://www.maisonpassive.be/IMG/pdf/vade-mecum-pdf_hd.pdf, consulté le 3 mars 2016.

PRé Consultants (2016). *Ecoinvent v3 - what is new in the ecoinvent database ?* Image en ligne <http://www.pre-sustainability.com/ecoinvent-v3-what-is-new>, consulté le 03 mars 2016.

Pretot, S. ; Collet, F. & Garnier, C. (2013). *Life cycle assesement of a hemp concrete wall : Impact of thickness and coating*. Building and Environment, 72, 223-231. DOI 10.1016/j.buildenv.2013.11.010.

Ratna Reddy, V ; Kurian, M & Ardakanian, R. (2015). *Life-cycle cost approach for management of environmental resources*. Springer Cham Heidelberg, New York - Dordrecht - London. DOI : 10.1007/978-3-319-06287-7.

Reiter, S. (2010). *Life cycle assessment of buildings - a review*. Arcelor-Mittal International Network in Steel Construction, Sustainable Workshop and Third Plenary Meeting, Bruxelles.

Romain (2014). *Publipostage avec Word et Excel 2010*. Image en ligne <http://jemeformeunumerique.fr/2014/03/31/publipostage-avec-word-et-excel-2010/>, consulté le 5 mai 2016.

Ruelle, F. (2008). *Le standard « maison passive » en Belgique : Potentialités et obstacles*. Mémoire de fin d'étude en gestion de l'environnement et aménagement du territoire non publié, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles.

Russel-Smith, S. & Lepech, M. (2015). *Cradle-to-gate sustainable target value design : integrating life cycle assessment and construction management for buildings*. Journal of Cleaner Production, 100, 107-115. DOI : 10.1016/j.jclepro.2015.03.044.

Sathre, R & Gonzalez-Garcia, S. (2014). *Life cycle assessment (LCA) of wood-based building materials in Eco-efficient construction and building materials*. Woodhead Publishing Limited, Philadelphia. DOI : 10.1533/9780857097729.2.311.

Simonen, K. (2014). *Life cycle assessment*. Pocket Architecture : Technical Design Series, Routledge, London and New York.

Singh, A. ; Berghorn, G. ; Joshi, S. & Syal, M. (2011). *Review of life-cycle assessment applications in building construction*. Journal of architectural engineering, 17, 1, 15-23. DOI : 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000006.

Sketchup (2015). *What's new in Sketchup 2016*. Image en ligne http://www.youtube.com/watch?v=ih2sf_gaYqQ, consulté le 5 juin 2016.

Sterner, E. (2000). *Life-cycle costing and its use in the Swedish building sector*. Building Research & Information, 28 (5/6), 387-393.

Université de Valenciennes (2012). *Démarche d'analyse du cycle de vie : Principes, méthodologie, exemples d'application aux matériaux et éléments de construction*. En ligne http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACV/BAT20120704/acvbat/accueil/co/acvbat_010_accueil.html, consulté le 10 mars 2016.

Voir Vert - Le portail du bâtiment durable au Québec (sd). *Architecture régénérative*. En ligne <http://www.voirvert.ca/code/4482>, consulté le 22 mai 2015.

West, S. (2011). *Life cycle costing for building services*. Vidéo en ligne <http://vimeo.com/23633920>, consultée le 1 mars 2016.

Wienerberger (2016). *Brick award 2016 - 2226, Austria*. Image en ligne <http://clay-wienerberger.com/expertise/building-2226-lustenau-austria>, consultée le 14 août 2016.

Wilkin, C. ; Brennan, M. ; Deora, A. ; Heegaard, A. ; Lee, A. & Lubell, J. (2015). *Comparing the life cycle costs of new construction and acquisition-rehab of affordable multifamily rental housing*. Housing policy debate, 25 :4, 684-714. DOI : 10.1080/10511482.2014.1003141.

12

Annexes

12.1 Inventaire des abréviations

- ACV - Analyse du Cycle de Vie
- ATG - Agrément Technique / Technische Goedkeuring
- AWAC - Agence Wallonne de l’Air et du Climat
- BEP Namur - Bureau Économique de la Province de Namur
- BIM - Building Information Modelling
- CAD - Computer Aided Design
- CCV - Coût du Cycle de Vie
- COCON - COMparaison de solution CONstructives, de CONfort et d’émission de CO_2
- CSTC - Centre Scientifique et Technique de la Construction
- EPD - Environmental Product Declaration
- EPDM - Éthylène-Propylène-Diène-Monomère
- EUSBBA - EUropean Straw Bale Building Association
- ICEDD - Institut de Conseil et d’Études en Développement Durable
- ISO - International Organisation for Standardization
- MDF - Medium Density Fibreboard
- OSB - Oriented Strand Board
- PEB - Performance Énergétique des Bâtiments
- PEFC - Programme for Endorsement of Forest Certification schemes
- PME - Petites et Moyennes Entreprises
- RF - Résistance au feu
- VNA - Valeur Nette Actuelle
- WISBA - Wienerberger Sustainable Building Academy
- WWF - World Wildlife Fund

12.2 Concept Sheet & Quad Chart

Vous trouverez dans les pages qui suivent la « Concept sheet » et le « Quad Chart » qui ont été réalisés en amont de ce travail.

ACV & CCV de matériaux régénératifs : Analyse comparative dans le secteur résidentiel belge

Comment pouvons-nous construire, en Belgique, autrement que de manière traditionnelle, tout en étant plus durable ?

1

Introduction

- Changement climatique
- Implication du secteur de la construction
- But et objectif
- Structure du travail
- Introduction de WISBA
- Définition du titre

3

Méthodologie

- Quel programme (DesignBuilder, SimaPro, OpenLCA...) ?
- Quels aspects des différentes constructions seront analysés ?
 - Analyse du cycle de vie
 - Cout du cycle de vie

5

Résultats

- Comparaison des différents cas d'étude de manière graphique
- Création d'une check-list destinée aux architectes ?

2

Etat de l'art

- Critères et concepts nécessaires
- Cas d'étude avec des matériaux naturels (paille, argile, béton de chanvre et bois)
- Cas d'étude d'une construction dite traditionnelle (briques)
- Concept de maison passive
- Plans de maisons correspondant aux principes à mettre en valeur comme la durabilité, la compacité etc.

4

Analyse de cas

- Explication du travail réalisé à l'aide du logiciel
- Présentation des résultats obtenus pour l'ensemble des cas étudiés

6

Conclusion

- Résumé
- Conséquences
- Ouverture avec l'introduction d'un outil qui pourrait aider les architectes et/ou les étudiants dans leurs choix

7

Annexes

- Plans
- Base de données créées
- Interviews s'il y en a

ACV & CCV de matériaux régénératifs : Analyse comparative dans le secteur résidentiel belge

Comment pouvons-nous construire, en Belgique, autrement que de manière traditionnelle, tout en étant plus durable ?

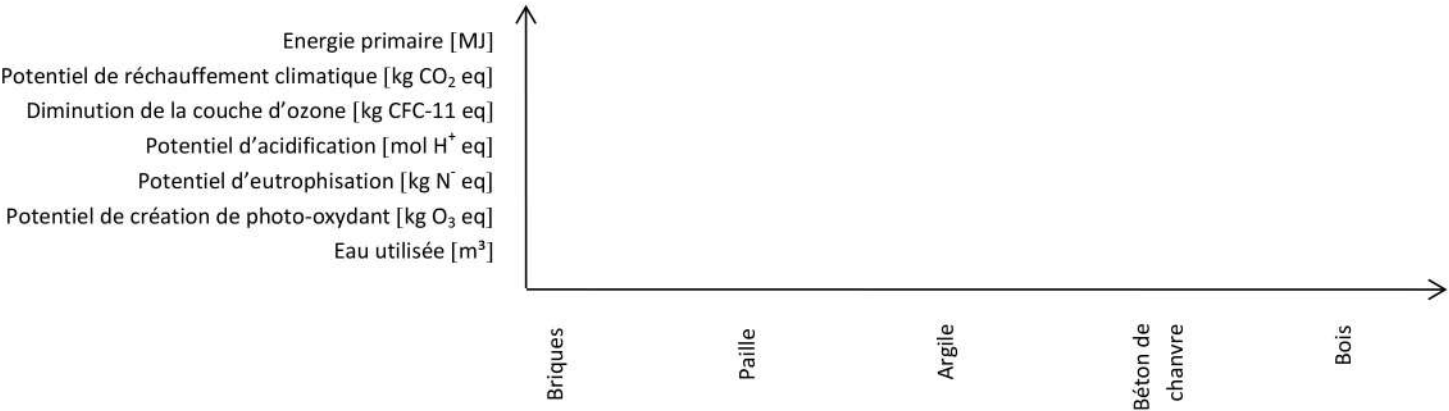
Delvenne Florence

But/Objectif <i>Pourquoi ce projet doit-il être réalisé ? Dans quel but ? Quel en sera le résultat ?</i> Le but de ce travail est théorique, lié à un problème sociétal. La problématique principale est l'impact négatif des constructions dites « traditionnelles » sur l'environnement. Ainsi, le but de ce mémoire est de prouver qu'il est possible de renverser cette tendance, de passer d'un impact négatif à un impact positif grâce à la modification des techniques de construction, c'est-à-dire dans mon cas, les matériaux utilisés. Afin d'atteindre ce but, quatre objectifs principaux doivent être remplis: - Une revue de littérature autant sur les maisons à impact négatif (constructions dites traditionnelles) et sur les maisons à impact positif (une attention particulière sera apportée au premier cas puisqu'il ne fera pas l'objet d'un cas d'étude) ; - L'identification des critères de conception durable/régénérative (avec une attention particulière portée sur les points qui feront l'objet de ce mémoire) ; - La sélection et l'évaluation des cas d'études qui sont au nombre de quatre (maisons en paille, argile, béton de chanvre, bois); - Une analyse comparative entre les maisons traditionnelles et les différents cas d'études (tous atteignant les performances des maisons passives) afin de créer une check list dans le but d'aider les (futurs) architectes dans leurs choix.	Audience ou partie prenante <i>Qui est concerné par ce projet ? Qui va en bénéficier ? Qui va-t-il concerné ?</i> Des architectes professionnels, des candidats bâtisseurs et des entreprises de constructions peuvent être impliqués dans un tel projet et bénéficier des connaissances qui peuvent en découler.
Innovation <i>Qu'apporte-t-il de nouveau ? Un projet similaire a-t-il déjà été réalisé ? Qu'est ce qui le rend différent ?</i> Ce mémoire pourrait: - Apporter des modifications dans la manière de construire ou au moins être à l'origine d'une réflexion de la part des architectes, des entreprises de construction et des candidats bâtisseurs ; - Apporter une nouvelle économie circulaire en Wallonie; - Réduire les émissions / la pollution due au secteur de la construction ; - Inverser la tendance actuelle en passant de constructions à impact négatif à celles ayant un impact positif sur l'environnement; - Augmenter l'efficacité des bâtiments à construire.	Impact <i>Impact ?</i> Des recherches menées grâce à certains mots clés (maison – impact positif – régénérative – Belgique – etc.) m'ont démontré que peu d'études ont déjà été réalisées sur ce sujet. Cependant, davantage de papiers ont été écrits sur les constructions traditionnelles et leur impact négatif ainsi que sur les diverses possibilités d'améliorer leurs performances et efficacité (ce qui s'avère très utile dans le cadre de ma revue de littérature). Dans le cadre de ce travail, je souhaite rester dans un contexte belge et réaliste, ce qui implique des matériaux produits en Belgique ainsi que le savoir-faire d'entreprises, belges elles aussi. Cela me permettrait donc de valoriser les produits et l'innovation de notre pays ainsi que de mettre en avant des entreprises locales.

Résultats

Visualiser tous les résultats (graphes, tableaux, qu'il est attendu de produire)

En ce qui concerne l'analyse du cycle de vie, les résultats attendus sont ceux contenus dans l' " Environment Product Declaration (EPD) » :



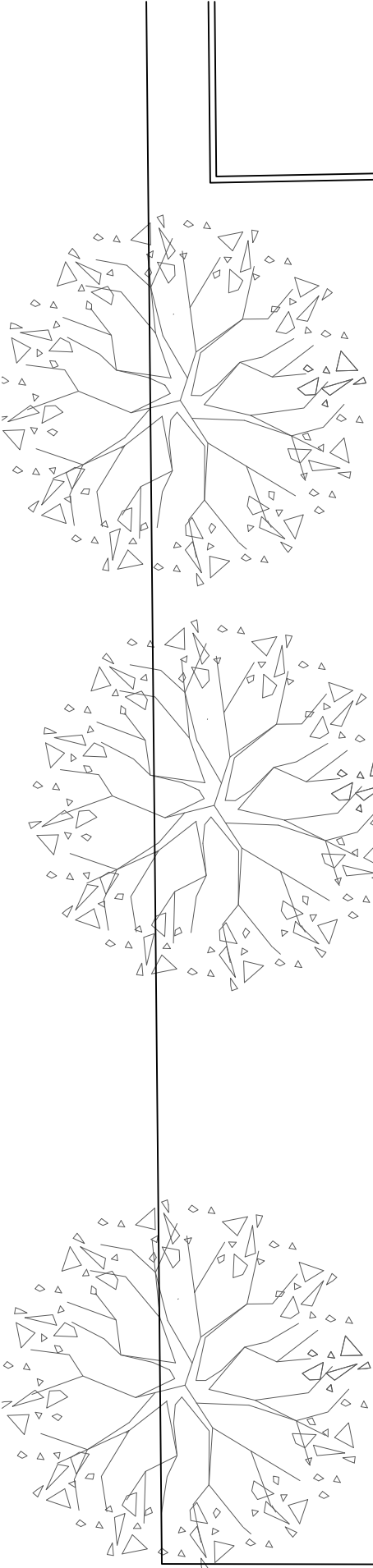
En ce qui concerne les couts du cycle de vie, une feuille Excel fournie dans le cadre du programme international WISBA 2015 sera utilisée et les résultats présentés sous forme de tableau:

Nombre d'années	Cout d'investissement [€]	Cout d'utilisation [€]	Cout de maintenance [€]	Cout de l'énergie [€]
1				
10				
25				
50				

12.3 Maison NCube à Aubange - Plans originaux

Vous trouverez dans les pages qui suivent le plan du rez de chaussée ainsi que le plan du premier étage de la maison sélectionnée, tous deux à l'échelle 1.100. Les plans sont ici tel que fourni par la société Naturhome.

Year	1950 Projection (%)	1980 Projection (%)
1950	6.0	6.0
1960	7.0	7.0
1970	8.0	8.0
1980	9.0	9.0
1990	10.0	11.0
2000	11.0	13.0
2010	12.0	15.0
2020	13.0	17.0
2030	14.0	19.0
2040	15.0	20.0
2050	16.0	20.0

**Lot n° 4**

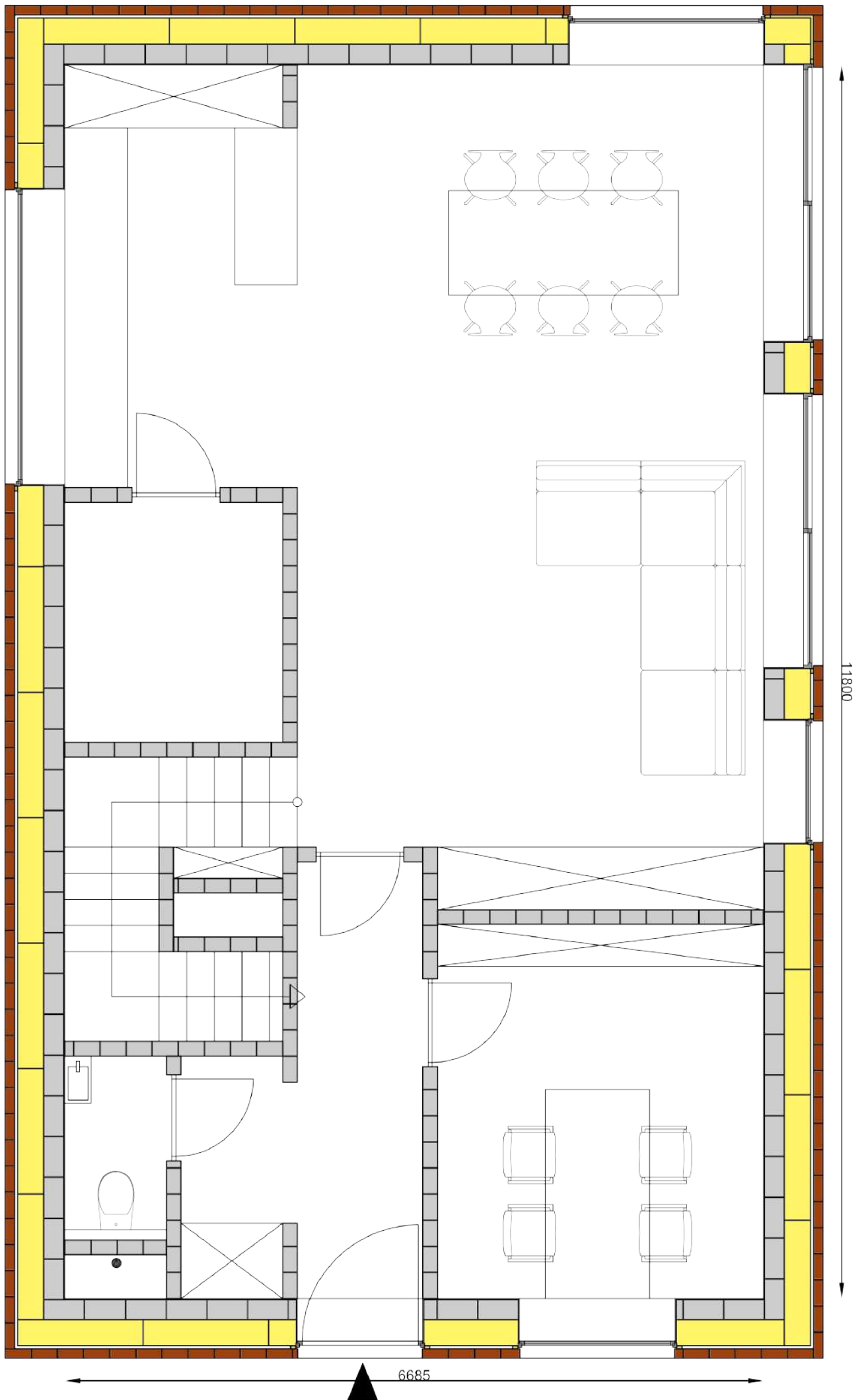
rue de Clémaraïs

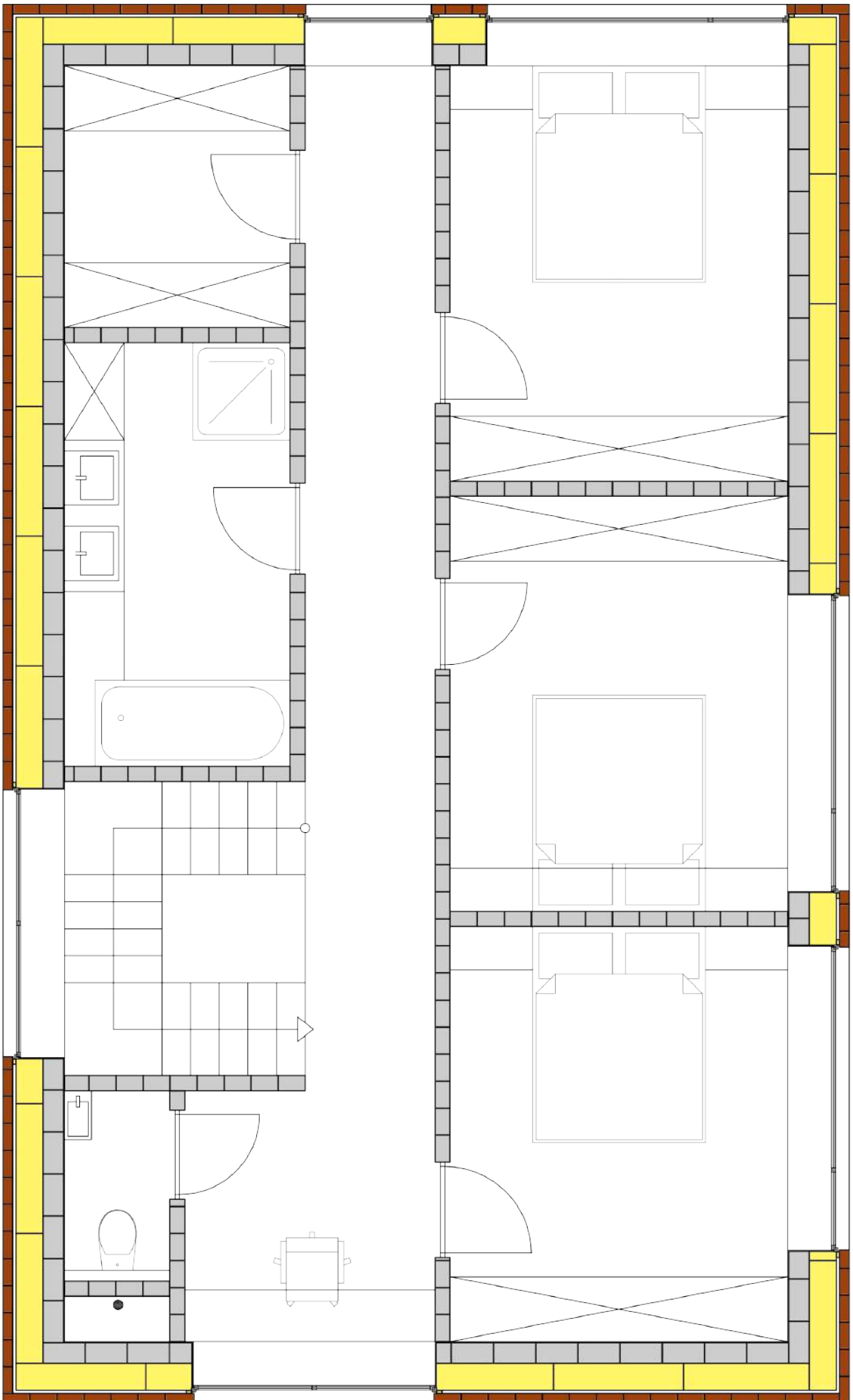
[illegible]

12.4 Maison NCube à Aubange - Plans version traditionnelle

Vous trouverez dans les pages qui suivent le plan du rez de chaussée ainsi que le plan du premier étage de la maison sélectionnée, tous deux à l'échelle 1.50. Les dimensions du bâtiment ont ici été adaptées par rapport à l'original et la composition de paroi est celle d'une construction traditionnelle belge, modifiée pour atteindre un U de $0.11 \text{ W/m}^2\text{K}$.

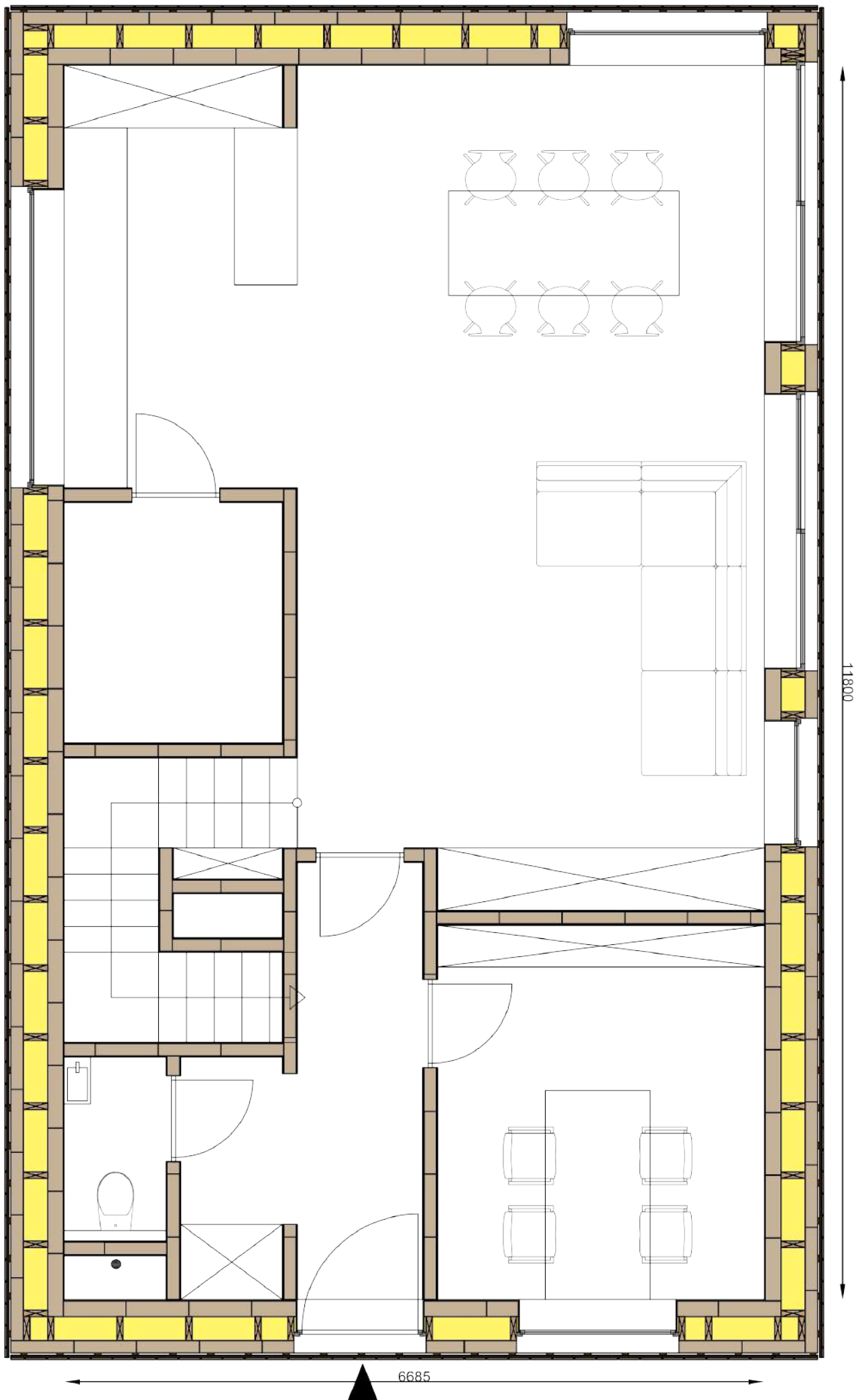
0 100 200 500 1000 mm



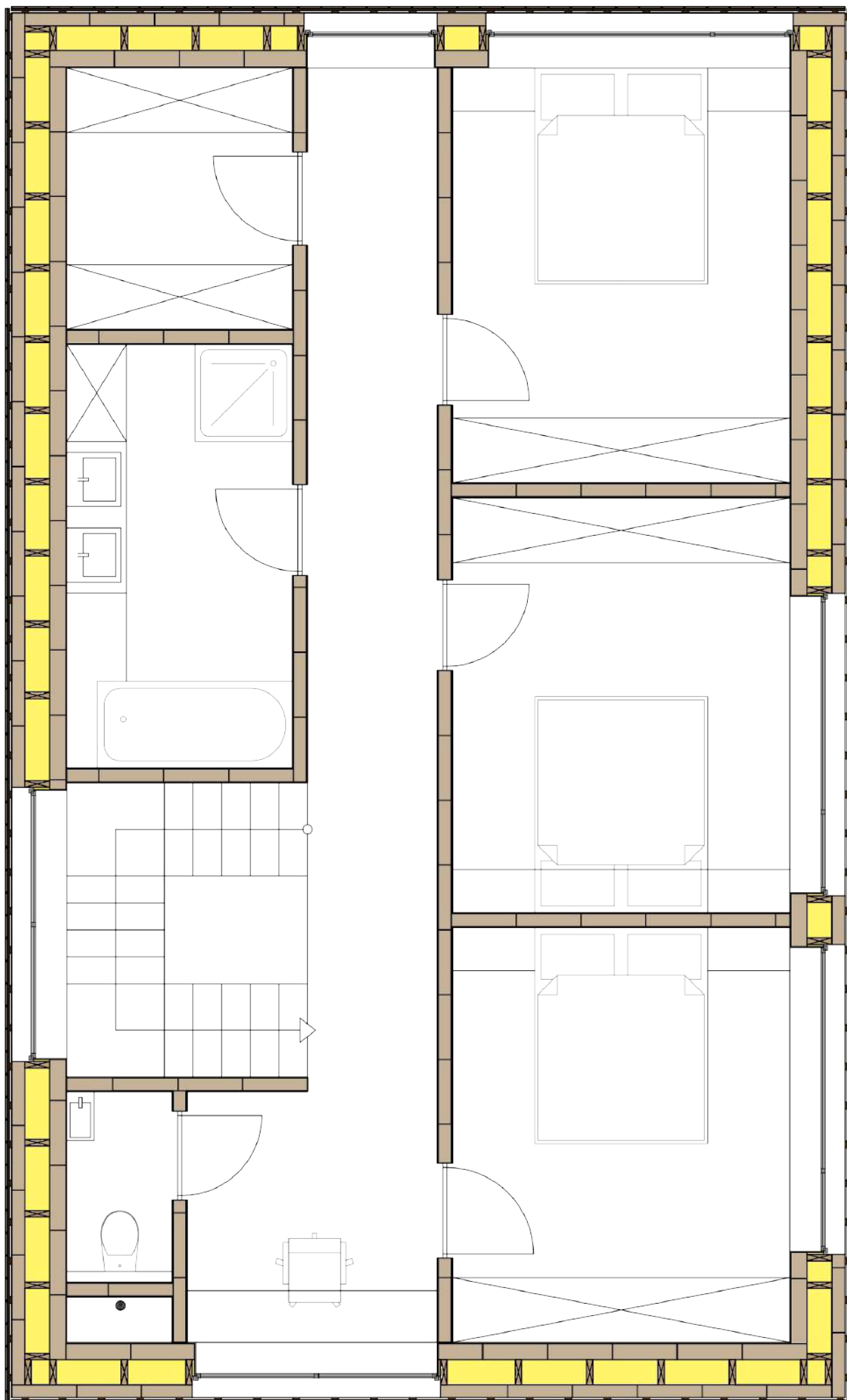


12.5 Maison NCube à Aubange - Plans version IsoHemp

Vous trouverez dans les pages qui suivent le plan du rez de chaussée ainsi que le plan du premier étage de la maison sélectionnée, tous deux à l'échelle 1.50. Les dimensions du bâtiment ont ici été adaptées par rapport à l'original et la composition de paroi est celle d'une construction classique IsoHemp, modifiée pour atteindre un U de $0.11 \text{ W/m}^2\text{K}$.



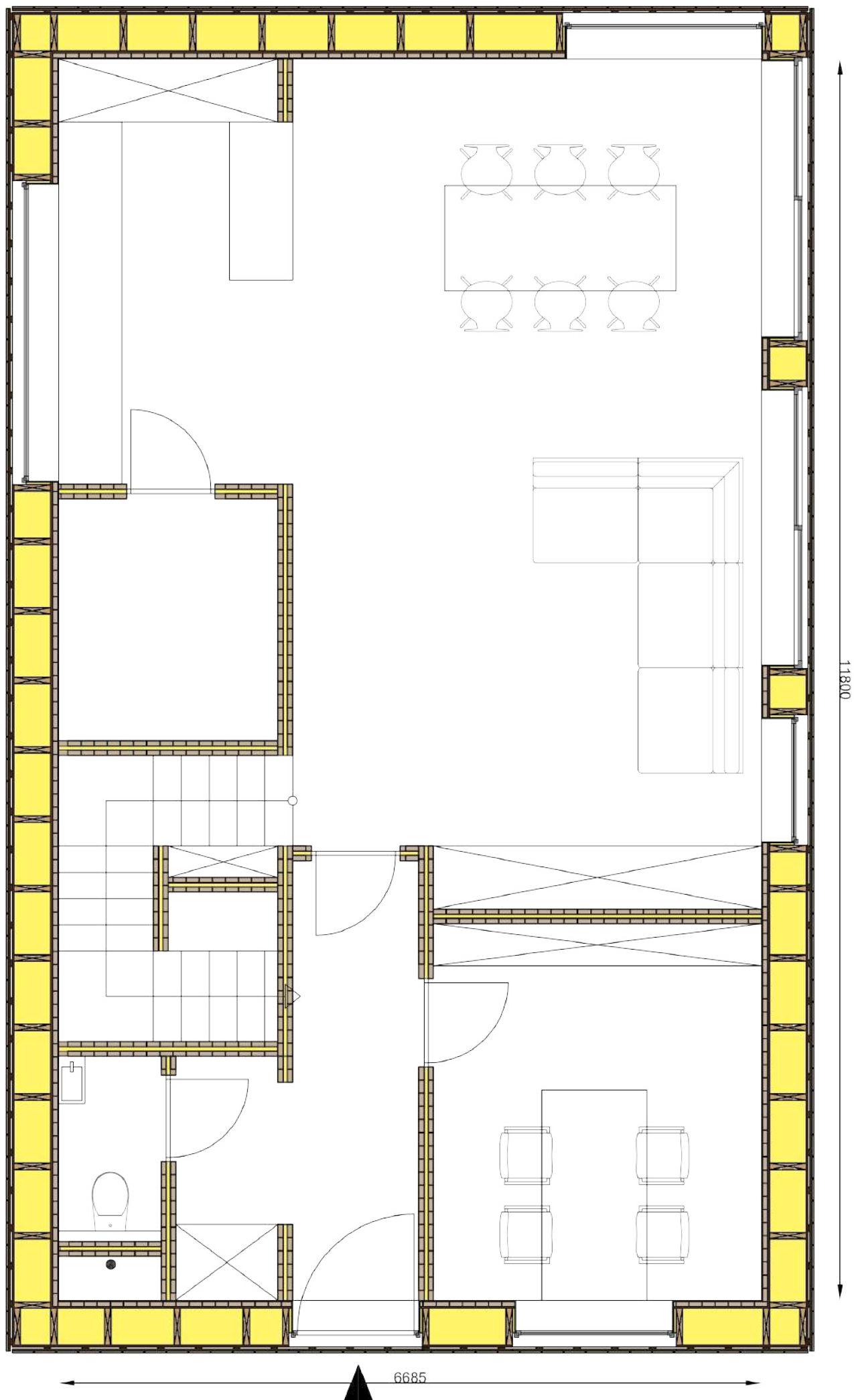
0 500 1000

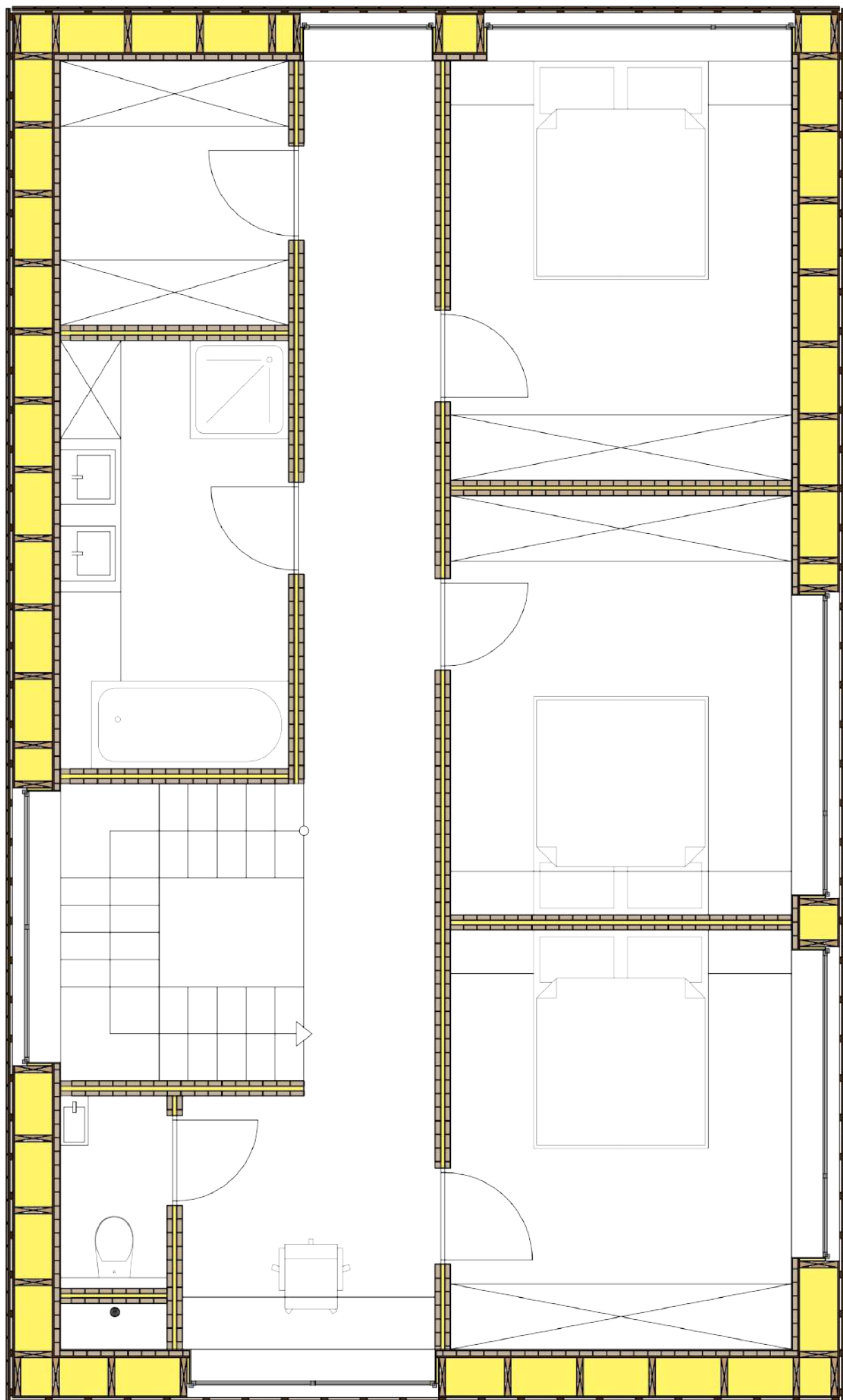


12.6 Maison NCube à Aubange - Plans version ArgiMob

Vous trouverez dans les pages qui suivent le plan du rez de chaussée ainsi que le plan du premier étage de la maison sélectionnée, tous deux à l'échelle 1.50. Les dimensions du bâtiment ont ici été adaptées par rapport à l'original et la composition de paroi est celle d'une construction classique ArgiMob, modifiée pour atteindre un U de $0.11 \text{ W/m}^2\text{K}$.

0 500 1000

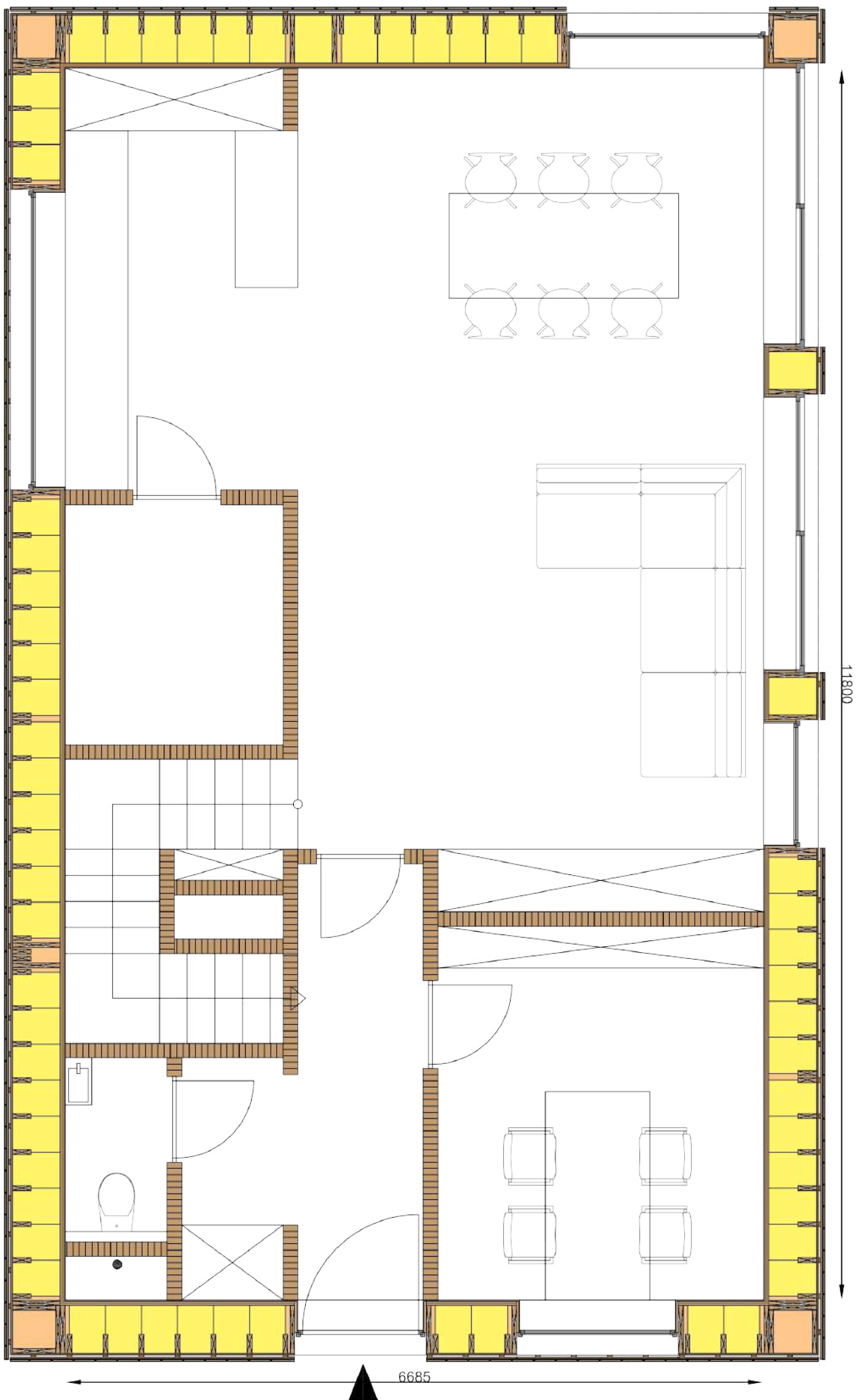


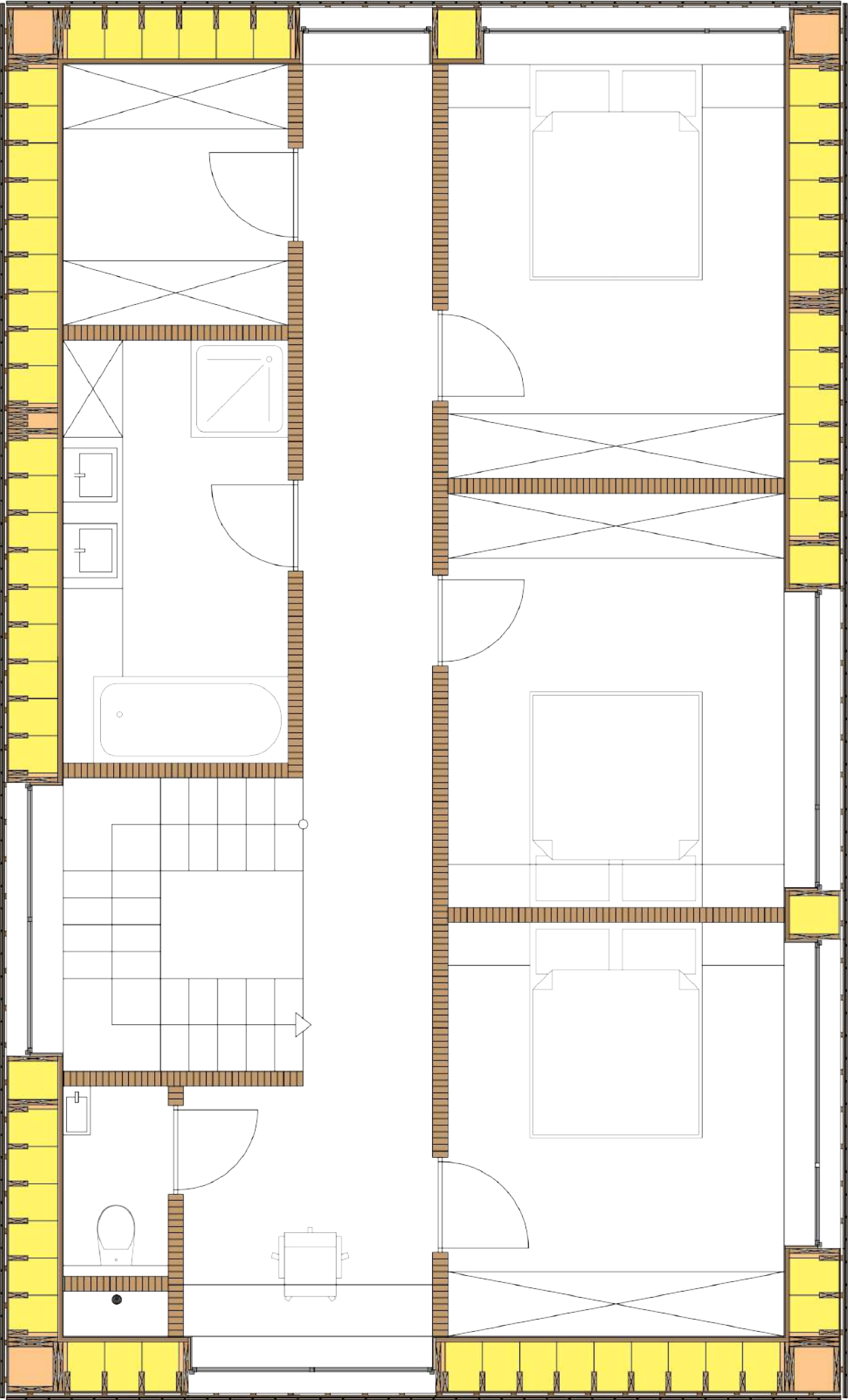


12.7 Maison NCube à Aubange - Plans version PailleTech

Vous trouverez dans les pages qui suivent le plan du rez de chaussée ainsi que le plan du premier étage de la maison sélectionnée, tous deux à l'échelle 1.50. Les dimensions du bâtiment ont ici été adaptées par rapport à l'original et la composition de paroi est celle d'une construction classique PailleTech, modifiée pour atteindre un U de $0.11 \text{ W/m}^2\text{K}$.

0 500 1000 mm





12.8 Résultats de l'analyse du cycle de vie - Données chiffrées détaillées

Vous trouverez dans les pages qui suivent l'ensemble des résultats des calculs de l'analyse du cycle de vie du cycle de vie effectué.

Résultats: Construction traditionnelle - Cloisons extérieures								
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité produite	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité réellement utilisée	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Briques	8336,08379	8636,63363	0,00062	0,00065	18,37494	19,03743	0,89983	0,93228
Isolation	2792,83515	6764,81255	0,00013	0,00032	20,30524	49,1834	0,64819	1,57005
Blocs béton	4789,40617	5383,42031	0,00018	0,00020	9,66968	10,86898	0,49982	0,56181
Béton-linteau	266,2072	266,2072	9,00322E-06	9,00322E-06	0,45257	0,45257	0,02228	0,02228
Plâtre	516,23255	931,51155	5,94945E-05	0,00011	1,55200	2,80049	0,14995	0,27057
TOTAL	16700,76486	21982,58524	0,000998498	0,001289003	50,35443	82,34287	2,22007	3,35699

Résultats: Construction IsoHemp - Cloisons extérieures								
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité produite	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité réellement utilisée	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Blocs IsoHemp	-6738,73972	-7607,99457	0,00049	0,00055	12,58067	14,20349	0,63038	0,7117
Plâtre	511,45557	936,28853	5,89439E-05	0,00011	1,53764	2,81485	0,14856	0,27196
Bois	593,96191	593,96191	5,59190E-05	5,59190E-05	3,38972	3,38972	0,27549	0,27549
Laine de chanvre	1,71558	2,45404	9,17459E-08	1,31237E-07	0,12952	0,18528	0,04009	0,06307
Lattes et contre-lattes	118,77531	118,77531	1,11822E-05	1,11822E-05	0,67785	0,67785	0,05509	0,05509
Bardage	328,57468	328,57468	3,09339E-05	3,09339E-05	1,87517	1,87517	0,15240	0,15240
TOTAL	-5184,25667	-5627,9401	0,000647071	0,000758166	20,19057	23,14636	1,30601	1,52971

Résultats: Construction Argimob - Cloisons extérieures								
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité produite	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité réellement utilisée	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Plâtre	520,05414	907,62664	5,99349E-05	0,00010	1,56349	2,72868	0,15106	0,26363
Lisses / montants / linteaux	665,34664	665,34664	6,26396E-05	6,26396E-05	3,79711	3,79711	0,3086	0,3086
Galets d'argile	194,66328	194,66328	1,67149E-05	1,67149E-05	0,48498	0,48498	0,02868	0,02868
Panneaux OSB	663,79275	1438,06158	3,41268E-05	7,39333E-05	2,66277	5,76872	0,14326	0,31037
Ossature bois	321,57282	321,57282	3,02747E-05	3,02747E-05	1,83521	1,83521	0,14915	0,14915
Cellulose insufflée	990,27369	990,27369	0,00011	0,00011	7,04748	7,04748	0,2719	0,2719
Panneaux de contreventement	1286,74080	2670,71643	0,00017	0,00035	4,89596	10,16188	0,29497	0,61223
Lattes et contre-lattes	109,98030	109,98030	1,03542E-05	1,03542E-05	0,62765	0,62765	0,05101	0,05101
Bardage	326,69613	326,69613	3,07571E-05	3,07571E-05	1,86445	1,86445	0,15153	0,15153
Electricité mix belge	20,825288	20,825288	1,65257E-06	1,65257E-06	0,05016	0,05016	0,00301	0,00301
Electricité photovoltaïque	4,629808	4,629808	9,19017E-07	9,19017E-07	0,02014	0,02014	0,00178	0,00178
Transport marchandise	413,766736	413,766736	6,18589E-05	6,18589E-05	1,14885	1,14885	0,05934	0,05934
TOTAL	5518,342382	8064,159342	5,89233E-04	0,00085	25,998256	35,535316	1,614292	2,211232

Résultats: Construction PailleTech - Cloisons extérieures								
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité produite	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité réellement utilisée	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Paille	-4417,73480	-4417,73480	3,30000E-04	3,30000E-04	28,03108	28,03108	13,12142	13,12142
Ossature bois	976,24591	976,24591	9,19094E-05	9,19094E-05	5,57141	5,57141	0,45281	0,45281
Pare-pluie rigide	1503,35838	3293,01928	2,00000E-04	0,00044	5,72017	12,52970	0,34463	0,75489
Enduit de terre	238,51517	238,51517	3,49152E-05	3,49152E-05	1,43681	1,43681	0,33608	0,33608
Enduit de finition	10,16895	10,16895	8,40183E-07	8,40183E-07	0,02501	0,02501	0,00149	0,00149
Lattes et contre-lattes	84,02221	84,02221	7,91034E-06	7,91034E-06	0,47951	0,47951	0,03897	0,03897
Bardage	336,17425	336,17425	3,16494E-05	3,16494E-05	1,91854	1,91854	0,15593	0,15593
Electricité mix belge	694,17628	694,17628	5,60000E-05	5,60000E-05	1,67187	1,67187	0,10028	0,10028
Transport marchandise	305,05041	305,05041	4,56055E-05	4,56055E-05	0,84700	0,84700	0,04375	0,04375
TOTAL	-270,02324	1519,63766	7,98830E-04	1,03883E-03	45,701396	52,510926	14,5953625	15,0056225

Résultats: Comparaison - Cloisons extérieures								
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité produite	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité réellement utilisée	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Traditionnelle	16700,76486	21982,58524	0,000998498	0,001289003	50,35443	82,34287	2,22007	3,35699
IsoHemp	-5184,25667	-5627,9401	0,000647071	0,000758166	20,19057	23,14636	1,30601	1,52971
Argimob	5518,342382	8064,159342	0,000589233	0,000849104	25,998256	35,535316	1,614292	2,211232
PailleTech	-270,02324	1519,63766	0,00079883	0,00103883	45,701396	52,510926	14,5953625	15,0056225

Résultats: Construction traditionnelle - Cloisons intérieures								
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité produite	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité réellement utilisée	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Blocs de béton	3051,58044	3532,45652	0,00011	0,00013	6,16006	7,13194	0,31846	0,36864
Plâtre	798,07451	1132,14480	9,19760E-05	0,00013	2,39933	3,40367	0,23181	0,32885
TOTAL	3849,65495	4664,60132	0,000201976	0,00026	8,55939	10,53561	0,55027	0,69749

Résultats: Construction IsoHemp - Cloisons intérieures								
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité produite	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité réellement utilisée	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Blocs IsoHemp Plâtre	-2435,34283 847,11819	-3120,01216 1165,58368	0,00018 9,76282E-05	0,00022 0,00013	4,54658 2,54677	5,82480 3,50420	0,22782 0,24606	0,29187 0,33856
TOTAL	-1588,22464	-1954,42848	0,000277628	0,00035	7,09335	9,32900	0,47388	0,63043

Résultats: Construction Argimob - Cloisons intérieures								
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité produite	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité réellement utilisée	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Lisses / montants en bois	466,47699	466,47699	4,39168E-05	4,39168E-05	2,66217	2,66217	0,21636	0,21636
Isolation - laine minérale	292,05907	469,34587	1,38458E-05	2,22549E-05	2,12341	3,41237	0,06778	0,10893
Galets d'argile	336,34507	336,34507	2,88806E-05	2,88806E-05	0,83796	0,83796	0,04955	0,04955
Plâtre	832,78725	1146,47575	9,59766E-05	0,00013	2,50369	3,44676	0,24190	0,33301
Electricité mix belge	10,412644	10,412644	8,26284E-07	8,26284E-07	0,02508	0,02508	0,001504	0,001504
Electricité photovoltaïque	2,314904	2,314904	4,59508E-07	4,59508E-07	0,010072	0,010072	0,00089	0,00089
Transport marchandise	206,883368	206,883368	3,09294E-05	3,09294E-05	0,574426	0,574426	0,029672	0,029672
TOTAL	2147,279296	2638,254596	0,000214835	0,000257268	8,736808	10,968838	0,607656	0,739916

Résultats: Construction PailleTech - Cloisons intérieures								
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité produite	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité réellement utilisée	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Bois massif Lisses hautes/basses Electricité mix belge Transport marchandise	1538,44333 74,28793 347,08814	1538,44333 74,28793 347,08814	0,00014 6,99389E-06 0,000028	0,00014 6,99389E-06 0,000028	8,77985 0,42396 0,835935	8,77985 0,42396 0,835935	0,71357 0,03446 0,05014	0,71357 0,03446 0,05014
TOTAL	2112,344605	2112,344605	0,000197797	0,000197797	10,463243	10,463243	0,820045	0,820045

Résultats: Comparaison - Cloisons intérieures								
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité produite	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité réellement utilisée	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Traditionnelle IsoHemp Argimob PailleTech	3849,65495 -1588,22464 2147,279296 2112,344605	4664,60132 -1954,42848 2638,254596 2112,344605	0,000201976 0,000277628 0,000214835 0,000197797	0,00026 0,00035 0,000257268 0,000197797	8,55939 7,09335 8,736808 10,463243	10,53561 9,329 10,968838 10,463243	0,55027 0,47388 0,607656 0,820045	0,69749 0,63043 0,739916 0,820045

Résultats: Construction traditionnelle - Plancher								
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité produite	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité réellement utilisée	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Isolation	532,96399	683,57013	2,52714E-05	3,24127E-05	3,87490	4,96988	0,12370	0,15865
Dalle de compression	1219,22373	1219,22373	4,12346E-05	4,12346E-05	2,07275	2,07275	0,10204	0,10204
Revêtement de sol	1921,11554	1921,11554	2,30000E-04	2,30000E-04	6,36794	6,36794	0,28563	0,28563
Poutrelle	396,14835	396,14835	0,00000E+00	0,00000E+00	0,77957	0,77957	0,03444	0,03444
Hourdis	1214,79567	1214,79567	2,49821E-05	2,49821E-05	2,08613	2,08613	0,10740	0,10740
Plâtre	224,83663	305,72687	2,59118E-05	3,52342E-05	0,67595	0,91913	0,06531	0,08880
TOTAL	5509,08391	5740,58029	3,47400E-04	3,63864E-04	15,85724	17,1954	0,71852	0,77696

Résultats: Construction IsoHemp - Plancher							
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Blocs IsoHemp	-1683,6206	-1851,4809	0,00012	0,00013	3,14318	3,45656	0,1732
Montants / poutres	335,87058	335,87058	3,30280E-05	3,30280E-05	1,95879	1,95879	0,13993
Plâtre	261,46016	391,71225	3,01326E-05	4,51439E-05	0,78605	1,17764	0,11378
OSB	553,00453	617,91709	2,84310E-05	3,17682E-05	2,21835	2,47875	0,13336
Poutres en I	406,37059	406,37059	3,36052E-05	3,36052E-05	2,12337	2,12337	0,14210
Revêtement de sol	71,21395	71,21395	6,70449E-06	6,70449E-06	0,40642	0,40642	0,03303
TOTAL	-55,70079	-28,39644	0,000251901	0,00028025	10,63616	11,60153	0,7354

Résultats: Construction Argimob - Plancher								
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité produite	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité réellement utilisée	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Ceinture en lamellé collé	365,32899	365,32899	3,59248E-05	3,59248E-05	2,13059	2,13059	0,15220	0,15220
Panneaux OSB	527,10200	767,71517	2,70993E-05	3,94696E-05	2,11444	3,07965	0,11376	0,16569
Poutres en I	371,79306	371,79306	3,25930E-05	3,25930E-05	2,01432	2,01432	0,13791	0,13791
Plâtre	234,39060	296,1729	2,70129E-05	3,41332E-05	0,70467	0,89041	0,06808	0,08603
Revêtement de sol	76,25187	76,25187	7,17879E-06	7,17879E-06	0,43517	0,43517	0,03537	0,03537
Electricité mix belge	10,412644	10,412644	8,26284E-07	8,26284E-07	0,02508	0,02508	0,00150	0,00150
Electricité photovoltaïque	2,314904	2,314904	4,59508E-07	4,59508E-07	0,01007	0,01007	0,00089	0,00089
Transport marchandise	206,88337	206,88337	3,09294E-05	3,09294E-05	0,57443	0,57443	0,02967	0,02967
TOTAL	1794,477436	2096,872906	0,000162024	1,81515E-04	8,008768	9,159718	0,539386	0,60927

Résultats: Construction PailleTech - Plancher								
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité produite	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité réellement utilisée	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Bois massif	1477,98832	1477,98832	0,00014	0,00014	8,43484	8,43484	0,68553	0,68553
Finition	71,12856	71,12856	6,69645E-06	6,69645E-06	0,40593	0,40593	0,03299	0,03299
Electricité mix belge	347,08814	347,08814	0,000028	0,000028	0,83594	0,83594	0,05014	0,05014
Transport marchandise	152,525205	152,525205	2,28028E-05	2,28028E-05	0,42350	0,42350	0,02188	0,02188
TOTAL	2048,730225	2048,730225	0,000197499	0,000197499	10,100203	10,100203	0,790535	0,790535

Résultats: Comparaison - Plancher								
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité produite	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité réellement utilisée	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Traditionnel	5509,08391	5740,58029	0,0003474	0,000363864	15,85724	17,1954	0,71852	0,77696
IsoHemp	-55,70079	-28,39644	0,000251901	0,00028025	10,63616	11,60153	0,66786	0,7354
Argimob	1794,477436	2096,872906	0,000162024	0,000181515	8,008768	9,159718	0,539386	0,609266
PailleTech	2048,730225	2048,730225	0,000197499	0,000197499	10,100203	10,100203	0,790535	0,790535

Résultats: Construction traditionnelle - Toiture							
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité produite	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Plâtre	235,34599	353,49669	2,71230E-05	4,07E-05	0,70754	1,06275	0,10268
Isolation	616,70620	747,83741	2,92422E-05	3,55E-05	4,48375	5,43713	0,17357
Dalle de béton	4516,11756	4516,11756	0,00015	0,00015	7,67764	7,67764	0,37796
Membrane bitumineuse	134,88120	134,88120	6,35369E-05	6,35369E-05	0,86939	0,86939	0,02470
TOTAL	5503,05095	5752,33286	0,000269902	0,000289737	13,73832	15,04691	0,67891

Résultats: Construction IsoHemp - Toiture							
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité produite	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Laine de chanvre	1,14008	1,40916	6,10E-08	7,54E-08	0,08608	0,10639	0,03622
Montants / poutres	402,82152	402,82152	3,96E-05	3,96E-05	2,34925	2,34925	0,16782
Plâtre	217,83039	401,26651	2,51E-05	4,62E-05	0,65488	0,06327	0,06327
OSB	586,08499	617,91709	3,01E-05	3,18E-05	2,35105	2,35105	0,12649
Poutres en I	452,29161	452,29161	3,60E-05	3,60E-05	2,3088	2,3088	0,15215
Panneaux isolants	2026,79659	2352,37302	0,03321	0,03854	2,71533	3,15151	0,09107
Membrane bitumineuse	146,45228	146,45228	6,90E-05	6,90E-05	0,94397	0,02682	0,02682
Acrotère	350,82295	350,82295	3,45E-05	3,45E-05	2,04599	2,04599	0,14616
TOTAL	4184,24041	4725,35414	0,033444392	0,038797184	13,45535	13,91184	0,81

Résultats: Construction Argimob - Toiture							
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité produite	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Ceinture en lamellé collé	365,32899	365,32899	3,59E-05	3,59E-05	2,13059	2,13059	0,1522
Panneaux OSB	379,48847	561,74281	1,95E-05	2,89E-05	1,5223	2,2534	0,12124
Panneaux de fibres de bois	738,98464	802,18728	9,82E-05	0,00011	2,81178	3,05226	0,18389
Membrane bitumineuse	155,21709	155,21709	7,31E-05	7,31E-05	1,00047	1,00047	0,02843
Cellulose insufflée	475,74137	475,74137	5,25E-05	5,25E-05	3,38571	3,38571	0,13062
Plâtre	232,16134	386,93557	2,68E-05	4,46E-05	0,69797	1,16328	0,11239
Poutres en I	342,86272	342,86272	2,94E-05	2,94E-05	1,83367	1,83367	0,12455
Acrotère	441,20673	441,20673	4,34E-05	4,34E-05	2,57311	2,57311	0,18381
Electricité mix belge	10,412644	10,412644	8,26284E-07	8,26284E-07	0,02508	0,02508	0,00150
Electricité photovoltaïque	2,314904	2,314904	4,59508E-07	4,59508E-07	0,01007	0,01007	0,00089
Transport marchandise	206,88337	206,88337	3,09294E-05	3,09294E-05	0,57443	0,57443	0,02967
TOTAL	3350,602266	3750,833476	0,0004411031	0,000450066	16,565178	18,002068	1,069196

Résultats: Construction PailleTech - Toiture								
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité produite	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité réellement utilisée	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Finition intérieure	180,34036	180,34036	1,70E-05	1,70E-05	1,0292	1,0292	0,08365	0,08365
Ossature bois	455,80344	455,80344	4,29E-05	4,29E-05	2,60123	2,60123	0,21141	0,21141
Paille	-2931,83311	-2931,83311	0,00022	0,00022	18,60285	18,60285	8,70804	8,70804
Pare-pluie rigide	1236,50281	2178,06	0,00016	0,00029	4,7048	8,28736	0,28346	0,4993
Membrane bitumineuse	162,56591	162,56591	7,66E-05	7,66E-05	1,04784	1,04784	0,02977	0,02977
Acrotère	23,73798	23,73798	2,23E-06	2,23E-06	0,13547	0,13547	0,01101	0,01101
Electricité mix belge	347,08814	347,08814	0,000028	0,000028	0,83594	0,83594	0,05014	0,05014
Transport marchandise	152,525205	152,525205	2,28028E-05	2,28028E-05	0,42350	0,42350	0,02188	0,02188
TOTAL	-373,269265	568,287925	0,000569506	0,000699506	29,380823	32,963383	9,399355	9,615195

Résultats: Comparaison - Toiture				
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite
Traditionnelle	5503,05095	5752,33286	0,000269902	0,000289737
IsoHemp	4184,24041	4725,35414	0,033444392	0,038797184
Argimob	3350,602266	3750,833476	0,000411031	0,000450066
PailleTech	-373,269265	568,287925	0,000569506	0,000699506

Résultats: Construction traditionnelle								
Cloisons	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité produite	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité réellement utilisée	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Cloisons extérieures	16700,76486	21982,58524	0,000998498	0,001289003	50,35443	82,34287	2,22007	3,35699
Cloisons intérieures	3849,65495	4664,60132	0,000201976	0,00026	8,55939	10,53561	0,55027	0,69749
Plancher	5509,08391	5740,58029	0,0003474	0,000363864	15,85724	17,1954	0,71852	0,77696
Toiture	5503,05095	5752,33286	0,000269902	0,000289737	13,73832	15,04691	0,61415	0,67891
TOTAL	31562,55467	38140,09971	0,001817776	0,002202603	88,50938	125,12079	4,10301	5,51035

Résultats: Construction IsoHemp								
Cloisons	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité produite	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité réellement utilisée	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Cloisons extérieures	-5184,25667	-5627,9401	0,000647071	0,000758166	20,19057	23,14636	1,30601	1,52971
Cloisons intérieures	-1588,22464	-1954,42848	0,000277628	0,00035	7,09335	9,329	0,47388	0,63043
Plancher	-55,70079	-28,39644	0,000251901	0,00028025	10,63616	11,60153	0,66786	0,7354
Toiture	4184,24041	4725,35414	0,033444392	0,038797184	13,45535	13,91184	0,79048	0,81
TOTAL	-2643,94169	-2885,41088	0,034620993	0,0401856	51,37543	57,98873	3,23823	3,70554

Résultats: Construction Argimob								
Cloisons	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité produite	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité réellement utilisée	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Cloisons extérieures	5518,342382	8064,159342	0,000589233	0,000849104	25,998256	35,535316	1,614292	2,211232
Cloisons intérieures	2147,279296	2638,254596	0,000214835	0,000257268	8,736808	10,968838	0,607656	0,739916
Plancher	1794,477436	2096,872906	0,000162024	0,000181515	8,008768	9,159718	0,539386	0,609266
Toiture	3350,602266	3750,833476	0,000411031	0,000450066	16,565178	18,002068	0,970406	1,069196
TOTAL	12810,70138	16550,12032	0,001377123	0,001737952	59,30901	73,66594	3,73174	4,62961

Résultats: Construction PailleTech								
Cloisons	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité produite	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité réellement utilisée	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Cloisons extérieures	-270,02324	1519,63766	0,00079883	0,00103883	45,701396	52,510926	14,5953625	15,0056225
Cloisons intérieures	2112,344605	2112,344605	0,000197797	0,000197797	10,463243	10,463243	0,820045	0,820045
Plancher	2048,730225	2048,730225	0,000197499	0,000197499	10,100203	10,100203	0,790535	0,790535
Toiture	-373,269265	568,287925	0,000569506	0,000699506	29,380823	32,963383	9,399355	9,615195
TOTAL	3517,782325	6249,000415	0,001763632	0,002133632	95,645665	106,037755	25,6052975	26,2313975

Résultats: Comparaison								
Cloisons	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.] - quantité produite	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité réellement utilisée	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.] - quantité produite	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité réellement utilisée	Acidification [kg SO ₂ eq.] - quantité produite	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité réellement utilisée	Eutrophisation [kg N eq.] - quantité produite
Traditionnelle	31562,55467	38140,09971	0,001817776	0,002202603	88,50938	125,12079	4,10301	5,51035
IsoHemp	-2643,94169	-2885,41088	0,034620993	0,0401856	51,37543	57,98873	3,23823	3,70554
Argimob	12810,70138	16550,12032	0,001377123	0,001737952	59,30901	73,66594	3,73174	4,62961
PailleTech	3517,782325	6249,000415	0,001763632	0,002133632	95,645665	106,037755	25,6052975	26,2313975

Utilisation : Construction traditionnelle				
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.]	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.]	Acidification [kg SO ₂ eq.]	Eutrophisation [kg N eq.]
Revêtement de sol	1911,11554	0,00023	6,36794	0,28563
Membrane bitumineuse	539,52397	0,00025	3,47756	0,09881
Energie pour le chauffage	1,58E+04	0,00125	38,04297	2,28182
TOTAL	18246,43951	0,00173	47,88847	2,66626

Utilisation : Construction IsoHemp				
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.]	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.]	Acidification [kg SO ₂ eq.]	Eutrophisation [kg N eq.]
Bardage	657,14935	6,19E-05	3,75033	0,3048
Membrane bitumineuse	512,87036	0,00024	3,30576	0,09393
Energie pour le chauffage	1,58E+04	0,00125	38,04297	2,28182
TOTAL	16965,81971	0,001551868	45,09906	2,68055

Utilisation : Construction Argimob				
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.]	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.]	Acidification [kg SO ₂ eq.]	Eutrophisation [kg N eq.]
Bardage	653,392226	6,15E-05	3,72889	0,30306
Membrane bitumineuse	620,86836	0,00029	4,00187	0,11371
Energie pour le chauffage	1,58E+04	0,00125	38,04297	2,28182
TOTAL	17070,06059	0,001601514	45,77373	2,69859

Utilisation : Construction PailleTech				
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.]	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.]	Acidification [kg SO ₂ eq.]	Eutrophisation [kg N eq.]
Bardage	372,34849	6,33E-05	3,83707	0,31185
Membrane bitumineuse	650,26365	0,00031	4,19134	0,11909
Energie pour le chauffage	1,58E+04	0,00125	38,04297	2,28182
TOTAL	16818,41214	0,001623299	46,07138	2,71276

Utilisation : Comparaison				
Matériaux	Réchauffement climatique [kg CO ₂ eq.]	Diminution de la couche d'ozone [kg CFC-11 eq.]	Acidification [kg SO ₂ eq.]	Eutrophisation [kg N eq.]
Traditionnelle	18246,43951	0,00173	47,88847	2,66626
IsoHemp	16965,81971	0,001551868	45,09906	2,68055
Argimob	17070,06059	0,001601514	45,77373	2,69859
PailleTech	16818,41214	0,001623299	46,07138	2,71276

12.9 Résultats du calcul du coût du cycle de vie - Données chiffrées détaillées

Vous trouverez dans les pages qui suivent l'ensemble des résultats des calculs du coût du cycle de vie effectué.

Prix de la construction traditionnelle				
Paroi	Matériau	Prix pour le produit et la pose	Dimension	Coût
Cloisons intérieures	Blocs de béton (14)	328,25 €/m ³	19,363 m ³	6.355,90 €
	Plâtre	35 €/m ²	250,576 m ²	8.770,16 €
TOTAL				15.126,06 €
Paroi	Matériau	Prix pour le produit et la pose	Dimension	Coût
Cloisons extérieures	Briques	103,5 €/m ²	199,701 m ²	20.669,05 €
	Isolation - laine minérale	27 €/m ²	215,11 m ²	5.807,97 €
	Blocs de béton (19)	295,25 €/m ³	30,437 m ³	8.986,52 €
	Béton (linteaux)	92,75 €/m ³	1,019 m ³	94,51 €
	Plâtre	35 €/m ²	162,455 m ²	5.685,93 €
TOTAL				41.243,99 €
Paroi	Matériau	Prix pour le produit et la pose	Dimension	Coût
Plancher	Isolation - laine minérale	26 €/m ²	82,092 m ²	2.134,39 €
	Dalle de compression	5,5 €/m ²	82,011 m ²	451,06 €
	Revêtement de sol	48 €/m ²	82,011 m ²	3.936,53 €
	Poutrelles	54,5 €/m ²	8,201 m ²	446,95 €
	Hourdis	59,75 €/m ²	73,81 m ²	4.410,15 €
	Plâtre	35 €/m ²	70,817 m ²	2.478,60 €
TOTAL				13.857,68 €
Paroi	Matériau	Prix pour le produit et la pose	Dimension	Coût
Toiture	Plâtre	35 €/m ²	73,707 m ²	2.579,75 €
	Isolation - laine minérale	24 €/m ²	79,161 m ²	1.899,86 €
	Dalle de béton	31 €/m ²	86,437 m ²	2.679,55 €
	Membrane bitumineuse	67,25 €/m ²	79,253 m ²	5.329,76 €
TOTAL				12.488,92 €
TOTAL MAISON TRADITIONNELLE COMPLETE				82.716,65 €

d = 4%
g (énergie) = 4%
g (travaux et matériaux) = 2,5%

Coût du cycle de vie - Maison traditionnelle - scénario de base					
Année	Type de coût	Montant à l'année 0	Montant à l'année X	Valeur nette actuelle	Coût total
0	Construction de la maison	82.716,65 €	82.716,65 €	82.716,65 €	82.776,05 €
	Electricité	59,40 €	59,40 €	59,40 €	
1	Electricité	59,40 €	61,78 €	59,40 €	82.835,45 €
2	Electricité	59,40 €	64,25 €	59,40 €	82.894,85 €
3	Electricité	59,40 €	66,82 €	59,40 €	82.954,25 €
4	Electricité	59,40 €	69,49 €	59,40 €	83.013,65 €
5	Electricité	59,40 €	72,27 €	59,40 €	83.073,05 €
6	Electricité	59,40 €	75,16 €	59,40 €	83.132,45 €
7	Electricité	59,40 €	78,17 €	59,40 €	83.191,85 €
8	Electricité	59,40 €	81,29 €	59,40 €	83.251,25 €
9	Electricité	59,40 €	84,54 €	59,40 €	83.310,65 €
10	Membrane bitumineuse	5.329,76 €	6.822,55 €	4.609,07 €	87.979,12 €
	Electricité	59,40 €	87,93 €	59,40 €	
11	Electricité	59,40 €	91,44 €	59,40 €	88.038,52 €
12	Electricité	59,40 €	95,10 €	59,40 €	88.097,92 €
13	Electricité	59,40 €	98,91 €	59,40 €	88.157,32 €
14	Electricité	59,40 €	102,86 €	59,40 €	88.216,72 €
15	Electricité	59,40 €	106,98 €	59,40 €	88.276,12 €
16	Electricité	59,40 €	111,26 €	59,40 €	88.335,52 €
17	Electricité	59,40 €	115,71 €	59,40 €	88.394,92 €
18	Electricité	59,40 €	120,33 €	59,40 €	88.454,32 €
19	Electricité	59,40 €	125,15 €	59,40 €	88.513,72 €
20	Membrane bitumineuse	5.329,76 €	8.733,44 €	3.985,83 €	92.558,94 €
	Electricité	59,40 €	130,15 €	59,40 €	
21	Electricité	59,40 €	135,36 €	59,40 €	92.618,34 €
22	Electricité	59,40 €	140,77 €	59,40 €	92.677,74 €
23	Electricité	59,40 €	146,40 €	59,40 €	92.737,14 €
24	Electricité	59,40 €	152,26 €	59,40 €	92.796,54 €
25	Electricité	59,40 €	158,35 €	59,40 €	92.855,94 €
26	Electricité	59,40 €	164,68 €	59,40 €	92.915,34 €
27	Electricité	59,40 €	171,27 €	59,40 €	92.974,74 €
28	Electricité	59,40 €	178,12 €	59,40 €	93.034,14 €
29	Electricité	59,40 €	185,25 €	59,40 €	93.093,54 €
	Revêtement de sol	3.936,53 €	8.257,13 €	2.545,83 €	
30	Membrane bitumineuse	5.329,76 €	11.179,54 €	3.446,86 €	99.145,63 €
	Electricité	59,40 €	192,66 €	59,40 €	
31	Electricité	59,40 €	200,36 €	59,40 €	99.205,03 €
32	Electricité	59,40 €	208,38 €	59,40 €	99.264,43 €
33	Electricité	59,40 €	216,71 €	59,40 €	99.323,83 €
34	Electricité	59,40 €	225,38 €	59,40 €	99.383,23 €
35	Electricité	59,40 €	234,40 €	59,40 €	99.442,63 €
36	Electricité	59,40 €	243,77 €	59,40 €	99.502,03 €
37	Electricité	59,40 €	253,52 €	59,40 €	99.561,43 €
38	Electricité	59,40 €	263,67 €	59,40 €	99.620,83 €
39	Electricité	59,40 €	274,21 €	59,40 €	99.680,23 €
40	Membrane bitumineuse	5.329,76 €	14.310,76 €	2.980,77 €	102.720,41 €
	Electricité	59,40 €	285,18 €	59,40 €	
41	Electricité	59,40 €	296,59 €	59,40 €	102.779,81 €
42	Electricité	59,40 €	308,45 €	59,40 €	102.839,21 €
43	Electricité	59,40 €	320,79 €	59,40 €	102.898,61 €
44	Electricité	59,40 €	333,62 €	59,40 €	102.958,01 €
45	Electricité	59,40 €	346,97 €	59,40 €	103.017,41 €
46	Electricité	59,40 €	360,84 €	59,40 €	103.076,81 €
47	Electricité	59,40 €	375,28 €	59,40 €	103.136,21 €
48	Electricité	59,40 €	390,29 €	59,40 €	103.195,61 €
49	Electricité	59,40 €	405,90 €	59,40 €	103.255,01 €
SOMME TOTALE A PREVOIR A L'ANNEE 0					103.255,01 €

d = 6%
g (énergie) = 4%
g (travaux et matériaux) = 2,5%

Coût du cycle de vie - Maison traditionnelle - scénario 1

Année	Type de coût	Montant à l'année 0	Montant à l'année X	Valeur nette actuelle	Coût total
0	Construction de la maison	82.716,65 €	82.716,65 €	82.716,65 €	82.776,05 €
	Electricité	59,40 €	59,40 €	59,40 €	
1	Electricité	59,40 €	61,78 €	61,78 €	82.837,82 €
2	Electricité	59,40 €	64,25 €	60,61 €	82.898,43 €
3	Electricité	59,40 €	66,82 €	59,47 €	82.957,90 €
4	Electricité	59,40 €	69,49 €	58,34 €	83.016,25 €
5	Electricité	59,40 €	72,27 €	57,24 €	83.073,49 €
6	Electricité	59,40 €	75,16 €	56,16 €	83.129,65 €
7	Electricité	59,40 €	78,17 €	55,10 €	83.184,76 €
8	Electricité	59,40 €	81,29 €	54,06 €	83.238,82 €
9	Electricité	59,40 €	84,54 €	53,04 €	83.291,87 €
10	Membrane bitumineuse	5.329,76 €	6.822,55 €	3.809,68 €	87.150,64 €
	Electricité	59,40 €	87,93 €	49,10 €	
11	Electricité	59,40 €	91,44 €	48,17 €	87.198,81 €
12	Electricité	59,40 €	95,10 €	47,26 €	87.246,07 €
13	Electricité	59,40 €	98,91 €	46,37 €	87.292,44 €
14	Electricité	59,40 €	102,86 €	45,50 €	87.337,94 €
15	Electricité	59,40 €	106,98 €	44,64 €	87.382,58 €
16	Electricité	59,40 €	111,26 €	43,80 €	87.426,37 €
17	Electricité	59,40 €	115,71 €	42,97 €	87.469,34 €
18	Electricité	59,40 €	120,33 €	42,16 €	87.511,50 €
19	Electricité	59,40 €	125,15 €	41,36 €	87.552,86 €
20	Membrane bitumineuse	5.329,76 €	8.733,44 €	2.723,13 €	90.316,57 €
	Electricité	59,40 €	130,15 €	40,58 €	
21	Electricité	59,40 €	135,36 €	39,82 €	90.356,39 €
22	Electricité	59,40 €	140,77 €	39,07 €	90.395,45 €
23	Electricité	59,40 €	146,40 €	38,33 €	90.433,78 €
24	Electricité	59,40 €	152,26 €	37,61 €	90.471,39 €
25	Electricité	59,40 €	158,35 €	36,90 €	90.508,28 €
26	Electricité	59,40 €	164,68 €	36,20 €	90.544,48 €
27	Electricité	59,40 €	171,27 €	35,52 €	90.580,00 €
28	Electricité	59,40 €	178,12 €	34,85 €	90.614,84 €
29	Electricité	59,40 €	185,25 €	34,19 €	90.649,03 €
	Revêtement de sol	3.936,53 €	8.257,13 €	1.437,65 €	
30	Membrane bitumineuse	5.329,76 €	11.179,54 €	1.946,47 €	94.066,70 €
	Electricité	59,40 €	192,66 €	33,54 €	
31	Electricité	59,40 €	200,36 €	32,91 €	94.099,61 €
32	Electricité	59,40 €	208,38 €	32,29 €	94.131,90 €
33	Electricité	59,40 €	216,71 €	31,68 €	94.163,58 €
34	Electricité	59,40 €	225,38 €	31,08 €	94.194,66 €
35	Electricité	59,40 €	234,40 €	30,50 €	94.225,16 €
36	Electricité	59,40 €	243,77 €	29,92 €	94.255,08 €
37	Electricité	59,40 €	253,52 €	29,36 €	94.284,44 €
38	Electricité	59,40 €	263,67 €	28,80 €	94.313,24 €
39	Electricité	59,40 €	274,21 €	28,26 €	94.341,50 €
40	Membrane bitumineuse	5.329,76 €	14.310,76 €	1.391,32 €	95.760,55 €
	Electricité	59,40 €	285,18 €	27,73 €	
41	Electricité	59,40 €	296,59 €	27,20 €	95.787,75 €
42	Electricité	59,40 €	308,45 €	26,69 €	95.814,44 €
43	Electricité	59,40 €	320,79 €	26,19 €	95.840,63 €
44	Electricité	59,40 €	333,62 €	25,69 €	95.866,32 €
45	Electricité	59,40 €	346,97 €	25,21 €	95.891,52 €
46	Electricité	59,40 €	360,84 €	24,73 €	95.916,26 €
47	Electricité	59,40 €	375,28 €	24,26 €	95.940,52 €
48	Electricité	59,40 €	390,29 €	23,81 €	95.964,33 €
49	Electricité	59,40 €	405,90 €	23,36 €	95.987,69 €
SOMME TOTALE A PREVOIR A L'ANNEE 0					95.987,69 €

d = 4%
g (énergie) = 6%
g (travaux et matériaux) = 2,5%

Coût du cycle de vie - Maison traditionnelle - scénario 2

Année	Type de coût	Montant à l'année 0	Montant à l'année X	Valeur nette actuelle	Coût total
0	Construction de la maison	82.716,65 €	82.716,65 €	82.716,65 €	82.776,05 €
	Electricité	59,40 €	59,40 €	59,40 €	
1	Electricité	59,40 €	62,96 €	60,54 €	82.836,59 €
2	Electricité	59,40 €	66,74 €	61,71 €	82.898,30 €
3	Electricité	59,40 €	70,75 €	62,89 €	82.961,19 €
4	Electricité	59,40 €	74,99 €	64,10 €	83.025,29 €
5	Electricité	59,40 €	79,49 €	65,34 €	83.090,63 €
6	Electricité	59,40 €	84,26 €	66,59 €	83.157,22 €
7	Electricité	59,40 €	89,32 €	67,87 €	83.225,09 €
8	Electricité	59,40 €	94,67 €	69,18 €	83.294,27 €
9	Electricité	59,40 €	100,36 €	70,51 €	83.364,78 €
10	Membrane bitumineuse	5.329,76 €	6.822,55 €	4.609,07 €	88.045,71 €
	Electricité	59,40 €	106,38 €	71,86 €	
11	Electricité	59,40 €	112,76 €	73,25 €	88.118,96 €
12	Electricité	59,40 €	119,52 €	74,65 €	88.193,61 €
13	Electricité	59,40 €	126,70 €	76,09 €	88.269,70 €
14	Electricité	59,40 €	134,30 €	77,55 €	88.347,26 €
15	Electricité	59,40 €	142,36 €	79,04 €	88.426,30 €
16	Electricité	59,40 €	150,90 €	80,57 €	88.506,87 €
17	Electricité	59,40 €	159,95 €	82,11 €	88.588,98 €
18	Electricité	59,40 €	169,55 €	83,69 €	88.672,67 €
19	Electricité	59,40 €	179,72 €	85,30 €	88.757,98 €
20	Membrane bitumineuse	5.329,76 €	8.733,44 €	3.985,83 €	92.830,75 €
	Electricité	59,40 €	190,50 €	86,94 €	
21	Electricité	59,40 €	201,93 €	88,62 €	92.919,36 €
22	Electricité	59,40 €	214,05 €	90,32 €	93.009,68 €
23	Electricité	59,40 €	226,89 €	92,06 €	93.101,74 €
24	Electricité	59,40 €	240,51 €	93,83 €	93.195,57 €
25	Electricité	59,40 €	254,94 €	95,63 €	93.291,20 €
26	Electricité	59,40 €	270,23 €	97,47 €	93.388,67 €
27	Electricité	59,40 €	286,45 €	99,34 €	93.488,01 €
28	Electricité	59,40 €	303,63 €	101,26 €	93.589,27 €
29	Electricité	59,40 €	321,85 €	103,20 €	93.692,47 €
	Revêtement de sol	3.936,53 €	8.257,13 €	2.545,83 €	
30	Membrane bitumineuse	5.329,76 €	11.179,54 €	3.446,86 €	99.790,35 €
	Electricité	59,40 €	341,16 €	105,19 €	
31	Electricité	59,40 €	361,63 €	107,21 €	99.897,56 €
32	Electricité	59,40 €	383,33 €	109,27 €	100.006,83 €
33	Electricité	59,40 €	406,33 €	111,37 €	100.118,20 €
34	Electricité	59,40 €	430,71 €	113,51 €	100.231,72 €
35	Electricité	59,40 €	456,55 €	115,70 €	100.347,41 €
36	Electricité	59,40 €	483,95 €	117,92 €	100.465,34 €
37	Electricité	59,40 €	512,98 €	120,19 €	100.585,53 €
38	Electricité	59,40 €	543,76 €	122,50 €	100.708,03 €
39	Electricité	59,40 €	576,39 €	124,86 €	100.832,89 €
40	Membrane bitumineuse	5.329,76 €	14.310,76 €	2.980,77 €	103.940,92 €
	Electricité	59,40 €	610,97 €	127,26 €	
41	Electricité	59,40 €	647,63 €	129,71 €	104.070,63 €
42	Electricité	59,40 €	686,49 €	132,20 €	104.202,83 €
43	Electricité	59,40 €	727,68 €	134,74 €	104.337,57 €
44	Electricité	59,40 €	771,34 €	137,33 €	104.474,90 €
45	Electricité	59,40 €	817,62 €	139,97 €	104.614,88 €
46	Electricité	59,40 €	866,67 €	142,67 €	104.757,54 €
47	Electricité	59,40 €	918,68 €	145,41 €	104.902,95 €
48	Electricité	59,40 €	973,80 €	148,21 €	105.051,16 €
49	Electricité	59,40 €	1.032,22 €	151,06 €	105.202,22 €
SOMME TOTALE A PREVOIR A L'ANNEE 0					105.202,22 €

Prix de la construction IsoHemp				
Paroi	Matériau	Prix pour le produit et la pose	Dimension	Coût
Cloisons intérieures	Blocs IsoHemp (120)	50 €/m ²	134,228 m ²	6.711,40 €
	Plâtre	35 €/m ²	266 m ²	9.310,00 €
TOTAL				16.021,40 €
Paroi	Matériau	Prix pour le produit et la pose	Dimension	Coût
Cloisons extérieures	Blocs IsoHemp (150)	55 €/m ²	147,96 m ²	8.137,80 €
	Blocs IsoHemp (120)	50 €/m ²	184,383 m ²	9.219,15 €
	Plâtre	35 €/m ²	160,6 m ²	5.621,00 €
	Bois pour linteaux - montants de l'ossature - lisses hautes et basses	77 €/m ²	35,412 m ²	2.726,72 €
	Laine de chanvre	126,5 €/m ³	36,864 m ³	4.663,30 €
	Lattes et contre-lattes	11,5 €/m ²	68,568 m ²	788,53 €
	Bardage	133 €/m ²	192,394 m ²	25.588,40 €
TOTAL				56.744,90 €
Paroi	Matériau	Prix pour le produit et la pose	Dimension	Coût
Plancher	Blocs IsoHemp (150)	37,5 €/m ²	73,820 m ²	2.768,25 €
	Montants - poutres	765 €/m ³	1,505 m ³	1.151,33 €
	Plâtre	35 €/m ²	82,1 m ²	2.873,50 €
	OSB	21,25 €/m ²	88,605 m ²	1.882,86 €
	Poutre en I	8,5 €/m	289 m	2.456,50 €
	Revêtement de sol	93 €/m ²	69,472 m ²	6.460,90 €
TOTAL				17.593,33 €
Paroi	Matériau	Prix pour le produit et la pose	Dimension	Coût
Toiture	Laine de chanvre	126,5 €/m ³	21,168 m ³	2.677,75 €
	Montants - poutres	765 €/m ³	1,805 m ³	1.380,83 €
	Plâtre	35 €/m ²	68,383 m ²	2.393,41 €
	OSB	21,25 €/m ²	93,910 m ²	1.995,59 €
	Poutre en I	8,5 €/m	289 m	2.456,50 €
	Panneaux isolants	28 €/m ²	91,198 m ²	2.553,54 €
	Membrane bitumineuse	67,25 €/m ²	86,052 m ²	5.787,00 €
	Acrotère	765 €/m ³	1,572 m ³	1.202,58 €
TOTAL				20.447,19 €
TOTAL MAISON ISOHEMP COMPLETE				110.806,82 €

d = 4%
g (énergie) = 4%
g (travaux et matériaux) = 2,5%

Coût du cycle de vie - Maison IsoHemp - scénario de base					
Année	Type de coût	Montant à l'année 0	Montant à l'année X	Valeur nette actuelle	Coût total
0	Construction de la maison	110.806,82 €	110.806,82 €	110.806,82 €	110.866,22 €
	Electricité	59,40 €	59,40 €	59,40 €	
1	Electricité	59,40 €	61,78 €	59,40 €	110.925,62 €
2	Electricité	59,40 €	64,25 €	59,40 €	110.985,02 €
3	Electricité	59,40 €	66,82 €	59,40 €	111.044,42 €
4	Electricité	59,40 €	69,49 €	59,40 €	111.103,82 €
5	Electricité	59,40 €	72,27 €	59,40 €	111.163,22 €
6	Electricité	59,40 €	75,16 €	59,40 €	111.222,62 €
7	Electricité	59,40 €	78,17 €	59,40 €	111.282,02 €
8	Electricité	59,40 €	81,29 €	59,40 €	111.341,42 €
9	Electricité	59,40 €	84,54 €	59,40 €	111.400,82 €
10	Membrane bitumineuse	5.787,00 €	7.407,85 €	5.004,47 €	116.464,70 €
	Electricité	59,40 €	87,93 €	59,40 €	
11	Electricité	59,40 €	91,44 €	59,40 €	116.524,10 €
12	Electricité	59,40 €	95,10 €	59,40 €	116.583,50 €
13	Electricité	59,40 €	98,91 €	59,40 €	116.642,90 €
14	Electricité	59,40 €	102,86 €	59,40 €	116.702,30 €
15	Electricité	59,40 €	106,98 €	59,40 €	116.761,70 €
16	Electricité	59,40 €	111,26 €	59,40 €	116.821,10 €
17	Electricité	59,40 €	115,71 €	59,40 €	116.880,50 €
18	Electricité	59,40 €	120,33 €	59,40 €	116.939,90 €
19	Electricité	59,40 €	125,15 €	59,40 €	116.999,30 €
	Bardage	25.588,40 €	41.929,58 €	19.136,11 €	
20	Membrane bitumineuse	5.787,00 €	9.482,67 €	4.327,77 €	140.522,57 €
	Electricité	59,40 €	130,15 €	59,40 €	
21	Electricité	59,40 €	135,36 €	59,40 €	140.581,97 €
22	Electricité	59,40 €	140,77 €	59,40 €	140.641,37 €
23	Electricité	59,40 €	146,40 €	59,40 €	140.700,77 €
24	Electricité	59,40 €	152,26 €	59,40 €	140.760,17 €
25	Electricité	59,40 €	158,35 €	59,40 €	140.819,57 €
26	Electricité	59,40 €	164,68 €	59,40 €	140.878,97 €
27	Electricité	59,40 €	171,27 €	59,40 €	140.938,37 €
28	Electricité	59,40 €	178,12 €	59,40 €	140.997,77 €
29	Electricité	59,40 €	185,25 €	59,40 €	141.057,17 €
30	Membrane bitumineuse	5.787,00 €	12.138,62 €	3.742,56 €	144.859,14 €
	Electricité	59,40 €	192,66 €	59,40 €	
31	Electricité	59,40 €	200,36 €	59,40 €	144.918,54 €
32	Electricité	59,40 €	208,38 €	59,40 €	144.977,94 €
33	Electricité	59,40 €	216,71 €	59,40 €	145.037,34 €
34	Electricité	59,40 €	225,38 €	59,40 €	145.096,74 €
35	Electricité	59,40 €	234,40 €	59,40 €	145.156,14 €
36	Electricité	59,40 €	243,77 €	59,40 €	145.215,54 €
37	Electricité	59,40 €	253,52 €	59,40 €	145.274,94 €
38	Electricité	59,40 €	263,67 €	59,40 €	145.334,34 €
39	Electricité	59,40 €	274,21 €	59,40 €	145.393,74 €
	Bardage	25.588,40 €	68.706,49 €	14.310,81 €	
40	Membrane bitumineuse	5.787,00 €	15.538,46 €	3.236,49 €	163.000,44 €
	Electricité	59,40 €	285,18 €	59,40 €	
41	Electricité	59,40 €	296,59 €	59,40 €	163.059,84 €
42	Electricité	59,40 €	308,45 €	59,40 €	163.119,24 €
43	Electricité	59,40 €	320,79 €	59,40 €	163.178,64 €
44	Electricité	59,40 €	333,62 €	59,40 €	163.238,04 €
45	Electricité	59,40 €	346,97 €	59,40 €	163.297,44 €
46	Electricité	59,40 €	360,84 €	59,40 €	163.356,84 €
47	Electricité	59,40 €	375,28 €	59,40 €	163.416,24 €
48	Electricité	59,40 €	390,29 €	59,40 €	163.475,64 €
49	Electricité	59,40 €	405,90 €	59,40 €	163.535,04 €
SOMME TOTALE A PREVOIR A L'ANNEE 0					163.535,04 €

d = 6%
g (énergie) = 4%
g (travaux et matériaux) = 2,5%

Coût du cycle de vie - Maison IsoHemp - scénario 1					
Année	Type de coût	Montant à l'année 0	Montant à l'année X	Valeur nette actuelle	Coût total
0	Construction de la maison	110.806,82 €	110.806,82 €	110.806,82 €	110.866,22 €
	Electricité	59,40 €	59,40 €	59,40 €	
1	Electricité	59,40 €	61,78 €	61,78 €	110.928,00 €
2	Electricité	59,40 €	64,25 €	60,61 €	110.988,61 €
3	Electricité	59,40 €	66,82 €	59,47 €	111.048,07 €
4	Electricité	59,40 €	69,49 €	58,34 €	111.106,42 €
5	Electricité	59,40 €	72,27 €	57,24 €	111.163,66 €
6	Electricité	59,40 €	75,16 €	56,16 €	111.219,83 €
7	Electricité	59,40 €	78,17 €	55,10 €	111.274,93 €
8	Electricité	59,40 €	81,29 €	54,06 €	111.329,00 €
9	Electricité	59,40 €	84,54 €	53,04 €	111.382,04 €
10	Membrane bitumineuse	5.787,00 €	7.407,85 €	4.136,50 €	115.567,64 €
	Electricité	59,40 €	87,93 €	49,10 €	
11	Electricité	59,40 €	91,44 €	48,17 €	115.615,81 €
12	Electricité	59,40 €	95,10 €	47,26 €	115.663,07 €
13	Electricité	59,40 €	98,91 €	46,37 €	115.709,45 €
14	Electricité	59,40 €	102,86 €	45,50 €	115.754,94 €
15	Electricité	59,40 €	106,98 €	44,64 €	115.799,58 €
16	Electricité	59,40 €	111,26 €	43,80 €	115.843,37 €
17	Electricité	59,40 €	115,71 €	42,97 €	115.886,34 €
18	Electricité	59,40 €	120,33 €	42,16 €	115.928,50 €
19	Electricité	59,40 €	125,15 €	41,36 €	115.969,86 €
	Bardage	25.588,40 €	41.929,58 €	13.073,84 €	
20	Membrane bitumineuse	5.787,00 €	9.482,67 €	2.956,74 €	132.041,03 €
	Electricité	59,40 €	130,15 €	40,58 €	
21	Electricité	59,40 €	135,36 €	39,82 €	132.080,84 €
22	Electricité	59,40 €	140,77 €	39,07 €	132.119,91 €
23	Electricité	59,40 €	146,40 €	38,33 €	132.158,24 €
24	Electricité	59,40 €	152,26 €	37,61 €	132.195,84 €
25	Electricité	59,40 €	158,35 €	36,90 €	132.232,74 €
26	Electricité	59,40 €	164,68 €	36,20 €	132.268,94 €
27	Electricité	59,40 €	171,27 €	35,52 €	132.304,45 €
28	Electricité	59,40 €	178,12 €	34,85 €	132.339,30 €
29	Electricité	59,40 €	185,25 €	34,19 €	132.373,49 €
30	Membrane bitumineuse	5.787,00 €	12.138,62 €	2.113,46 €	134.520,49 €
	Electricité	59,40 €	192,66 €	33,54 €	
31	Electricité	59,40 €	200,36 €	32,91 €	134.553,40 €
32	Electricité	59,40 €	208,38 €	32,29 €	134.585,69 €
33	Electricité	59,40 €	216,71 €	31,68 €	134.617,37 €
34	Electricité	59,40 €	225,38 €	31,08 €	134.648,45 €
35	Electricité	59,40 €	234,40 €	30,50 €	134.678,95 €
36	Electricité	59,40 €	243,77 €	29,92 €	134.708,87 €
37	Electricité	59,40 €	253,52 €	29,36 €	134.738,22 €
38	Electricité	59,40 €	263,67 €	28,80 €	134.767,03 €
39	Electricité	59,40 €	274,21 €	28,26 €	134.795,29 €
	Bardage	25.588,40 €	68.706,49 €	6.679,80 €	
40	Membrane bitumineuse	5.787,00 €	15.538,46 €	1.510,68 €	143.013,49 €
	Electricité	59,40 €	285,18 €	27,73 €	
41	Electricité	59,40 €	296,59 €	27,20 €	143.040,69 €
42	Electricité	59,40 €	308,45 €	26,69 €	143.067,38 €
43	Electricité	59,40 €	320,79 €	26,19 €	143.093,57 €
44	Electricité	59,40 €	333,62 €	25,69 €	143.119,26 €
45	Electricité	59,40 €	346,97 €	25,21 €	143.144,47 €
46	Electricité	59,40 €	360,84 €	24,73 €	143.169,20 €
47	Electricité	59,40 €	375,28 €	24,26 €	143.193,46 €
48	Electricité	59,40 €	390,29 €	23,81 €	143.217,27 €
49	Electricité	59,40 €	405,90 €	23,36 €	143.240,63 €
SOMME TOTALE A PREVOIR A L'ANNEE 0					143.240,63 €

d = 4%
g (énergie) = 6%
g (travaux et matériaux) = 2,5%

Coût du cycle de vie - Maison IsoHemp - scénario 2					
Année	Type de coût	Montant à l'année 0	Montant à l'année X	Valeur nette actuelle	Coût total
0	Construction de la maison	110.806,82 €	110.806,82 €	110.806,82 €	110.866,22 €
	Electricité	59,40 €	59,40 €	59,40 €	
1	Electricité	59,40 €	62,96 €	60,54 €	110.926,76 €
2	Electricité	59,40 €	66,74 €	61,71 €	110.988,47 €
3	Electricité	59,40 €	70,75 €	62,89 €	111.051,36 €
4	Electricité	59,40 €	74,99 €	64,10 €	111.115,47 €
5	Electricité	59,40 €	79,49 €	65,34 €	111.180,80 €
6	Electricité	59,40 €	84,26 €	66,59 €	111.247,39 €
7	Electricité	59,40 €	89,32 €	67,87 €	111.315,27 €
8	Electricité	59,40 €	94,67 €	69,18 €	111.384,44 €
9	Electricité	59,40 €	100,36 €	70,51 €	111.454,95 €
10	Membrane bitumineuse	5.787,00 €	7.407,85 €	5.004,47 €	116.531,29 €
	Electricité	59,40 €	106,38 €	71,86 €	
11	Electricité	59,40 €	112,76 €	73,25 €	116.604,54 €
12	Electricité	59,40 €	119,52 €	74,65 €	116.679,19 €
13	Electricité	59,40 €	126,70 €	76,09 €	116.755,28 €
14	Electricité	59,40 €	134,30 €	77,55 €	116.832,84 €
15	Electricité	59,40 €	142,36 €	79,04 €	116.911,88 €
16	Electricité	59,40 €	150,90 €	80,57 €	116.992,45 €
17	Electricité	59,40 €	159,95 €	82,11 €	117.074,56 €
18	Electricité	59,40 €	169,55 €	83,69 €	117.158,25 €
19	Electricité	59,40 €	179,72 €	85,30 €	117.243,56 €
	Bardage	25.588,40 €	41.929,58 €	19.136,11 €	
20	Membrane bitumineuse	5.787,00 €	9.482,67 €	4.327,77 €	140.794,38 €
	Electricité	59,40 €	190,50 €	86,94 €	
21	Electricité	59,40 €	201,93 €	88,62 €	140.882,99 €
22	Electricité	59,40 €	214,05 €	90,32 €	140.973,31 €
23	Electricité	59,40 €	226,89 €	92,06 €	141.065,37 €
24	Electricité	59,40 €	240,51 €	93,83 €	141.159,20 €
25	Electricité	59,40 €	254,94 €	95,63 €	141.254,83 €
26	Electricité	59,40 €	270,23 €	97,47 €	141.352,30 €
27	Electricité	59,40 €	286,45 €	99,34 €	141.451,64 €
28	Electricité	59,40 €	303,63 €	101,26 €	141.552,90 €
29	Electricité	59,40 €	321,85 €	103,20 €	141.656,10 €
30	Membrane bitumineuse	5.787,00 €	12.138,62 €	3.742,56 €	145.503,85 €
	Electricité	59,40 €	341,16 €	105,19 €	
31	Electricité	59,40 €	361,63 €	107,21 €	145.611,06 €
32	Electricité	59,40 €	383,33 €	109,27 €	145.720,33 €
33	Electricité	59,40 €	406,33 €	111,37 €	145.831,70 €
34	Electricité	59,40 €	430,71 €	113,51 €	145.945,22 €
35	Electricité	59,40 €	456,55 €	115,70 €	146.060,92 €
36	Electricité	59,40 €	483,95 €	117,92 €	146.178,84 €
37	Electricité	59,40 €	512,98 €	120,19 €	146.299,03 €
38	Electricité	59,40 €	543,76 €	122,50 €	146.421,53 €
39	Electricité	59,40 €	576,39 €	124,86 €	146.546,39 €
	Bardage	25.588,40 €	68.706,49 €	14.310,81 €	
40	Membrane bitumineuse	5.787,00 €	15.538,46 €	3.236,49 €	164.220,95 €
	Electricité	59,40 €	610,97 €	127,26 €	
41	Electricité	59,40 €	647,63 €	129,71 €	164.350,65 €
42	Electricité	59,40 €	686,49 €	132,20 €	164.482,85 €
43	Electricité	59,40 €	727,68 €	134,74 €	164.617,60 €
44	Electricité	59,40 €	771,34 €	137,33 €	164.754,93 €
45	Electricité	59,40 €	817,62 €	139,97 €	164.894,91 €
46	Electricité	59,40 €	866,67 €	142,67 €	165.037,57 €
47	Electricité	59,40 €	918,68 €	145,41 €	165.182,98 €
48	Electricité	59,40 €	973,80 €	148,21 €	165.331,19 €
49	Electricité	59,40 €	1.032,22 €	151,06 €	165.482,25 €
SOMME TOTALE A PREVOIR A L'ANNEE 0					165.482,25 €

Prix de la construction Argimob				
Paroi	Matériau	Prix pour le produit et la pose	Dimension	Coût
Cloisons intérieures	Paroi intérieure Argimob	75 €/m ²	154,08 m ²	11.556,00 €
TOTAL				11.556,00 €
Paroi	Matériau	Prix pour le produit et la pose	Dimension	Coût
Cloisons extérieures	Paroi extérieure Argimob	142,5 €/m ²	204,565 m ²	29.150,51 €
	Lattes et contre-lattes	11,5 €/m ²	64,4 m ²	740,60 €
	Bardage	133 €/m ²	191,3 m ²	25.442,90 €
TOTAL				55.334,01 €
Paroi	Matériau	Prix pour le produit et la pose	Dimension	Coût
Plancher	Plancher MJI	45 €/m ²	78,883 m ²	3.549,74 €
	Revêtement de sol	93 €/m ²	74,389 m ²	6.918,18 €
TOTAL				10.467,91 €
Paroi	Matériau	Prix pour le produit et la pose	Dimension	Coût
Toiture	Caissons Mobic toit plat	80 €/m ²	78,883 m ²	6.310,64 €
	Acrotère	774 €/m ³	1,977 m ³	1.530,20 €
TOTAL				7.840,84 €
TOTAL MAISON ARGIMOB COMPLETE				85.198,76 €

d = 4%
g (énergie) = 4%
g (travaux et matériaux) = 2,5%

Coût du cycle de vie - Maison ArgiMob - scénario de base

Année	Type de coût	Montant à l'année 0	Montant à l'année X	Valeur nette actuelle	Coût total
0	Construction de la maison	85.198,76 €	85.198,76 €	85.198,76 €	85.258,16 €
	Electricité	59,40 €	59,40 €	59,40 €	
1	Electricité	59,40 €	61,78 €	59,40 €	85.317,56 €
2	Electricité	59,40 €	64,25 €	59,40 €	85.376,96 €
3	Electricité	59,40 €	66,82 €	59,40 €	85.436,36 €
4	Electricité	59,40 €	69,49 €	59,40 €	85.495,76 €
5	Electricité	59,40 €	72,27 €	59,40 €	85.555,16 €
6	Electricité	59,40 €	75,16 €	59,40 €	85.614,56 €
7	Electricité	59,40 €	78,17 €	59,40 €	85.673,96 €
8	Electricité	59,40 €	81,29 €	59,40 €	85.733,36 €
9	Electricité	59,40 €	84,54 €	59,40 €	85.792,76 €
10	Membrane bitumineuse	6.133,33 €	7.851,18 €	5.303,98 €	91.156,14 €
	Electricité	59,40 €	87,93 €	59,40 €	
11	Electricité	59,40 €	91,44 €	59,40 €	91.215,54 €
12	Electricité	59,40 €	95,10 €	59,40 €	91.274,94 €
13	Electricité	59,40 €	98,91 €	59,40 €	91.334,34 €
14	Electricité	59,40 €	102,86 €	59,40 €	91.393,74 €
15	Electricité	59,40 €	106,98 €	59,40 €	91.453,14 €
16	Electricité	59,40 €	111,26 €	59,40 €	91.512,54 €
17	Electricité	59,40 €	115,71 €	59,40 €	91.571,94 €
18	Electricité	59,40 €	120,33 €	59,40 €	91.631,34 €
19	Electricité	59,40 €	125,15 €	59,40 €	91.690,74 €
	Bardage	25.442,90 €	41.691,15 €	19.027,30 €	
20	Membrane bitumineuse	6.133,33 €	10.050,18 €	4.586,77 €	115.364,21 €
	Electricité	59,40 €	130,15 €	59,40 €	
21	Electricité	59,40 €	135,36 €	59,40 €	115.423,61 €
22	Electricité	59,40 €	140,77 €	59,40 €	115.483,01 €
23	Electricité	59,40 €	146,40 €	59,40 €	115.542,41 €
24	Electricité	59,40 €	152,26 €	59,40 €	115.601,81 €
25	Electricité	59,40 €	158,35 €	59,40 €	115.661,21 €
26	Electricité	59,40 €	164,68 €	59,40 €	115.720,61 €
27	Electricité	59,40 €	171,27 €	59,40 €	115.780,01 €
28	Electricité	59,40 €	178,12 €	59,40 €	115.839,41 €
29	Electricité	59,40 €	185,25 €	59,40 €	115.898,81 €
30	Membrane bitumineuse	6.133,33 €	12.865,07 €	3.966,54 €	119.924,75 €
	Electricité	59,40 €	192,66 €	59,40 €	
31	Electricité	59,40 €	200,36 €	59,40 €	119.984,15 €
32	Electricité	59,40 €	208,38 €	59,40 €	120.043,55 €
33	Electricité	59,40 €	216,71 €	59,40 €	120.102,95 €
34	Electricité	59,40 €	225,38 €	59,40 €	120.162,35 €
35	Electricité	59,40 €	234,40 €	59,40 €	120.221,75 €
36	Electricité	59,40 €	243,77 €	59,40 €	120.281,15 €
37	Electricité	59,40 €	253,52 €	59,40 €	120.340,55 €
38	Electricité	59,40 €	263,67 €	59,40 €	120.399,95 €
39	Electricité	59,40 €	274,21 €	59,40 €	120.459,35 €
	Bardage	25.442,90 €	68.315,81 €	14.229,43 €	
40	Membrane bitumineuse	6.133,33 €	16.468,38 €	3.430,18 €	138.178,37 €
	Electricité	59,40 €	285,18 €	59,40 €	
41	Electricité	59,40 €	296,59 €	59,40 €	138.237,77 €
42	Electricité	59,40 €	308,45 €	59,40 €	138.297,17 €
43	Electricité	59,40 €	320,79 €	59,40 €	138.356,57 €
44	Electricité	59,40 €	333,62 €	59,40 €	138.415,97 €
45	Electricité	59,40 €	346,97 €	59,40 €	138.475,37 €
46	Electricité	59,40 €	360,84 €	59,40 €	138.534,77 €
47	Electricité	59,40 €	375,28 €	59,40 €	138.594,17 €
48	Electricité	59,40 €	390,29 €	59,40 €	138.653,57 €
49	Electricité	59,40 €	405,90 €	59,40 €	138.712,97 €
SOMME TOTALE A PREVOIR A L'ANNEE 0					138.712,97 €

d = 6%
g (énergie) = 4%
g (travaux et matériaux) = 2,5%

Coût du cycle de vie - Maison ArgiMob - scénario 1					
Année	Type de coût	Montant à l'année 0	Montant à l'année X	Valeur nette actuelle	Coût total
0	Construction de la maison	85.198,76 €	85.198,76 €	85.198,76 €	85.258,16 €
	Electricité	59,40 €	59,40 €	59,40 €	
1	Electricité	59,40 €	61,78 €	61,78 €	85.319,94 €
2	Electricité	59,40 €	64,25 €	60,61 €	85.380,55 €
3	Electricité	59,40 €	66,82 €	59,47 €	85.440,02 €
4	Electricité	59,40 €	69,49 €	58,34 €	85.498,36 €
5	Electricité	59,40 €	72,27 €	57,24 €	85.555,60 €
6	Electricité	59,40 €	75,16 €	56,16 €	85.611,77 €
7	Electricité	59,40 €	78,17 €	55,10 €	85.666,87 €
8	Electricité	59,40 €	81,29 €	54,06 €	85.720,94 €
9	Electricité	59,40 €	84,54 €	53,04 €	85.773,98 €
10	Membrane bitumineuse	6.133,33 €	7.851,18 €	4.384,06 €	90.207,14 €
	Electricité	59,40 €	87,93 €	49,10 €	
11	Electricité	59,40 €	91,44 €	48,17 €	90.255,31 €
12	Electricité	59,40 €	95,10 €	47,26 €	90.302,57 €
13	Electricité	59,40 €	98,91 €	46,37 €	90.348,94 €
14	Electricité	59,40 €	102,86 €	45,50 €	90.394,44 €
15	Electricité	59,40 €	106,98 €	44,64 €	90.439,08 €
16	Electricité	59,40 €	111,26 €	43,80 €	90.482,87 €
17	Electricité	59,40 €	115,71 €	42,97 €	90.525,84 €
18	Electricité	59,40 €	120,33 €	42,16 €	90.568,00 €
19	Electricité	59,40 €	125,15 €	41,36 €	90.609,36 €
	Bardage	25.442,90 €	41.691,15 €	12.999,50 €	
20	Membrane bitumineuse	6.133,33 €	10.050,18 €	3.133,69 €	106.783,13 €
	Electricité	59,40 €	130,15 €	40,58 €	
21	Electricité	59,40 €	135,36 €	39,82 €	106.822,95 €
22	Electricité	59,40 €	140,77 €	39,07 €	106.862,02 €
23	Electricité	59,40 €	146,40 €	38,33 €	106.900,34 €
24	Electricité	59,40 €	152,26 €	37,61 €	106.937,95 €
25	Electricité	59,40 €	158,35 €	36,90 €	106.974,84 €
26	Electricité	59,40 €	164,68 €	36,20 €	107.011,04 €
27	Electricité	59,40 €	171,27 €	35,52 €	107.046,56 €
28	Electricité	59,40 €	178,12 €	34,85 €	107.081,41 €
29	Electricité	59,40 €	185,25 €	34,19 €	107.115,59 €
30	Membrane bitumineuse	6.133,33 €	12.865,07 €	2.239,94 €	109.389,08 €
	Electricité	59,40 €	192,66 €	33,54 €	
31	Electricité	59,40 €	200,36 €	32,91 €	109.421,99 €
32	Electricité	59,40 €	208,38 €	32,29 €	109.454,28 €
33	Electricité	59,40 €	216,71 €	31,68 €	109.485,96 €
34	Electricité	59,40 €	225,38 €	31,08 €	109.517,04 €
35	Electricité	59,40 €	234,40 €	30,50 €	109.547,54 €
36	Electricité	59,40 €	243,77 €	29,92 €	109.577,46 €
37	Electricité	59,40 €	253,52 €	29,36 €	109.606,82 €
38	Electricité	59,40 €	263,67 €	28,80 €	109.635,62 €
39	Electricité	59,40 €	274,21 €	28,26 €	109.663,88 €
	Bardage	25.442,90 €	68.315,81 €	6.641,81 €	
40	Membrane bitumineuse	6.133,33 €	16.468,38 €	1.601,09 €	117.934,51 €
	Electricité	59,40 €	285,18 €	27,73 €	
41	Electricité	59,40 €	296,59 €	27,20 €	117.961,71 €
42	Electricité	59,40 €	308,45 €	26,69 €	117.988,40 €
43	Electricité	59,40 €	320,79 €	26,19 €	118.014,59 €
44	Electricité	59,40 €	333,62 €	25,69 €	118.040,28 €
45	Electricité	59,40 €	346,97 €	25,21 €	118.065,49 €
46	Electricité	59,40 €	360,84 €	24,73 €	118.090,22 €
47	Electricité	59,40 €	375,28 €	24,26 €	118.114,48 €
48	Electricité	59,40 €	390,29 €	23,81 €	118.138,29 €
49	Electricité	59,40 €	405,90 €	23,36 €	118.161,65 €
SOMME TOTALE A PREVOIR A L'ANNEE 0					118.161,65 €

d = 4%
g (énergie) = 6%
g (travaux et matériaux) = 2,5%

Coût du cycle de vie - Maison ArgiMob - scénario 2					
Année	Type de coût	Montant à l'année 0	Montant à l'année X	Valeur nette actuelle	Coût total
0	Construction de la maison	85.198,76 €	85.198,76 €	85.198,76 €	85.258,16 €
	Electricité	59,40 €	59,40 €	59,40 €	
1	Electricité	59,40 €	62,96 €	60,54 €	85.318,70 €
2	Electricité	59,40 €	66,74 €	61,71 €	85.380,41 €
3	Electricité	59,40 €	70,75 €	62,89 €	85.443,30 €
4	Electricité	59,40 €	74,99 €	64,10 €	85.507,41 €
5	Electricité	59,40 €	79,49 €	65,34 €	85.572,74 €
6	Electricité	59,40 €	84,26 €	66,59 €	85.639,33 €
7	Electricité	59,40 €	89,32 €	67,87 €	85.707,21 €
8	Electricité	59,40 €	94,67 €	69,18 €	85.776,39 €
9	Electricité	59,40 €	100,36 €	70,51 €	85.846,89 €
10	Membrane bitumineuse	6.133,33 €	7.851,18 €	5.303,98 €	91.222,73 €
	Electricité	59,40 €	106,38 €	71,86 €	
11	Electricité	59,40 €	112,76 €	73,25 €	91.295,98 €
12	Electricité	59,40 €	119,52 €	74,65 €	91.370,63 €
13	Electricité	59,40 €	126,70 €	76,09 €	91.446,72 €
14	Electricité	59,40 €	134,30 €	77,55 €	91.524,28 €
15	Electricité	59,40 €	142,36 €	79,04 €	91.603,32 €
16	Electricité	59,40 €	150,90 €	80,57 €	91.683,89 €
17	Electricité	59,40 €	159,95 €	82,11 €	91.766,00 €
18	Electricité	59,40 €	169,55 €	83,69 €	91.849,70 €
19	Electricité	59,40 €	179,72 €	85,30 €	91.935,00 €
	Bardage	25.442,90 €	41.691,15 €	19.027,30 €	
20	Membrane bitumineuse	6.133,33 €	10.050,18 €	4.586,77 €	115.636,01 €
	Electricité	59,40 €	190,50 €	86,94 €	
21	Electricité	59,40 €	201,93 €	88,62 €	115.724,63 €
22	Electricité	59,40 €	214,05 €	90,32 €	115.814,95 €
23	Electricité	59,40 €	226,89 €	92,06 €	115.907,00 €
24	Electricité	59,40 €	240,51 €	93,83 €	116.000,83 €
25	Electricité	59,40 €	254,94 €	95,63 €	116.096,46 €
26	Electricité	59,40 €	270,23 €	97,47 €	116.193,93 €
27	Electricité	59,40 €	286,45 €	99,34 €	116.293,27 €
28	Electricité	59,40 €	303,63 €	101,26 €	116.394,53 €
29	Electricité	59,40 €	321,85 €	103,20 €	116.497,73 €
30	Membrane bitumineuse	6.133,33 €	12.865,07 €	3.966,54 €	120.569,46 €
	Electricité	59,40 €	341,16 €	105,19 €	
31	Electricité	59,40 €	361,63 €	107,21 €	120.676,67 €
32	Electricité	59,40 €	383,33 €	109,27 €	120.785,94 €
33	Electricité	59,40 €	406,33 €	111,37 €	120.897,32 €
34	Electricité	59,40 €	430,71 €	113,51 €	121.010,83 €
35	Electricité	59,40 €	456,55 €	115,70 €	121.126,53 €
36	Electricité	59,40 €	483,95 €	117,92 €	121.244,45 €
37	Electricité	59,40 €	512,98 €	120,19 €	121.364,64 €
38	Electricité	59,40 €	543,76 €	122,50 €	121.487,14 €
39	Electricité	59,40 €	576,39 €	124,86 €	121.612,00 €
	Bardage	25.442,90 €	68.315,81 €	14.229,43 €	
40	Membrane bitumineuse	6.133,33 €	16.468,38 €	3.430,18 €	139.398,88 €
	Electricité	59,40 €	610,97 €	127,26 €	
41	Electricité	59,40 €	647,63 €	129,71 €	139.528,58 €
42	Electricité	59,40 €	686,49 €	132,20 €	139.660,79 €
43	Electricité	59,40 €	727,68 €	134,74 €	139.795,53 €
44	Electricité	59,40 €	771,34 €	137,33 €	139.932,86 €
45	Electricité	59,40 €	817,62 €	139,97 €	140.072,84 €
46	Electricité	59,40 €	866,67 €	142,67 €	140.215,50 €
47	Electricité	59,40 €	918,68 €	145,41 €	140.360,91 €
48	Electricité	59,40 €	973,80 €	148,21 €	140.509,12 €
49	Electricité	59,40 €	1.032,22 €	151,06 €	140.660,18 €
SOMME TOTALE A PREVOIR A L'ANNEE 0					140.660,18 €

Prix de la construction PailleTech				
Paroi	Matériau	Prix pour le produit et la pose	Dimension	Coût
Cloisons intérieures	Paroi intérieure PailleTech	110 €/m ²	154,08 m ²	16.948,80 €
TOTAL				16.948,80 €
Paroi	Matériau	Prix pour le produit et la pose	Dimension	Coût
Cloisons extérieures	Paroi extérieure PailleTech	220 €/m ²	231,302 m ²	50.886,44 €
	Finition intérieure	50 €/m ²	224,686 m ²	11.234,30 €
	Lattes et contre-lattes	11,5 €/m ²	49,224 m ²	566,08 €
	Bardage	133 €/m ²	196,874 m ²	26.184,24 €
TOTAL				88.871,06 €
Paroi	Matériau	Prix pour le produit et la pose	Dimension	Coût
Plancher	Plancher PailleTech	130 €/m ²	96,158	12.500,54 €
	Revêtement de sol	93 €/m ²	69,42	6.456,06 €
TOTAL				18.956,60 €
Toiture	Toiture PailleTech	210 €/m ²	99,415 m ²	20.877,15 €
	Membrane bitumineuse	67,25 €/m ²	95,52 m ²	6.423,72 €
	Acrotère	150 €/ml	41,174 m	6.176,10 €
TOTAL				33.476,97 €
TOTAL MAISON PAILLETECH COMPLETE				158.253,43 €

d = 4%
g (énergie) = 4%
g (travaux et matériaux) = 2,5%

Coût du cycle de vie - Maison PailleTech - scénario de base					
Année	Type de coût	Montant à l'année 0	Montant à l'année X	Valeur nette actuelle	Coût total
0	Construction de la maison	158.253,43 €	158.253,43 €	158.253,43 €	158.312,83 €
	Electricité	59,40 €	59,40 €	59,40 €	
1	Electricité	59,40 €	61,78 €	59,40 €	158.372,23 €
2	Electricité	59,40 €	64,25 €	59,40 €	158.431,63 €
3	Electricité	59,40 €	66,82 €	59,40 €	158.491,03 €
4	Electricité	59,40 €	69,49 €	59,40 €	158.550,43 €
5	Electricité	59,40 €	72,27 €	59,40 €	158.609,83 €
6	Electricité	59,40 €	75,16 €	59,40 €	158.669,23 €
7	Electricité	59,40 €	78,17 €	59,40 €	158.728,63 €
8	Electricité	59,40 €	81,29 €	59,40 €	158.788,03 €
9	Electricité	59,40 €	84,54 €	59,40 €	158.847,43 €
10	Membrane bitumineuse	6.423,72 €	8.222,90 €	5.555,10 €	164.461,93 €
	Electricité	59,40 €	87,93 €	59,40 €	
11	Electricité	59,40 €	91,44 €	59,40 €	164.521,33 €
12	Electricité	59,40 €	95,10 €	59,40 €	164.580,73 €
13	Electricité	59,40 €	98,91 €	59,40 €	164.640,13 €
14	Electricité	59,40 €	102,86 €	59,40 €	164.699,53 €
15	Electricité	59,40 €	106,98 €	59,40 €	164.758,93 €
16	Electricité	59,40 €	111,26 €	59,40 €	164.818,33 €
17	Electricité	59,40 €	115,71 €	59,40 €	164.877,73 €
18	Electricité	59,40 €	120,33 €	59,40 €	164.937,13 €
19	Electricité	59,40 €	125,15 €	59,40 €	164.996,53 €
	Bardage	26.184,24 €	42.905,93 €	19.581,71 €	
20	Membrane bitumineuse	6.423,72 €	10.526,01 €	4.803,94 €	189.441,57 €
	Electricité	59,40 €	130,15 €	59,40 €	
21	Electricité	59,40 €	135,36 €	59,40 €	189.500,97 €
22	Electricité	59,40 €	140,77 €	59,40 €	189.560,37 €
23	Electricité	59,40 €	146,40 €	59,40 €	189.619,77 €
24	Electricité	59,40 €	152,26 €	59,40 €	189.679,17 €
25	Electricité	59,40 €	158,35 €	59,40 €	189.738,57 €
26	Electricité	59,40 €	164,68 €	59,40 €	189.797,97 €
27	Electricité	59,40 €	171,27 €	59,40 €	189.857,37 €
28	Electricité	59,40 €	178,12 €	59,40 €	189.916,77 €
29	Electricité	59,40 €	185,25 €	59,40 €	189.976,17 €
30	Membrane bitumineuse	6.423,72 €	13.474,19 €	4.154,34 €	194.189,91 €
	Electricité	59,40 €	192,66 €	59,40 €	
31	Electricité	59,40 €	200,36 €	59,40 €	194.249,31 €
32	Electricité	59,40 €	208,38 €	59,40 €	194.308,71 €
33	Electricité	59,40 €	216,71 €	59,40 €	194.368,11 €
34	Electricité	59,40 €	225,38 €	59,40 €	194.427,51 €
35	Electricité	59,40 €	234,40 €	59,40 €	194.486,91 €
36	Electricité	59,40 €	243,77 €	59,40 €	194.546,31 €
37	Electricité	59,40 €	253,52 €	59,40 €	194.605,71 €
38	Electricité	59,40 €	263,67 €	59,40 €	194.665,11 €
39	Electricité	59,40 €	274,21 €	59,40 €	194.724,51 €
	Bardage	26.184,24 €	70.306,36 €	14.644,04 €	
40	Membrane bitumineuse	6.423,72 €	17.248,10 €	3.592,59 €	213.020,55 €
	Electricité	59,40 €	285,18 €	59,40 €	
41	Electricité	59,40 €	296,59 €	59,40 €	213.079,95 €
42	Electricité	59,40 €	308,45 €	59,40 €	213.139,35 €
43	Electricité	59,40 €	320,79 €	59,40 €	213.198,75 €
44	Electricité	59,40 €	333,62 €	59,40 €	213.258,15 €
45	Electricité	59,40 €	346,97 €	59,40 €	213.317,55 €
46	Electricité	59,40 €	360,84 €	59,40 €	213.376,95 €
47	Electricité	59,40 €	375,28 €	59,40 €	213.436,35 €
48	Electricité	59,40 €	390,29 €	59,40 €	213.495,75 €
49	Electricité	59,40 €	405,90 €	59,40 €	213.555,15 €
SOMME TOTALE A PREVOIR A L'ANNEE 0					213.555,15 €

d = 6%
g (énergie) = 4%
g (travaux et matériaux) = 2,5%

Coût du cycle de vie - Maison PailleTech - scénario 1					
Année	Type de coût	Montant à l'année 0	Montant à l'année X	Valeur nette actuelle	Coût total
0	Construction de la maison	158.253,43 €	158.253,43 €	158.253,43 €	158.312,83 €
	Electricité	59,40 €	59,40 €	59,40 €	
1	Electricité	59,40 €	61,78 €	61,78 €	158.374,60 €
2	Electricité	59,40 €	64,25 €	60,61 €	158.435,21 €
3	Electricité	59,40 €	66,82 €	59,47 €	158.494,68 €
4	Electricité	59,40 €	69,49 €	58,34 €	158.553,03 €
5	Electricité	59,40 €	72,27 €	57,24 €	158.610,27 €
6	Electricité	59,40 €	75,16 €	56,16 €	158.666,43 €
7	Electricité	59,40 €	78,17 €	55,10 €	158.721,54 €
8	Electricité	59,40 €	81,29 €	54,06 €	158.775,60 €
9	Electricité	59,40 €	84,54 €	53,04 €	158.828,65 €
10	Membrane bitumineuse	6.423,72 €	8.222,90 €	4.591,63 €	163.469,37 €
	Electricité	59,40 €	87,93 €	49,10 €	
11	Electricité	59,40 €	91,44 €	48,17 €	163.517,54 €
12	Electricité	59,40 €	95,10 €	47,26 €	163.564,81 €
13	Electricité	59,40 €	98,91 €	46,37 €	163.611,18 €
14	Electricité	59,40 €	102,86 €	45,50 €	163.656,67 €
15	Electricité	59,40 €	106,98 €	44,64 €	163.701,31 €
16	Electricité	59,40 €	111,26 €	43,80 €	163.745,10 €
17	Electricité	59,40 €	115,71 €	42,97 €	163.788,07 €
18	Electricité	59,40 €	120,33 €	42,16 €	163.830,23 €
19	Electricité	59,40 €	125,15 €	41,36 €	163.871,59 €
	Bardage	26.184,24 €	42.905,93 €	13.378,27 €	
20	Membrane bitumineuse	6.423,72 €	10.526,01 €	3.282,06 €	180.572,51 €
	Electricité	59,40 €	130,15 €	40,58 €	
21	Electricité	59,40 €	135,36 €	39,82 €	180.612,33 €
22	Electricité	59,40 €	140,77 €	39,07 €	180.651,39 €
23	Electricité	59,40 €	146,40 €	38,33 €	180.689,72 €
24	Electricité	59,40 €	152,26 €	37,61 €	180.727,32 €
25	Electricité	59,40 €	158,35 €	36,90 €	180.764,22 €
26	Electricité	59,40 €	164,68 €	36,20 €	180.800,42 €
27	Electricité	59,40 €	171,27 €	35,52 €	180.835,93 €
28	Electricité	59,40 €	178,12 €	34,85 €	180.870,78 €
29	Electricité	59,40 €	185,25 €	34,19 €	180.904,97 €
30	Membrane bitumineuse	6.423,72 €	13.474,19 €	2.345,99 €	183.284,51 €
	Electricité	59,40 €	192,66 €	33,54 €	
31	Electricité	59,40 €	200,36 €	32,91 €	183.317,42 €
32	Electricité	59,40 €	208,38 €	32,29 €	183.349,71 €
33	Electricité	59,40 €	216,71 €	31,68 €	183.381,39 €
34	Electricité	59,40 €	225,38 €	31,08 €	183.412,47 €
35	Electricité	59,40 €	234,40 €	30,50 €	183.442,97 €
36	Electricité	59,40 €	243,77 €	29,92 €	183.472,89 €
37	Electricité	59,40 €	253,52 €	29,36 €	183.502,24 €
38	Electricité	59,40 €	263,67 €	28,80 €	183.531,05 €
39	Electricité	59,40 €	274,21 €	28,26 €	183.559,31 €
	Bardage	26.184,24 €	70.306,36 €	6.835,34 €	
40	Membrane bitumineuse	6.423,72 €	17.248,10 €	1.676,90 €	192.099,27 €
	Electricité	59,40 €	285,18 €	27,73 €	
41	Electricité	59,40 €	296,59 €	27,20 €	192.126,47 €
42	Electricité	59,40 €	308,45 €	26,69 €	192.153,16 €
43	Electricité	59,40 €	320,79 €	26,19 €	192.179,35 €
44	Electricité	59,40 €	333,62 €	25,69 €	192.205,04 €
45	Electricité	59,40 €	346,97 €	25,21 €	192.230,24 €
46	Electricité	59,40 €	360,84 €	24,73 €	192.254,98 €
47	Electricité	59,40 €	375,28 €	24,26 €	192.279,24 €
48	Electricité	59,40 €	390,29 €	23,81 €	192.303,05 €
49	Electricité	59,40 €	405,90 €	23,36 €	192.326,41 €
SOMME TOTALE A PREVOIR A L'ANNEE 0					192.326,41 €

d = 4%
g (énergie) = 6%
g (travaux et matériaux) = 2,5%

Coût du cycle de vie - Maison PailleTech - scénario 2					
Année	Type de coût	Montant à l'année 0	Montant à l'année X	Valeur nette actuelle	Coût total
0	Construction de la maison	158.253,43 €	158.253,43 €	158.253,43 €	158.312,83 €
	Electricité	59,40 €	59,40 €	59,40 €	
1	Electricité	59,40 €	62,96 €	60,54 €	158.373,37 €
2	Electricité	59,40 €	66,74 €	61,71 €	158.435,08 €
3	Electricité	59,40 €	70,75 €	62,89 €	158.497,97 €
4	Electricité	59,40 €	74,99 €	64,10 €	158.562,07 €
5	Electricité	59,40 €	79,49 €	65,34 €	158.627,41 €
6	Electricité	59,40 €	84,26 €	66,59 €	158.694,00 €
7	Electricité	59,40 €	89,32 €	67,87 €	158.761,87 €
8	Electricité	59,40 €	94,67 €	69,18 €	158.831,05 €
9	Electricité	59,40 €	100,36 €	70,51 €	158.901,56 €
10	Membrane bitumineuse	6.423,72 €	8.222,90 €	5.555,10 €	164.528,52 €
	Electricité	59,40 €	106,38 €	71,86 €	
11	Electricité	59,40 €	112,76 €	73,25 €	164.601,77 €
12	Electricité	59,40 €	119,52 €	74,65 €	164.676,42 €
13	Electricité	59,40 €	126,70 €	76,09 €	164.752,51 €
14	Electricité	59,40 €	134,30 €	77,55 €	164.830,07 €
15	Electricité	59,40 €	142,36 €	79,04 €	164.909,11 €
16	Electricité	59,40 €	150,90 €	80,57 €	164.989,68 €
17	Electricité	59,40 €	159,95 €	82,11 €	165.071,79 €
18	Electricité	59,40 €	169,55 €	83,69 €	165.155,49 €
19	Electricité	59,40 €	179,72 €	85,30 €	165.240,79 €
	Bardage	26.184,24 €	42.905,93 €	19.581,71 €	
20	Membrane bitumineuse	6.423,72 €	10.526,01 €	4.803,94 €	189.713,37 €
	Electricité	59,40 €	190,50 €	86,94 €	
21	Electricité	59,40 €	201,93 €	88,62 €	189.801,99 €
22	Electricité	59,40 €	214,05 €	90,32 €	189.892,31 €
23	Electricité	59,40 €	226,89 €	92,06 €	189.984,36 €
24	Electricité	59,40 €	240,51 €	93,83 €	190.078,19 €
25	Electricité	59,40 €	254,94 €	95,63 €	190.173,82 €
26	Electricité	59,40 €	270,23 €	97,47 €	190.271,29 €
27	Electricité	59,40 €	286,45 €	99,34 €	190.370,64 €
28	Electricité	59,40 €	303,63 €	101,26 €	190.471,89 €
29	Electricité	59,40 €	321,85 €	103,20 €	190.575,09 €
30	Membrane bitumineuse	6.423,72 €	13.474,19 €	4.154,34 €	194.834,63 €
	Electricité	59,40 €	341,16 €	105,19 €	
31	Electricité	59,40 €	361,63 €	107,21 €	194.941,84 €
32	Electricité	59,40 €	383,33 €	109,27 €	195.051,11 €
33	Electricité	59,40 €	406,33 €	111,37 €	195.162,48 €
34	Electricité	59,40 €	430,71 €	113,51 €	195.275,99 €
35	Electricité	59,40 €	456,55 €	115,70 €	195.391,69 €
36	Electricité	59,40 €	483,95 €	117,92 €	195.509,61 €
37	Electricité	59,40 €	512,98 €	120,19 €	195.629,81 €
38	Electricité	59,40 €	543,76 €	122,50 €	195.752,31 €
39	Electricité	59,40 €	576,39 €	124,86 €	195.877,16 €
	Bardage	26.184,24 €	70.306,36 €	14.644,04 €	
40	Membrane bitumineuse	6.423,72 €	17.248,10 €	3.592,59 €	214.241,06 €
	Electricité	59,40 €	610,97 €	127,26 €	
41	Electricité	59,40 €	647,63 €	129,71 €	214.370,76 €
42	Electricité	59,40 €	686,49 €	132,20 €	214.502,96 €
43	Electricité	59,40 €	727,68 €	134,74 €	214.637,71 €
44	Electricité	59,40 €	771,34 €	137,33 €	214.775,04 €
45	Electricité	59,40 €	817,62 €	139,97 €	214.915,02 €
46	Electricité	59,40 €	866,67 €	142,67 €	215.057,68 €
47	Electricité	59,40 €	918,68 €	145,41 €	215.203,09 €
48	Electricité	59,40 €	973,80 €	148,21 €	215.351,30 €
49	Electricité	59,40 €	1.032,22 €	151,06 €	215.502,36 €
SOMME TOTALE A PREVOIR A L'ANNEE 0					215.502,36 €

12.10 Interview 1 - Représentant de l'entreprise IsoHemp

Cette interview est réalisée le vendredi 06 novembre 2015, au sein de l'entreprise IsoHemp. Sont présents Monsieur BEGHIN Olivier (administrateur délégué), Monsieur ATTIA Shady et moi-même.

Attia S. : Je représente la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège et plus précisément la formation d'ingénieur civil architecte. En 2014, j'ai été invité par l'université comme chargé de cours et j'ai démarré un nouveau labo, le « Sustainable Building Design Lab ». Je commence donc à initier un travail de recherche et d'enseignement autour de la construction durable du point de vue de l'ingénieur civil architecte. Dans ce contexte, je m'intéresse à tout ce qui est conception régénérative. Le but n'est pas forcément d'être « Cradle to Cradle » mais d'avoir la même approche, d'avoir un impact positif. Dans ce cadre, les étudiants réalisent des thèses de fin d'étude chaque année. On les engage dans certaines thématiques et personnellement je leur ai proposé la conception et la construction de bâtiments durables régénératifs. On a aussi un atelier, en collaboration avec la commune de Marche-En-Famenne cette année, où l'objectif est de créer un logement collectif avec la société de logement wallon, d'avoir un projet pilote autour de ce concept de durabilité. Florence Delvenne est une étudiante de deuxième master. Elle aura fini ses études et obtiendra son diplôme en 2016. Elle a choisi de travailler sur ce thème. Ces derniers mois, on a donc essayé de déterminer et de cibler le projet de travail. On est déjà certain de l'objectif : elle veut prouver que les matériaux écologiques, comparés avec les constructions traditionnelles, peuvent avoir un rendement positif du point de vue environnemental mais aussi économique. Ce serait intéressant d'étudier ces deux aspects. Pour cela, elle veut faire une analyse comparative, en testant des matériaux comme le chanvre, la paille, le bois et l'argile, dans un contexte belge, limité à la Wallonie plus ou moins. Le but est de réaliser un travail avec une certaine profondeur et qui apporte une contribution pour la recherche puisqu'à la fin il sera jugé. Le travail doit comprendre une analyse du cycle de vie, même si nous ne sommes pas experts. Des professeurs de chimie, ingénieurs chimistes plus exactement, nous aident et pensent qu'il sera difficile de faire une analyse de cycle de vie complète et précise car nous dépendons de vous, les entrepreneurs et producteurs. En même temps, on aura une approche qui ne se voudra pas très profonde, en ce qui concerne les impacts notamment, où on peut s'arrêter aux émissions de CO_2 uniquement ou à l'énergie grise en général. Pour simplifier, on veut faire une étude belge, locale, sur le producteur et avoir une approche comparative. Avant de laisser Florence commencer, je voulais parler du fait que pour le laboratoire, j'ai créé une matériauthèque. J'ai donc un intérêt personnel à

avoir des échantillons pour le cours de « Technique des constructions » dont je suis responsable. J'essaie de ne pas le donner comme les années précédentes en parlant uniquement de l'acier, du béton et du bois. Je veux tenter d'apprendre à l'étudiant à réaliser un détail technique d'une construction en chanvre ou en paille, mélangé à une ossature bois. Je peux aussi donner l'exemple des étudiants de cette année en Atelier III. Ils vont défendre leurs projets qui sont tous faits à base de votre produit. Ils ont cherché des informations, ont compris que ce n'est pas un système porteur et qu'ils devaient donc faire une structure mélangeant chanvre et bois. Ils doivent défendre un projet complet et donc parler également de l'étanchéité à l'eau, à la vapeur, la performance énergétique, l'inertie, la régulation interne etc. Voilà donc pour le contexte.

Delvenne F. : De mon côté, le but est d'avoir une approche comparative par rapport à une construction classique belge, de type maçonnerie briques, au niveau de l'analyse du cycle de vie et du cycle des coûts. En ce qui concerne le cycle des coûts, je ne prévois pas de faire un calcul très approfondi, plutôt un simple tableau Excel, avec la liste des coûts et les formules pour déterminer comment ils évoluent dans le temps. Mon approche se concentrerait sur les matériaux et donc ici le béton de chanvre. Le but serait de faire l'inventaire moi-même et de trouver une construction à analyser. Pour les matériaux autres que le béton de chanvre, je pourrai plutôt me baser sur des bases de données européennes, afin d'avoir une idée des chiffres, que mon travail reste réaliste et que je sois capable de le terminer dans le temps imparti. Mon but ici est donc de réunir le maximum d'informations pour pouvoir faire cet inventaire mais aussi d'être capable de présenter ce matériau, expliquer son fonctionnement... Au niveau de la construction en tant que telle, je pensais plutôt le placer comme isolant extérieur, pas forcément au niveau des parois intérieures. Donc, j'aurai aimé avoir une idée du circuit de fabrication de ce matériau, savoir comment cela se passe dans votre entreprise, où se fait chaque étape et aussi une idée générale des coûts.

Beghin O. : Pas de problème. Je ne m'en suis pas occupé mais il existe une analyse du cycle de vie, qui est en phase d'être terminée, sur notre produit. Elle a été faite par l'ASBL Vabiom, en collaboration avec un organisme flamand. Donc, toutes ces informations ont été compilées entièrement. Le travail a commencé il y a deux ans et se termine bientôt. Je ne sais pas où il en est exactement, je vais regarder un peu maintenant. Mais, c'est une analyse du cycle de vie qui a été faite dans un cadre assez strict et je ne sais pas si je peux vous le donner.

Delvenne F. : Ce qui m'intéresse, ce n'est pas d'avoir le résultat final mais plutôt l'inventaire pour être certaine d'avoir les mêmes critères pour chaque maison, les mêmes coefficients de pondération etc.

Beghin O. : A ce niveau là, il faut que je regarde un peu mais je peux trouver beaucoup d'informations qui ont déjà été compilées sur tout le cycle de vie. On est parti de l'extraction des matières premières avec d'un côté le chanvre récolté sur champs et de l'autre côté l'extraction de la chaux jusqu'à la mise en œuvre du produit dans une maison. C'est donc tout le cycle qui a été analysé avec des données vraiment précises. Il y a des tableaux à n'en plus finir. A ce niveau-là, il faut que je regarde ce que je peux vous donner comme informations. Je ne vais pas vous donner le résultat parce que ça n'a peut-être pas de sens mais je peux vous donner des informations, peut-être quelques pistes que vous puissiez avoir une idée de la manière dont ils ont procédé. Je n'ai pas suivi ce dossier mais l'analyse a été faite dans un cadre assez strict et sur une durée de deux ans. Je ne sais pas si vous voulez commencer par ça ou qu'on regarde une application ? Je vais regarder si je peux retrouver ces informations déjà.

Beghin O. : Donc voici le résumé de l'analyse du cycle de vie sur lequel ils se sont basés (Figure 7.1). Il n'y a pas d'information sur les quantités mais ça résume vraiment leur travail. On va un peu le passer en revue. Donc on retrouve la phase agricole : travail du sol, semis, utilisation, récolte. Ici, on a pris en compte les semences, les fertilisants, le Diesel et le CO_2 . Ensuite, c'est la récolte ; la paille de chanvre est mise en ballots. Après, le chanvre est transporté vers une première transformation. C'est donc une phase de transport ; à nouveau le Diesel, le CO_2 etc. sont pris en compte. Il y a donc stockage de la paille. Elle arrive en ballots qui sont déroulés, hachés et la paille est défibrée. Tout ce processus intermédiaire avant que le matériau n'arrive chez nous est donc pris en compte avec notamment le stockage des granulats, granulats de chanvre que nous, nous allons acheter. Donc une fois acheté, le produit subit une nouvelle phase de transport pour arriver chez nous, par camions complets. C'est donc maintenant qu'a lieu la phase de fabrication des blocs, dans notre entreprise. On a donc les différents produits : la chaux aérienne, la chaux hydraulique, l'eau, l'électricité et évidemment le CO_2 qui est capté car le processus de photosynthèse est en œuvre dans tout le cycle. Le processus de fabrication et le stockage se font donc chez nous. On retrouve ensuite une phase de transport, par camions, généralement directement jusqu'au chantier. La marchandise, dans 80 à 90% des cas va directement sur le chantier, sans passer par un réseau de distribution, via des camions spécialisées qui ont des grues. Le dernier aspect est donc la mise en œuvre des blocs sur le chantier. Je vois ici par exemple le liant à base de chaux que nous vendons aussi. Donc, on a à présent le mur en blocs de béton de chanvre et puis la dernière phase, c'est-à-dire la fin de vie et donc la fin de construction. Voilà, c'est ce qui a été fait, essentiellement au niveau du chanvre. Mais, je le répète, je n'ai pas géré ce dossier. En fait, il doit exister la même chose pour la chaux parce que c'est l'autre matière première. On va

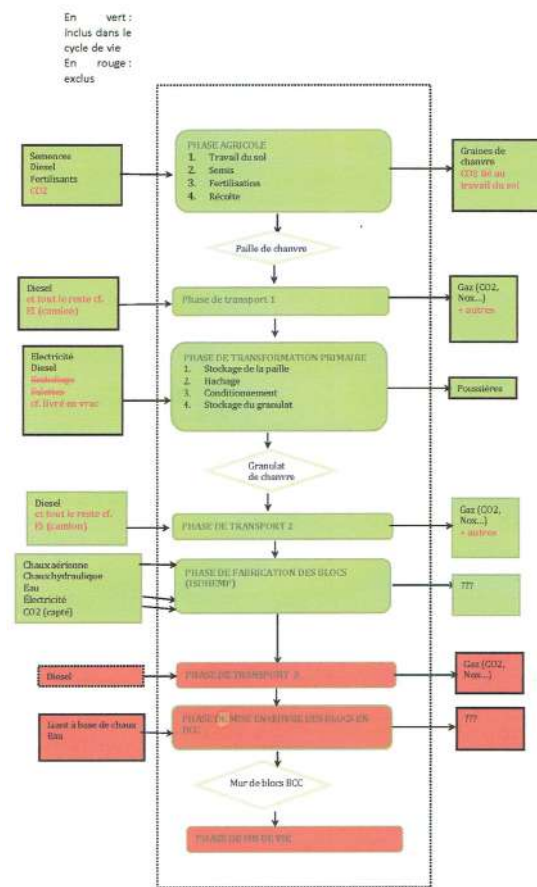


FIGURE 12.1 – Flowsheet de l'analyse du cycle de vie reçu lors de l'interview IsoHemp

retrouver de nouveau la phase d'extraction, la transformation de la chaux, les phases de transport et puis toute la phase de fabrication du bloc qui reste identique.

Attia S. : Il n'y a pas de ciment dans le bloc ?

Beghin O. : Non, il n'y en a pas.

Attia S. : Et si on veut compléter ça avec une phase de recyclage ? Imaginons un bâtiment qui a des murs en blocs de béton de chanvre, qu'est-ce qu'on peut faire ? On va démonter le mur et ensuite ?

Beghin O. : On peut le valoriser. Un très bon exemple est qu'on a très peu de déchets de production. Mais, on en a parfois un peu. Quand on en

a trop, on les stocke là derrière. Et pour illustrer leur usage, on peut parler de notre voisin qui a un potager participatif et pas mal de gens s'y rendent. Lui, utilise nos déchets pour les mettre dans le potager. Pourquoi ? Parce qu'on a de la chaux dedans et un végétal. En agriculture, même si je ne m'y connais pas du tout, je sais qu'on met de la chaux dans les champs. Il y a donc cette possibilité de récupération des déchets. Après, il faut être réaliste aussi. S'il y a une déconstruction, il y a toute une phase de tri à mettre en œuvre. Mais c'est donc une possibilité qui est là.

Attia S. : Est-il possible que je revienne avec mes blocs pour qu'ils entrent à nouveau dans la chaîne de production ?

Beghin O. : Nous réutilisons tous nos déchets de production. Quand on produit des blocs cassés par exemple, on les rebroie et on les remet dans la production. On a donc jamais de déchets, seulement dans de rares cas. On peut donc clairement imaginer avoir un retour de matière dans des proportions certaines. En général, on ne remet pas plus de 2 à 3% de déchets dans notre mélange ; on ne peut pas aller au delà. Donc, dans une certaine mesure, ça peut être réutilisé dans le processus ou être utilisé dans des applications autres comme le potager qui sont très petites (on parle de seaux) mais très concrètes.

Attia S. : C'est important de penser à ce qui se passe après 60 ans ou 100 ans. On a un volume de cette matière. Comment peut-on le valoriser ? En tous les cas, environnementalement, ce n'est pas un matériau toxique ou qui peut avoir des effets dangereux. Mais comment peut-on le retravailler ?

Beghin O. : Les deux possibilités qu'on vient d'aborder sont là.

Attia S. : Est-ce qu'on peut facilement délier, désassembler les blocs ?

Beghin O. : Ils sont liés avec de la chaux. Mais oui, c'est un produit qu'on peut mettre dans un broyeur et on retrouve comme des petits copeaux de bois. Les blocs sont donc des copeaux de chanvre liés par de la chaux, et on peut facilement revenir à ça. C'est donc ce qu'on fait en cas de blocs cassés à l'usine. Voilà pour le processus. De quelles informations avez-vous besoin ?

Delvenne F. : Il me faudrait des informations concrètes, des chiffres : quelles quantités de chaux et de chanvre sont utilisées pour produire une certaine quantité de blocs ? Quid de la production en champs ? Combien de kilomètres lors des transports ? etc.

Beghin O. : Je peux vous donner certaines informations mais il y a un

secret de fabrication derrière ce qu'on fait. Pour l'analyse du cycle de vie dont on parle, un accord de confidentialité a été signé et l'étude se fait dans un cadre très strict. Je ne peux donc pas vous donner toutes les informations. C'est une question de propriété intellectuelle. Je peux tout de même vous donner des chiffres sur les transports et approximativement sur les quantités mais je ne peux pas aller trop dans le détail. Si on commence par le chanvre, il y a toute la phase de culture sur laquelle je n'ai pas beaucoup d'informations. Je ne sais pas ce que vous souhaitez comme informations de départ et si vous voulez aller dans le détail jusqu'à savoir le nombre d'heures d'utilisation du tracteur, la consommation en Diesel ou en huile pour les moteurs etc. ?

Delvenne F. : Ces informations je peux normalement les obtenir facilement. J'aurai plutôt besoin de données spécifiques au chanvre (distance, etc.).

Beghin O. : Pour être plus concret, nous travaillons avec plusieurs fournisseurs qui sont essentiellement belge et français, parfois hollandais. La distance entre le champs et l'unité de transformation (chanvrière) est souvent très faible. En Belgique, on peut compter en moyenne 15 à 20 km. Le transport des ballots de paille coûte très cher parce qu'il s'agit d'un volume important pour peu de matière, ce qui explique la proximité des usines. Ensuite, il y a toute la transformation. Ils utilisent uniquement de l'électricité ; ce n'est pas chauffé (pas d'autoclave etc.). Donc, c'est notamment un processus de broyage. On va récupérer ces petits copeaux coupés et hachés et les charger dans un camion qui vient jusque chez nous. La distance est alors fonction des fournisseurs. En Belgique, on aura une centaine de kilomètres et depuis la France, près de 300. Les copeaux arrivent par camion complet, soit 90 m^3 de produits ou plus ou moins 12 tonnes.

Delvenne F. : Au niveau de la chaux, de quelle quantité parle-t-on ?

Beghin O. : De nouveau, on a deux fournisseurs et on reçoit ça par camion complet. C'est donc soit de la chaux hydraulique (20 tonnes par camion) ou de la chaux aérienne (15 tonnes). On a des fournisseurs belges et français. On retrouve en général une distance de 20 kilomètres pour la chaux aérienne et de 70 kilomètres pour la chaux hydraulique, ce qui reste tout de même minime pour une industrie. Il reste l'eau : on utilise de l'eau de ville. Voilà en ce qui concerne les matières premières. Au niveau des proportions, on peut partir sur la fabrication d'un mètre cube de béton de chanvre. On en fait alors autant de blocs que désiré en fonction des épaisseurs. Pour un mètre cube de béton de chanvre, on utilise 100 kilogrammes de chanvre, 200 kilogrammes de chaux et 300 kilogrammes d'eau. Après au niveau de l'énergie, on en consomme très peu, 11 kWh/m^3 de béton de chanvre. Il

s'agit du total de la consommation de l'usine pour produire cette quantité.

Attia S. : C'est de l'énergie électrique ? Le mix belge d'électricité, nucléaire etc. ?

Beghin O. : Oui, c'est détaillé sur la facture d'Electrabel. Si vous allez sur leur site, ils expliquent tout ça très clairement. Donc, tout ça est utilisé pour la production d'un mètre cube de béton de chanvre. Après, les blocs sont mis en palettes, comme vous avez pu le voir à l'entrée. On a donc une utilisation du clark qui lui consomme du gaz. C'est donc l'autre source d'énergie. Ce sont les deux seules sources d'énergie qui sont utilisées ici. Pour vous donner l'information exacte, la quantité de gaz utilisée pour la production d'un mètre cube de béton de chanvre est de 8 grammes. Le gaz utilisé est du propane.

Attia S. : Qui vient probablement d'Algérie...

Beghin O. : Je ne saurai pas vous le dire ; il faut se renseigner chez Total. Donc, ensuite les blocs sont chargés sur camion. On a pris en compte l'utilisation et donc le transport sur le chantier. On a des chantiers qui sont dans la ville ici (Fernelmont) mais on va aussi jusque dans le Sud de la France. Maintenant ceux dans le Sud de la France sont plutôt exceptionnels. 90% de notre chiffre d'affaire est fait en Belgique. On a une répartition assez égale. On fait aussi bien des maisons à Arlon, qu'à Liège ou à Tournai, en Flandre, à Anvers et à la côte belge aussi. S'il faut partir sur un nombre de kilomètres, il faut faire une moyenne de tout ça.

Delvenne F. : C'est pour ça que je comptais plutôt partir sur le cas concret d'une maison, afin d'avoir des informations plus précises.

Beghin O. : Et bien j'en ai pas mal en tête.

Delvenne F. : Je comptais partir sur une performance passive, pour que l'ensemble des maisons sélectionnées atteigne les mêmes performances.

Beghin O. : Ok, une maison passive...

Delvenne F. : Maintenant, il faut voir si ça a déjà été fait ou pas...

Beghin O. : On en a une qui est en cours à Dinant. Je crois qu'il y a 40 à 50 kilomètres jusqu'à Dinant. Et donc il y a la mise en œuvre des produits sur le chantier par des entrepreneurs. En terme de rendement, on peut compter plus ou moins 10 mètres carrés par personne par jour.

Delvenne F. : Au niveau de la maison à Dinant, auriez-vous le nom de l'architecte, que je puisse le contacter ? Pour peut-être avoir des informations sur la maison ?

Beghin O. : Non, je ne sais pas du tout. Je suis en contact avec le propriétaire mais on le sollicite déjà assez fort, parce qu'on fait pas mal de visites chez lui. On ne peut pas tout le temps aller toquer à sa porte. Mais, je peux vous donner de nombreuses informations sur la maison. Je vais vous montrer le système constructif.

Attia S. : Une fois qu'on a un système constructif, on peut quantifier le volume et puis remplacer la chanvre avec d'autres matériaux tout en respectant le référentiel passif.

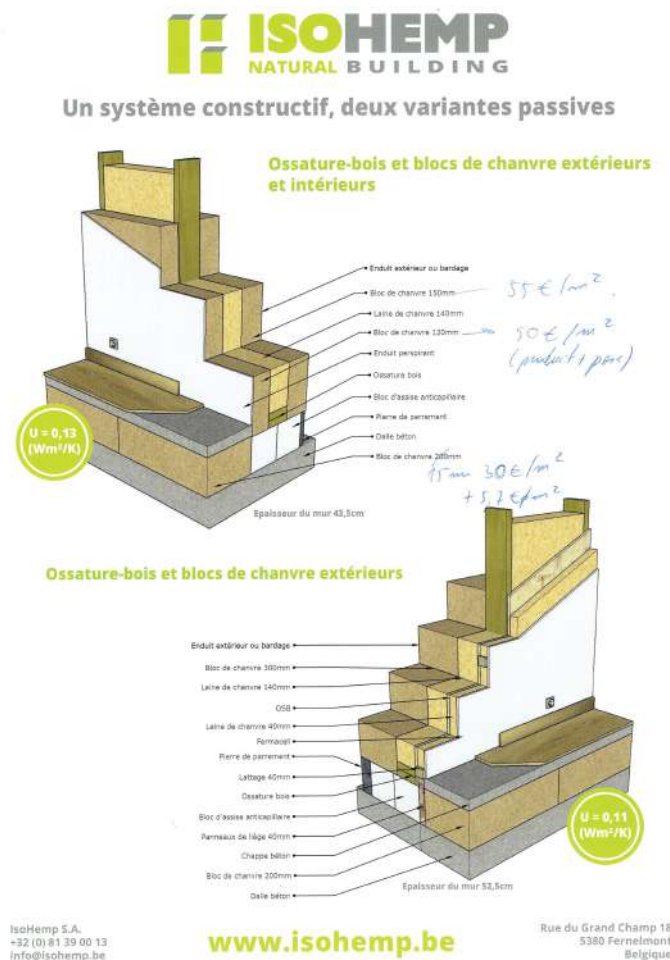


FIGURE 12.2 – Composition de parois passives Isohemp

Beghin O. : Ici, vous avez une brochure qui explique comment construire passif avec nos produits (Figure 7.2). Le système constructif qu'on observe au dessus est celui de la maison de Dinant. C'est donc une structure à ossature bois. L'ossature se répète tous les 60 centimètres. On retrouve ici une laine de chanvre. On aurait pu utiliser n'importe quel autre type de laine mais celle-ci nous permet de rester cohérent. On a posé des blocs de chanvre à l'intérieur et à l'extérieur. C'est donc un système constructif qui peut fortement varier ; on peut faire ce qu'on veut.

Shady A. : Et au niveau étanchéité ?

Beghin O. : L'étanchéité à l'air se fait par les enduits. C'est l'enduit qui va étanchéfier la maison. Il faut que ça soit bien fait mais, dans nos systèmes constructifs, on ne va pas mettre de freine-vapeur ou de pare-vapeur. Ce qu'on propose, c'est un mur qui est perspirant, étanche à l'air mais pas étanche à l'eau. Étanche à l'eau pour les pluies bien évidemment mais pas étanche pour la vapeur d'eau pour permettre des transferts hydriques entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. C'est donc vraiment une maison dynamique. C'est ce qu'on essaye de mettre en avant avec nos blocs qui ont des capacités de régulation thermique, acoustique et hydrique. Ce sont vraiment leurs trois caractéristiques. On a donc ici un U de $0.13W/m^2K$ pour une épaisseur de 43 centimètres ce qui est raisonnable pour du passif. Dans le second système, on a uniquement un bloc à l'extérieur. On arrive à une épaisseur de 50 centimètres pour atteindre un U de $0.11W/m^2K$. On peut vraiment faire ce qu'on veut. Ici, on a un bloc de 12 centimètres sur l'intérieur et de 15 centimètres sur l'extérieur mais on aurait aussi pu placer un bloc de 15 centimètres de chaque côté ou un de 12 centimètres avec un de 20 ou 30 centimètres, etc.

Shady A. : Comment est-ce qu'on peut faire passer l'électricité ?

Beghin O. : On fait passer les câbles dans les blocs directement, en rainurant le bloc.

Shady A. : Et il n'y a pas une notion de préfabrication de panneaux ? Ça veut dire que l'ossature bois est construite sur site et ensuite, on pose les blocs en complément ?

Beghin O. : Je vais vous montrer quelques photos du chantier pour être plus complet. Donc, on voit l'ossature bois là bas, tout autour, et pour passer l'hiver, le propriétaire a placé un pare-pluie parce qu'il fait une grosse partie de sa maison en autoconstruction. Donc, ça prend un certain temps, surtout que c'est une grosse maison. Pour la toiture, il a posé des laines de chanvre. Ici, au niveau des parois, il a mis un bloc de 15 centimètres

en intérieur au lieu de celui de 12 sur la fiche technique et un de 12 centimètres à l'extérieur. Donc, il fait l'inverse de ce schéma mais le résultat est le même. On voit ici comment il fonctionne. On est au rez de chaussée. Il a mis ses prises là-bas, par exemple, et donc on vient vraiment coller le bloc de chanvre sur l'ossature. Donc, on met toujours des attaches mécaniques pour tenir le mur. On les voit ici. Normalement, on en met une tous les 2 mètres carrés mais ici il y en a peut-être un peu plus. Mais, nous ce qu'on préconise, c'est une attache mécanique c'est-à-dire une sorte de feuillard en L en acier qui va juste être mis dans la maçonnerie.

Shady A. : Et j'imagine qu'au niveau du système de chauffage, ce sont des radiateurs ? Il n'y a pas de recommandation pour un chauffage par le sol ?

Beghin O. : Oui, ça marche. L'avantage de notre produit est d'apporter de l'inertie à l'intérieur du bâtiment. On a donc des murs chauds. Si on met par exemple des plaques de plâtre et des laines, on va avoir des murs qui sont beaucoup plus froids. Et donc ici, grâce à ce produit, on va garder l'inertie. Donc, le gros avantage c'est quand on chauffe, puisqu'on a une vie assez dynamique dans une maison. Si on chauffe le matin et puis qu'on part toute la journée, le bloc va garder la chaleur en son sein. Pour illustrer ça, c'est assez simple. Il n'y a pas de soleil aujourd'hui mais quand il y a du soleil sur nos blocs qui sont à l'extérieur, on voit très bien que le bloc est très chaud mais seulement sur quelques centimètres. Le reste est froid. Pourquoi ? Parce qu'il a capté énormément d'énergie sur ces quelques centimètres. Dès que le soleil sera parti, il va rayonner tout doucement et on sent encore que c'est chaud en fin de journée. C'est vraiment le même principe ici à l'intérieur.

Attia S. : Et si je veux que l'isolant à l'intérieur de l'ossature devienne du chanvre ? Vous vendez ça aussi ?

Beghin O. : C'est possible. Oui, on vend aussi le chanvre en sac et le liant, donc la chaux.

Attia S. : Donc je peux faire un mélange et le couler dedans. Ce sera une paroi totalement en chanvre, sauf l'ossature bois.

Beghin O. : Tout à fait. On a plus de réalisations de ce type en France car le mélange y est plus connu. Les artisans ont beaucoup plus de connaissances sur ce matériau. Donc, c'est une possibilité.

Attia S. : Si on fait une analyse du cycle de vie sur le cas de Dinant, ça sera même à nous de décider si on veut remplacer la laine de chanvre par du chanvre comme ça, puisqu'à la fin on veut le maximum du matériau dans la paroi.

Beghin O. : C'est tout à fait une possibilité. Ici, on a aussi utilisé des blocs de sol. Ils sont posés sur le sol, partout, comme isolation de sol. Dessus, on va venir mettre une petite chape de béton de compression. On le voit ici : c'est une chape de 5 ou 6 centimètres et dessus viendra la finition.

Delvenne F. : Et au niveau des parois extérieures ?

Beghin O. : Pour ce chantier-là, il va mettre un bloc de 12 centimètres à l'extérieur, monté contre l'ossature bois et il va y avoir un enduit de finition sur une partie et un bardage bois sur l'autre. C'est un enduit de finition à base de chaux, qui est un crépi en fait.

Attia S. : Et au niveau du bardage bois, comment le fixe-t-on ?

Beghin O. : Directement dans le bloc. C'est le seul isolant sur le marché sur lequel on peut directement fixer tout le bardage bois dans l'isolant avec des vis. Donc ici, tous les murs ont été faits en blocs de chanvre, les cloisons aussi. On attache facilement les radiateurs dedans, sans aucun soucis. Un bardage est beaucoup plus léger qu'un radiateur donc on peut fixer directement le bardage bois dans le bloc. C'est un des gros avantages. On ne doit pas revenir chercher la structure portante. C'est pour ça que c'est très intéressant dans plein d'applications. On évite tous les ponts thermiques ; on fixe juste dedans.

Attia S. : Il n'y a pas de problème avec le feu ?

Beghin O. : Non, c'est un isolant. On a un classement B0 je crois et donc on est très bon.

Attia S. : Et au niveau hauteur ? Quelle sera la hauteur maximum ?

Beghin O. : Ça dépend des épaisseurs... (Figure 7.3) Je vais vous donner ça. Donc ici, on a les caractéristiques techniques de nos blocs, avec la résistance au feu, l'indice d'affaiblissement acoustique, le déphasage, la résistance thermique, la densité etc. Sinon en hauteur, on a 6, 8 10 et 12 mètres. Et si on veut aller plus haut, on a juste besoin de faire une accroche métallique. Donc, on met une cornière et on peut monter plus haut.

Attia S. : Au niveau de la toiture, est-ce que vous avez des propositions ?

Beghin O. : Non, pas avec nos produits. On travaille des cloisons au sol, mais pas la toiture.

Epaisseur [mm]	120	155	200	300
Dimensions [mm]	600 X 300	600 X 300	600 X 300	600 X 200
Blocs par m² [-]	5,55	5,55	5,55	8,33
Densité [kg/m³]	360	360	360	360
Résistance thermique [m²K/W]	1,6	2	2,6	4
Déphasage [h] (ISO 13786)	6,25	9,33	12,5	18,75
Indice d'affaiblissement acoustique Rw [dB]	37	39	42	45
Coefficient d'absorption acoustique α [-]	0,8	0,8	0,8	0,8
Réaction au feu (NF EN 13501-1)	d0 - M1	d0 - M1	d0 - M1	d0 - M1

d0 : petites gouttes et débris enflammés
M1 : incombustible à petite flamme

height 5 8 10 12

FIGURE 12.3 – Caractéristiques techniques des bloc de béton de chanvre

Attia S. : Et qu'est-ce que vous recommandez si on suit ce cas de Dinant ? Je suppose qu'on continue avec une structure en bois et de la fibre de bois ?

Beghin O. : De la fibre de chanvre. C'est en fait de la laine de chanvre et, au-dessus, une toiture traditionnelle. Mais ici, ce sont des caissons qui font 40 centimètres d'épaisseur dans lesquels on est venu mettre de la laine de chanvre en rouleau. Ce sont des panneaux, la même chose que dans la cloison mais en différentes épaisseurs. Donc, pour la toiture, je sais qu'on peut trouver sur Internet des gens qui le font avec du béton de chanvre mais ce n'est pas vraiment intéressant. Je vous le dit très clairement, il y a bien d'autres isolants qui sont bien plus intéressants et moins chers.

Delvenne F. : Au niveau des coûts, à combien arrive-t-on ? Et pour la pose ?

Beghin O. : Pour des blocs de 12 centimètres posés, main d'œuvre comprise, on est environ à 50 euros du mètre carré. Donc, pour le produit et la pose. Pour des blocs de 15 centimètres, on est à 55 euros du mètre carré.

Delvenne F. : Et au niveau du sol ?

Beghin O. : Au niveau du sol, ça dépend. Pour ce chantier-là, ce ne sont pas des 20 centimètres mais des 15. Là, c'est le prix produit. Ils ne sont pas collés. On prend juste le bloc, on le dépose par terre, on pousse bien contre et c'est terminé. Donc, le prix produit pour du 15 centimètres est le prix public, hors TVA. Après, les entrepreneurs ont des ristournes là-dessus. Dans notre listing de prix, on est à 30 euros du mètre carré et pour la pose on peut compter 5 à 7 euros du mètre carré, puisque c'est juste prendre le

bloc et le déposer. C'est très rapide et facile.

Attia S. : Au niveau de la vente de ce produit, les gens sont-ils plus intéressés par l'aspect environnemental ou par le coût ?

Beghin O. : On a une partie de notre clientèle qui est centrée sur l'aspect environnemental, écologiste. Je dirai plus ou moins la moitié et l'autre moitié, c'est pour l'aspect technique. Tous les aspects techniques du produits, cela comprend le fait d'apporter de l'inertie dans le bâtiment, la régulation hygrothermique et le fait que ça soit un produit facile à mettre en œuvre.

Attia S. : Pour le moment, c'est un logement quatre façades. Y a-t-il des possibilités pour des projets où l'on peut vraiment monter dans les étages ?

Beghin O. : C'est tout à fait possible. Pour le moment, dans notre communication, on s'axe très fort vers le résidentiel, c'est-à-dire la maison quatre façades ou trois, peu importe. Après, techniquement, c'est tout à fait possible. On a fait une réalisation à Bruxelles, l'enveloppe d'un immeuble, même si c'était juste le rez au final. Donc là, ce sont des structures en béton, poteaux-poutres ou plots de béton dans lesquels on fait l'enveloppe. Donc, techniquement, c'est tout à fait possible. C'est une question de communication, et nous préférons nous axer sur les particuliers.

Attia S. : Pour le coût, est-ce qu'il y a d'autres paramètres importants qu'on devrait prendre en compte ?

Beghin O. : Il y a les enduits de finition, c'est à peu près la même chose que ce qui existe sur le marché. On enduit sur le bloc ou sur autre chose, c'est exactement pareil.

Attia S. : J'ai une question par rapport au label. Si demain, l'Union Européenne force les pays membres à faire un label, pas seulement sur une limite de kilowattheures de consommation d'énergie mais aussi sur une limite de dioxyde de carbone par kilogramme de matériau, est-ce que ça peut vous aider ?

Beghin O. : Oui, clairement.

Attia S. : Avez-vous des chiffres ? A peu près combien de dioxyde de carbone rejeté par kilogramme de matériau ? Et, à côté de ça, avez-vous cherché des labels ?

Beghin O. : Dans les labels qui sont intéressants pour nous, il y a le label Nature Plus, un label allemand. Aujourd'hui, on ne l'a pas fait, parce

que ça coûte cher et ça n'a pas vraiment de valeur commerciale pour nous, dans notre marché. Si on obtient ce label, on n'aura pas un client de plus. C'est bien sur le papier mais ça coûte des dizaines de milliers d'euros. Aujourd'hui, les gros groupes qui proposent des produits écolo le font parce que, pour eux, ce n'est pas grand chose. On le fera un jour, je le sais très bien. L'autre label qu'on va faire, c'est le Cradle to Cradle. J'ai des contacts avec des gens qui font ça. C'est beaucoup moins cher qu'avant ; les prix ont vraiment diminué. C'est quelques milliers d'euros. Et donc, ce sont les deux labels qui existent et sont probants pour nous.

Attia S. : Et pourquoi le Cradle to Cradle par exemple ? Vous croyez que ça ajoute de la valeur à votre produit ? Notre atelier est basé sur ça, pour le choix fait par l'étudiant. Mais c'est une théorie. Est-ce que dans le marché réel il y a des gens qui le cherchent ?

Beghin O. : Oui, il y a de plus en plus de gens qui savent ce que c'est. Mais il n'y en a pas encore beaucoup. Mais je pense que c'est un axe de communication intéressant.

Attia S. : Et dernière chose par rapport aux labels... Maintenant, on demande à tous les producteurs européens d'avoir un EPD sur leur produits. Vous êtes en train de le faire ?

Beghin O. : Nous pas.

Attia S. : Mais avec l'analyse du cycle de vie, vous devriez pouvoir facilement créer ce certificat ?

Beghin O. : C'est mon collègue qui s'occupe de ça. Je ne sais pas exactement. Mais je sais qu'on ne le fait pas encore. Aujourd'hui, on s'axe beaucoup sur les agrémentations techniques des produits. L'ATG nous coûte déjà très cher. Donc, on s'axe là-dessus, sur le côté vraiment technique. Et ce genre de label... On se dirigera vers ça mais dans un an ou deux je pense.

Attia S. : Et en kilogramme de dioxyde de carbone, c'est plus ou moins... ?

Beghin O. : Toute l'analyse du cycle de vie montre qu'on a un impact sur l'environnement positif. Donc, on capte plus de dioxyde de carbone dans toute la chaîne que ce qu'on émet.

Attia S. : C'est important. Vous vendez ça comment ? Moi, je ne recherche pas la partie technique. Si vous parlez avec quelqu'un d'écolo qui vous dit : « Monsieur, je veux construire une maison entièrement en bois

ou je prends votre produit... » Je suis certain que vous devez avoir une approche comparative. Vous allez vous concentrer sur quoi au point de vue environnemental, si on oublie le coût ou la technique ? Vous dites que vous avez un impact positif ?

Beghin O. : Ça on le dit, qu'on a un impact positif. Mais ça n'impacte pas beaucoup les gens. Au niveau commercial pour être honnête, un peu. Mais, si on doit regarder un arbre de décision d'intérêt pour le produit, cela représente 1 à 2% réellement. Le prix, les techniques, le côté produit naturel, ça va aider par rapport à d'autres produits, comme les produits pétrochimiques. L'aspect local aide également. Mais après, leur parler d'un cinquième élément qui serait une analyse du cycle de vie positif, honnêtement c'est 1 à 2% de notre clientèle. C'est bien, c'est quelque chose en plus, mais ce n'est pas un élément transcendant. Après, ce sera important parce que, comme les normes européennes évoluent, nous on a un positionnement qui est vraiment intéressant par rapport à ça.

Attia S. : Donc, je crois que pour l'analyse comparative, on va prendre la même maison et comparer les quatre matériaux. Mais on va peut être limiter l'étude au niveau des parois, comme ça on sera très ciblé. Pas besoin d'aller vers la toiture puisqu'on cherche à avoir le maximum de points communs dans toutes les constructions. C'est intéressant de comparer les parois d'un même logement avec différentes alternatives. On voit le volume des matériaux et toutes les conséquences environnementales autour de ça mais aussi les caractéristiques techniques.

Attia S. : Voilà, on ne vous prend pas plus de temps. Merci beaucoup !

12.11 Interview 2 - Représentants de l'entreprise PailleTech

Cette interview est réalisée le vendredi 13 novembre 2015, au sein de l'entreprise PailleTech. Sont présents Monsieur SMEESTERS Eric (directeur exécutif), Monsieur LEFRANCQ Julien (directeur commercial), Monsieur BONNERT Antoine (architecte) et moi-même.

Delvenne F. : Je suis ici dans le cadre de mon mémoire que je réalise à l'Université de Liège. Le but est donc de travailler sur des constructions écologiques et de les comparer avec une construction plus traditionnelle en Belgique, c'est-à-dire une maison en briques. Cette comparaison se fait donc au niveau de l'analyse du cycle de vie et de l'analyse des coûts du cycle de vie. J'ai un laps de temps limité. Le but n'est pas d'obtenir des chiffres très précis, juste d'avoir une idée et de montrer qu'on peut construire autrement. Je me limite au secteur résidentiel parce que c'est là, selon moi, que les gens ont le plus de peurs, que ce soit au niveau du choix de ce genre de matériaux ou au niveau des coûts. Ils n'osent pas toujours, donc cela peut s'avérer intéressant de montrer ce qui peut être fait. Donc, parmi les constructions que j'ai choisies, on retrouve la construction en paille. Si je vous ai contacté, c'est parce que je voulais des entreprises belges et locales. Et donc, pour réaliser une analyse du cycle de vie, il me faut un minimum d'informations, mais j'aurai également aimé en récolter sur tout ce qui concerne la technique du produit, la mise en œuvre, la durabilité, etc. Je ne sais pas si vous avez éventuellement des informations sur ce qui a déjà été construit et les performances obtenues... Je suis à la recherche d'une maison passive. Mon but est d'avoir des maisons ayant toutes les mêmes performances pour que je puisse les comparer uniquement au niveau environnemental et économique, en ayant les mêmes performances. Donc, je cherche une maison passive de référence dans laquelle je pourrais changer les compositions de parois et donc garder le même plan de base. Le but est donc de changer toutes les parois, en assurant les mêmes performances et en conservant la même base de plan, comme ça des informations telles que les consommations etc. restent constantes.

Smeesters E. : Maintenant, je pense que si vous abordez la question au niveau strictement ingénierie, avec un logiciel de calcul, des parois spécifiques etc., vous allez vite être limitée dans l'analyse de la problématique. Il faut sortir de la problématique type ingénieur et aller dans les sphères plus larges parce que les chiffres ne correspondent pas à la réalité. Donc, Arnaud Evrard, que vous connaissez peut-être et qui est chercheur à l'Université Catholique de Louvain, vient de faire un doctorat et de lancer une recherche qui s'appelle « Apropaille » dont les conclusions vont être publiées dans

quelques semaines. Lui est confronté à une discordance entre les modèles et la réalité. Ce qui prouve donc bien que les modèles ne sont pas au point. Il y a donc des choses qu'on ne comprend pas et que la science aujourd'hui n'est pas capable d'expliquer. On pourrait dire que soit ça sort de son champs, soit il y a des températures, que je dirais de confort, qu'on va attribuer à 19 degrés avec certains matériaux et, bizarrement, avec d'autres matériaux, on tolérera un 18 sans problème. Pourtant, le thermomètre mesure bien un degré de différence. Donc, il y a des choses étranges qu'on est pas encore capable d'expliquer. Mais quand on a les retours d'expérience de personnes qui vivent ou travaillent dans des bâtiments en paille, et je parle de la paille parce que c'est ce que je connais, je ne peux pas parler des autres matériaux bien entendu, on a des choses qui ne correspondent pas du tout à la théorie. Donc, quand on encode ça dans des logiciels, en amont, sur base des plans et sur base de modèles établis par la physique du bâtiment, on obtient certains résultats. Après, quand on voit ce qui est réellement consommé comme énergie sur les deux ou trois dernières années, on se rend compte qu'on est parfois à la moitié de ce qui était prévu. Donc, qu'est ce qui se passe ?

Delvenne F. : Le but est vraiment d'avoir une base qui est plus ou moins commune afin d'avoir quelque chose de comparable.

Smeesters E. : C'est à ça que je voulais venir. Le problème c'est que dans les analyses de cycle de vie, il y a énormément d'hypothèses. Par exemple, considérer la paille comme un déchet, la considérer comme un produit secondaire ou la considérer comme une matière première, ce n'est pas la même chose. Idem pour le bois. Donc, ce sont des hypothèses qui changent absolument tout le calcul. Et le diable est dans ces hypothèses ! C'est là que ça se joue. Mais il y a des influences et pas mal de politiques qui essayent de pousser un matériau plutôt qu'un autre avec des arguments qui sont facilement réversibles. Donc, si vous ne prenez pas toute cette complexité en jeu, personnellement, je peux déjà vous dire quelles seront les conclusions de votre étude. Donc, il faut faire attention, ce ne sont pas simplement des parois, des lambda et des épaisseurs que vous entrez dans un logiciel et votre mémoire est terminée. Donc, si vous acceptez de vous coltiner toutes les questions qu'il y a derrière, alors cela peut devenir intéressant parce qu'il y a beaucoup à parler. Par exemple, dans les références dans les tableaux internationaux sur les énergies grises des matériaux, les chiffres peuvent varier d'un facteur de 1 à 5 suivant les bases de données : suédoise, suisse, française ou allemande. C'est donc qu'il y a quelque chose qui n'est pas au point. Donc je trouve que le mémoire sera intéressant si vous acceptez quelque part dans le travail de travailler cette complexité là plutôt que de dire « Oui, bon, je ne sais pas faire autrement, je suis obligée de faire comme tout le monde et de me baser sur des hypothèses internationales. » Parce que nous, et je dis nous en tant que constructeurs en matériaux naturels et singulièrement avec

de la paille, de la terre et du bois, nous sommes défavorisés dans le sens où :

- Soit on se met à tricher comme les autres et à mettre dans les hypothèses des choses qui sont favorables et qui au final vont donner des valeurs très intéressantes à nos bâtiments qui correspondront alors beaucoup plus à la réalité vécue et au retour d'expérience des habitants - mais la méthode est très facilement contestable ;
- Soit on est un petit peu rigoureux sur la méthode et on joue le jeu, pour arriver au final à des résultats qui sont inférieurs à d'autres matériaux - ce qui visiblement ne correspond pas à la réalité.

Delvenne F. : Je vois la complexité. Mais c'était ça aussi le but, c'est-à-dire travailler cette analyse là de manière poussée et, pour tout ce qui est un peu plus général, reprendre simplement les informations dans des bases de données. Donc, c'est vraiment au niveau des quatre matériaux que j'ai choisi que je compte faire une analyse poussée.

Smeesters E. : Maintenant, pour ce qui est des données des différents matériaux qu'on utilise, on peut vous les donner. Ne fut ce que sur la partie pro et dans le vademecum qu'on publie sur le site internet, vous avez quasiment tout ce qu'il vous faut : les plans, les dimensions, les composants, les fiches techniques. Donc, avec tout ça, vous pouvez travailler. Après, si vous voulez vous centrer sur une maison en particulier, il y en a une qu'on va démarrer début janvier, qui sera construite avant la fin de votre mémoire et qui, en plus, est réalisée avec un bureau d'architecture qui est très intéressant et qui est à Bruxelles. Vous pouvez vous centrer par exemple sur ce bâtiment là et partir d'un cas réel plutôt que d'un cas théorique. C'est donc un bâtiment qu'on essaye d'optimiser et qui est à Gentinnes, du côté de Chastre.

Delvenne F. : Pourquoi pas. Mais c'était mon idée de base, trouver pour chacun des matériaux que je veux étudier, un cas réel et étudier ce cas. Maintenant, je me suis rendue compte que c'était plus compliqué que je ne pensais d'obtenir des informations. C'est pour ça que je suis partie à présent sur l'idée d'un plan unique.

Smeesters E. : Nous, il n'y a pas de problèmes. On peut vous le donner...

Delvenne F. : Je trouve justement plus intéressant d'avoir ce cas là.

Smeesters E. : En plus, ce cas là, et c'est pour cette raison que j'y pense directement, est un cas qui a longuement été étudié pour essayer au maximum de bénéficier de tous les avantages du système constructif qui a été mis au point ici. Donc, on risque d'avoir de très bons résultats. Alors, nous avons en théorie la capacité de construire un bâtiment passif parce que

les parois le permettent et que l'étanchéité à l'air est gérée. En pratique, on n'a pas de bâtiment qui a été identifié comme passif. Pourquoi ? Parce que finalement, on n'a pas la maîtrise de l'entièreté du processus et, fondamentalement, même si on agit comme entrepreneur général, on n'est pas un entrepreneur général mais plutôt un constructeur de gros œuvre. Et donc, par exemple, typiquement sur les dernières maisons qu'on a construites, ce n'est pas nous qui avons placé les velux, qui avons fait la troisième paroi, qui avons fait les sols, qui avons fait les impétrants et géré toute l'étanchéité qui leur est liée. Donc, quand le test Blower Door est fait, on n'a pas les bonnes valeurs. Mais ce n'est pas à cause de PailleTech. On en a une où le résultat est 1 et pour une autre 2.25. Ce n'est pas du tout la catastrophe mais on n'a pas de passif. Je pense qu'à Gentinnes, on pourrait y arriver. Parce que là, pour la première fois, tout a vraiment été bien pensé depuis le début et on va vraiment maîtriser toute la chaîne. Il est donc probable qu'on atteigne cette fois-ci une très bonne performance. Au niveau de l'étanchéité par contre, le critère passif ne sera pas atteint parce qu'ils vont mettre du double vitrage. Enfin, elle ne pourrait pas avoir le label passif parce qu'elle n'est pas conçue pour faire du passif. Mais après, l'un dans l'autre, si on sait maîtriser l'étanchéité à l'air, il suffit de changer les châssis.

Delvenne F. : Mais le but n'est pas d'avoir la certification passive mais d'avoir quelque chose qui s'en approche.

Smeesters E. : Les bâtiments qu'on construit sont plutôt très basse énergie et, quand on voit l'énergie réellement consommées, on est en passif finalement. Quand on voit, sur l'année, les stères de bois et les mètres cubes de gaz - on pourrait faire le test et demander les factures des clients ces trois dernières années - je suis persuadé que, pour toutes une série de bâtiments, on est en dessous des 15 kilowattheures par mètre carré par an. Par contre, sur logiciel, ce n'est pas le cas. Il y a des clients qui viennent parce qu'ils ne veulent pas du passif ; ils ont l'impression de devoir vivre dans un thermos. Ils aiment aussi se chauffer tout bêtement. Ils veulent se chauffer, ils veulent du bois. Donc, la maison passive ne les intéresse pas.

Delvenne F. : C'est plutôt dans le sens où je voudrai une construction durable que je souhaitais remplir les normes passives. C'est une discussion que j'ai eu avec mon promoteur aussi. Il penchait plus pour quelque chose d'assez strict alors que moi pas.

Smeesters E. : Quand on chiffre, ça rassure. Une fois qu'on peut mettre des chiffres sur les choses, il y a quelque chose d'incontestable. Mais en fait, les chiffres cachent une réalité et les chiffres ne sont pas toujours conformes à la réalité parce qu'il y a trop d'hypothèses. Autour de ces questions-là, nous on constate que les modèles liés à la physique du bâtiment ne sont

finalement pas adaptés à ces matériaux. Donc, il faudra encore un paquet d'années et beaucoup de travail de sensibilisation. Et finalement, dans un modèle comme le PHPP ou la PEB - je ne me rappelle plus lequel - on ne trouve même pas la paille. On est obligé de créer un matériaux qui n'existe pas. Or, la paille a quand même, même si ce n'est pas juste, un λ de 0.06. On pourrait discuter de cette valeur mais partons là-dessus. Il y a d'autres particularités de la paille qui ne sont juste pas dans le modèle. Donc, je ne sais pas trop ce que vous voulez, si vous voulez qu'on vous mette en contact avec le bureau Karbon qui dessine et conçoit cette maison et dont le permis est en cours. Il sera accordé pour le 15 janvier et nous, nous démarrerons la production tout de suite à ce moment là. Donc, entre le 15 janvier et le 1er février, on démarre la production, c'est-à-dire la construction ici. Pour l'instant, on n'est pas en phase de production. Nos ouvriers sont sur des chantiers de rénovation parce qu'on a un trou de production. Il y a une série de commandes qui vont arriver dans les semaines qui viennent et donc ça n'est pas encore redémarré. Voilà, ça pourrait être ça, mais à ce moment-là, c'est plutôt avec eux que vous allez travailler.

Delvenne F. : Oui, mais les informations sur les matériaux, c'est quand même peut-être plus avec vous.

Smeesters E. : Oui, mais je peux vous donner un lien internet.

Delvenne F. : Parce que ce que j'ai besoin de savoir pour mon analyse du cycle de vie, c'est ce qui se passe à partir de la paille dans les champs, quels transports ont lieu, etc. Je suppose que vous n'affichez pas ça en détail sur internet.

Smeesters E. : Non, mais par contre, à ce moment-là, on peut vous dire qui est le fournisseur de paille. Vous pouvez alors téléphoner à ce fournisseur en demandant à quelle distance il habite de ses champs. Et vous faites vos calculs à partir de la réalité. Là, on est en train de préparer une carte de nos fournisseurs principaux. D'où vient la paille ? D'où vient le bois ? D'où vient la terre ? Mais aussi d'où viennent nos clous ? Où habitent nos travailleurs ? Enfin voilà, toutes ces questions là et vous pouvez revenir régulièrement et nous poser toutes vos questions, on vous répondra. Nous, la seule chose qu'on cache pour l'instant, ce sont les machines qui ont été inventées ici pour fabriquer les murs. Les machines de l'atelier ont été mises au point sur plusieurs années. Il n'y a pas de brevet dessus. On les cache parce qu'elles sont finalement relativement simples et il a fallu cinq ans pour les mettre au point. En fait, quand on voit le résultat, on se dit qu'on aurait du y penser plus tôt. Elles sont très facilement duplicables. Donc, aujourd'hui, on les cache. On ne fera peut-être pas toujours ça. Moi, je suis partisan de promouvoir une licence créative quand même sur ces machines, mais c'est un tel changement

de paradigme dans l'entreprise qu'il va falloir un certain temps pour que ça passe et pour que j'arrive à convaincre l'équipe que c'est dans l'intérêt de l'entreprise de publier les plans des machines. Pour le reste, hormis les plans des machines et la technique de fabrication, en termes d'analyse du cycle de vie, qu'est ce qu'il vous faut savoir ? Il faut savoir qu'il y a trois machines électriques et qu'il y a trois ouvriers. En terme de consommation d'énergie, ce n'est pas vraiment grand chose. Il y a un pont leveur. Ça, vous savez évaluer la consommation d'électricité. Je peux même vous donner les factures d'électricité si vous le voulez. Je vous fais une copie du dernier relevé et vous voyez ce qui est consommé sur un an. Vous connaissez le nombre de maisons construites sur un an, vous divisez et vous avez le nombre de kilowattheures utilisés pour fabriquer une maison PailleTech de x mètres carrés. Puis, vous faites tous vos calculs. Ce n'est pas très compliqué. Ces données, on peut vous les donner au fur et à mesure. Vous devez à ce moment-là m'envoyer des demandes très très précises, mais des demandes, je vais être honnête, qui ne me demandent pas de travail. Donc, vous n'allez pas me dire donnez-moi le nombre de kilowattheures par maison par mètre carré, non. Je vous donne l'électricité, je vous dis qu'on construit à peu près autant de maisons par an et maintenant débrouillez-vous. C'est comme ça que ça va se passer. Comme ça, c'est du gagnant gagnant, puisque vous, on vous donne accès aux données et nous, on aura accès, grâce à votre mémoire, à un calcul qui vaudra ce qu'il vaudra, on verra. Mais un calcul qui aura au moins le mérite d'exister. Alors, je pense qu'il y a l'analyse du cycle de vie et puis il y a la question du poids de dioxyde de carbone. Je pense que ce serait intéressant que chaque bâtiment soit quelque part ramené à un nombre de tonnes équivalent de dioxyde de carbone. Tel bâtiment, il a fallu autant de tonnes pour le construire, il en faudra autant sur mettons 50 ans pour l'utiliser puis après pour le détruire. Ce qu'il y a aussi, c'est que l'avantage des bâtiments en matériaux naturels est que, lorsqu'on les détruit, on n'est pas obligé de les composter. On peut bien sur les composter mais on peut aussi les réutiliser. Parce que l'avantage d'un matériau non transformé, c'est que c'est un matériau réutilisable. Au contraire, un metal stud, quand vous le déplissez, c'est bon pour la quincaillerie. On le réutilise peut-être dans des métaux recyclés. Mais vous ne savez rien faire avec un metal stud. Par contre, une vieille poutre en bois, vous la démontez, vous la poncez un petit coup et vous la réutilisez. C'est ça, l'avantage du bois. La paille, c'est la même chose. La paille peut servir alors pour épandre sur un potager, pour faire du compost, ... le ballot est intact. On peut le retirer 200 ans plus tard, il n'a pas bougé. On peut le remettre dans un autre bâtiment. Donc, c'est à ce niveau-là que ça se joue aussi sur une analyse du cycle de vie, au niveau de ce qui peut être considéré un déchet dans le cadre des matériaux naturels et surtout s'ils ne sont pas transformés. Car, il y a les matériaux naturels transformés et les matériaux naturels non transformés. Le matériau brut, naturel, a plus de valeur en terme de recyclage et de réutilisation que quelque chose qui a

été transformé. Un béton de chanvre, par exemple, ce n'est plus du chanvre. Par contre, un bloc de terre crue, c'est autre chose.

Delvenne F. : De toute façon, à la base, mon idée était de faire quelque chose de semblable aux fiches EPD et de me centrer principalement sur ces deux points-ci, c'est-à-dire le dioxyde de carbone et l'énergie grise. Le reste, comme l'eutrophisation par exemple, ça resterait beaucoup plus anecdotique.

Smeesters E. : Mais quand je dis parler du poids du dioxyde de carbone, c'est à un moment dire : ce bâtiment-là, à cet endroit-là, avec cette entreprise-là, avec tels et tels fournisseurs, pour être construit, a nécessité x tonnes de dioxyde de carbone ou, à l'inverse, dans notre cas, on a la chance d'avoir des matériaux négatifs en dioxyde de carbone. On n'a jamais fait l'exercice mais ce serait intéressant de dire finalement quel est le poids d'une maison passive PailleTech ? Dans la maison de Gentinnes, si on fait vraiment la somme de tout en positif et en négatif, au fond à quel poids de dioxyde de carbone arrive-t-on ? Ce serait vraiment intéressant de faire l'exercice et là, on intègre tout dedans.

Delvenne F. : C'est ça le but, au final.

Smeesters E. : Mais donc, vous devriez aller voir les coupes, les fiches techniques, et puis au fur et à mesure, nous demander les informations qui vous manquent. Par exemple, le nombre de kilowattheures utilisés pour cet atelier en un an, le nombre de travailleurs, le nombre de voitures, etc. Je ne sais pas si vous intégrez les trajets domicile-lieu de travail ?

Delvenne F. : Disons qu'on en est encore qu'au tout début. Donc, ce n'est pas quelque chose que j'ai approfondi pour l'instant.

Smeesters E. : Ce qui est un peu embêtant, c'est que, dans une petite coopérative comme ça, locale, vous allez avoir des données locales et immédiates. Après, vous allez comparer ça à de l'industrie multinationale, et donc là vous baser sur des données internationales qui sont travaillées et qui sont trafiquées, trafiquées au sens qu'elles sont contestables. Elles sont contestables car elles sont à leur avantage et car on manipule les chiffres un peu comme on veut puisque les gens ne sont pas d'accord entre eux... Donc oui, on ne tient pas compte de cette hypothèse. Derbigum, par exemple, se prétend Cradle to Cradle. Ils ont le label, ils ont la filière de récupération etc. Je crois que la paille est Cradle to Cradle depuis la nuit des temps. Ce n'est pas nécessaire de sortir des tableaux et des chiffres. Il faut donc faire attention à ne pas comparer des pommes et des poires.

Delvenne F. : De toute façon, le but était quand même de rester dans quelque chose de local, en Belgique, voir même plutôt en Wallonie, et de ne pas arriver à de grandes entreprises.

Smeesters E. : Mais donc, moi, je vous renverrai vers Karbon. C'est à Bruxelles malheureusement. Vous allez les voir de notre part et ils vous donneront les plans.

Delvenne F. : D'accord. Mais à ce stade, je ne sais pas encore exactement ce qu'il me faut parce qu'en même temps, j'ai encore cours. Mon mémoire se fait principalement au deuxième quadrimestre. Disons qu'ici j'essaye de récolter un maximum d'informations et de voir si les entreprises sont prêtes à donner ces informations aussi. Donc, je ne sais pas encore de manière précise pour l'instant ce que je vais réellement inclure dans mon analyse.

Smeesters E. : Là, vous avez un cas concret de 154 mètres carrés - c'est la surface extérieure mur compris. La surface habitable est un peu en dessous des 136 mètres carrés avec trois chambres, quatre façades, à Chastre, dans un très beau terrain d'ailleurs.

Delvenne F. : Non mais je pense que c'est une bonne chose de partir de cette base là et d'étudier en profondeur ce cas.

Smeesters E. : Et là, vous avez vraiment un cas concret et en plus, ce qui est intéressant, c'est que vous allez suivre l'entièreté du processus. On a signé pour l'instant pour l'étude et la construction du dossier d'exécution qui est d'ailleurs en cours pour l'instant, avec étude de stabilité d'ingénieurs, dessin 3D en bureau d'étude, plans d'exécution, visites sur place, vérification de l'accès pour la grue. Ils vont également vérifier que 5 jours sont tout à fait suffisants pour monter le bâtiment. En priorité, on a besoin de quatre ou de cinq jours sauf quand il y a des problèmes d'accès, soit pour les camions, soit pour la grue. Tout ça va donc être en cours en parallèle de votre mémoire. Donc, vous pouvez suivre, prendre des photos de terrain maintenant, et ça sera terminé pour le mois de juin.

Delvenne F. : Mon mémoire sera rendu un peu avant.

Smeesters E. : Oui, mais les plans, les dimensions etc. vous les aurez. Je pense qu'un vademecum est accessible sur la page pro de notre site internet. Et après, vous revenez vers nous pour des demandes plus précises, soit en repassant ici, soit par email, on verra ce qu'on peut faire. Mais on n'est pas toujours disponible. Il faudra qu'on trouve des arrangements parce que je ne veux pas passer des heures là-dessus. Ça m'intéresse, donc on vous

donne accès aux données mais on ne pourra pas faire plus.

Delvenne F. : Je vous remercie. C'est déjà très bien. A ce niveau-là, c'est à peu près tout ce que j'avais à vous demander aujourd'hui. Vous êtes très ouvert d'esprit.

Smeesters E. : Mais je vous ai dit qu'il y a des choses qu'on ne dévoilera pas. Maintenant, c'est toujours plus délicat dans une industrie par exemple. Ils ne donnent pas leur recette exacte et sans ça, vous ne savez pas faire votre étude. Ici, notre pourcentage de paille est assez clair. Par exemple, ici, il y a une recherche en cours. Les chercheurs avaient des conventions de confidentialité. On avait aussi une convention de plusieurs centaines de milliers d'euros. Donc, on a lâché un peu de lest et ils sont venus mesurer, voir toute la production, combien d'électricité on consommait, combien de machines, ce genre de choses... Mais on ne peut pas se permettre de faire ça, ou alors dans un cadre très législatif, avec des juristes qui établissent des papiers pour nous protéger etc. Par exemple, dans le cas du bois, je ne connais pas bien les détails, mais je pense qu'on est obligé de considérer un nombre de kilomètres carrés d'exploitation. Or, ça n'a quelque part pas de sens puisque tout arbre utilisé correspond à un arbre coupé dès lors qu'il est bien géré. Et donc c'est une ressource renouvelable très facilement et d'ailleurs gérée comme telle car c'est tellement lucratif que les producteurs de bois ont tout à fait intérêt à replanter. Ils n'ont aucun intérêt à couper à blanc. Or, dans les analyses du cycle de vie, il n'en est pas tenu compte. Ce n'est pas dans les calculs, on ne tient pas compte de cette spécificité du bois. On prend le nombre d'hectares de forêt en compte dans le calcul. Mais ça fausse tout forcément, parce que ce n'est pas une surface de production quelque part.

Delvenne F. : Oui, je travaillerai avec une personne qui travaille essentiellement là-dessus, dans le département de chimie. Comme elle a beaucoup plus de connaissances à ce niveau-là, c'est intéressant de réfléchir à ça avec elle et de voir un petit peu comment on peut gérer ça.

Smeesters E. : Maintenant, si vous avez envie, ça vaudrait peut-être la peine d'aller rencontrer Arnaud Evrard à l'Université Catholique de Louvain pour qu'il vous donne les conclusions de son étude. Il a fait un travail intéressant et en même temps, il n'a pas osé aller jusqu'au bout de certaines conclusions entre autres à cause des modèles qu'il a utilisés. Pour l'analyse du cycle de vie, ce n'est pas Arnaud mais plutôt l'ICEDD, même si c'est lui qui la coordonne. C'est peut-être mieux d'aller directement chez Benjamin Biot... Arnaud chapeaute et est très accessible et ouvert d'esprit. A mon avis, il sera très content de partager sa recherche. Benjamin Biot risque d'être plus difficilement joignable. Je vous donne leurs coordonnées ?

Delvenne F. : Si vous avez, je veux bien oui.

Smeesters E. : Je vais chercher les infos.

Smeesters E. : Florence fait un mémoire sur la question des analyses du cycle de vie. Elle voudrait partir d'un cas concret et je lui ai proposé de prendre la cas de Gentinnes puisque ça correspond plus ou moins à la durée du mémoire. Elle va contacter Karbon. Comme ça, elle part des plans de Karbon et de nos fiches techniques et s'il y a deux ou trois questions à poser en plus, on est là.

Bonnert A. : Maintenant, dans les travaux qui ont été faits sur les analyses du cycle de vie, il y a beaucoup de travail à faire sur le fond réellement des analyses du cycle de vie. Ça veut dire que d'une façon, ça n'est pas encore réellement normalisé. Les seuls accords plus ou moins internationaux qui ont été mis en place mélangent l'énergie des matériaux et l'énergie de fabrication. Il n'y a donc plus de différenciation entre l'énergie utilisée nécessaire à la fabrication des matériaux et l'énergie que le matériau contient. Donc, ça veut dire que pour tous les matériaux naturels comme la paille, le bois, etc, on prend en compte la photosynthèse parce qu'à la destruction on la revalorise en énergie. Donc potentiellement, ce qui est intéressant, c'est toute la phase où il est bloqué dans la construction, où le carbone est stocké. Ça veut dire que, quand on considère l'ensemble, un ballot de paille représente beaucoup de matière et donc d'énergie stockée, ce qui n'est pas valorisé dans l'analyse du cycle de vie. Donc, il y a différentes choses comme ça qui sont assez intéressantes et qui ne figurent pas dans une base de données. Quand on prend des fiches de déclaration environnementales et sanitaires françaises ou bien une base de données suisse, pour les mêmes matériaux, il y a parfois des variations très très grandes, par exemple pour des produits comme la cellulose, les produits à base de méthane etc. La cellulose est considérée soit comme un déchet (il y a zéro énergie à la fabrication pratiquement donc c'est très intéressant), soit on considère qu'il y a l'impact du papier à prendre en compte. La paille, c'est la même chose. Les Français considèrent que c'est un déchet qui doit être compensé par de l'engrais sur le terrain. En Belgique, lorsqu'on a fait une analyse du cycle de vie de la paille, ils ont considéré qu'elle vaut encore 15 % de la culture et donc on prend en compte 15 % des intrants ce qui a un impact complètement différent. Mais, à mon avis, ce qu'il se passe pour l'instant c'est que, pour toutes les fiches environnementales et sanitaires, c'est le fabricant qui fait une déclaration. Donc ça signifie qu'on est toujours très favorable. Dans la réalité, en fonction de ce qu'on veut faire dire à une analyse du cycle de vie, on peut réellement faire dire quasiment l'opposé.

Smeesters E. : C'est ce que j'expliquais. Et votre mémoire sera d'autant plus intéressant si vous intégrez cette complexité là, pas si vous en faites abstraction. Parce qu'il y a peu ou pas d'études qui assument cette ambivalence, ce paradoxe. Or, c'est ce qui est intéressant si vous faites de la recherche.

Bonnert A. : La plupart des analyses du cycle de vie que j'ai reçues sont vraiment tristes, je trouve, car on a des impacts en pourcentage, généralement dans des tableaux résumés. Donc, ça veut dire qu'on a un matériau qui représente 100 % d'impact et puis les autres un certain pourcentage ? Mais ça n'a aucun intérêt. Quand on compare deux matériaux, c'est peut-être plus intéressant d'indiquer les quantités d'équivalent en dioxyde de carbone, en antimoine etc.

Delvenne F. : C'est ça le but, Je ne comptais pas partir sur un pourcentage de quoi que ce soit.

Bonnert A. : C'est dingue. Simapro, apparemment, c'est un gros bug pour sortir en chiffre ou en pourcentage.

Delvenne F. : Je ne sais pas. Moi, je vais utiliser un logiciel libre d'accès, OpenLCA.

Bonnert A. : Moi, ce que j'utilise et qui n'est pas mal, c'est COCON, un logiciel qui vient de France. On peut déjà l'utiliser gratuitement et la version pro n'est vraiment pas très chère.

Delvenne F. : Parce qu'à la base, je comptais utiliser Simapro mais ils n'ont pas eu le budget pour la licence à l'université.

Bonnert A. : COCON est vraiment moins cher. Dans tous les cas, même si on veut acheter la version professionnelle, c'est un petit 500 euros. A vérifier. Mais, par contre, ce n'est pas un logiciel reconnu en tant qu'analyse du cycle de vie. Mais, on peut faire tout l'encodage qu'on veut pour les matériaux donc ça reste très utilisé. Il suffit de chaque fois mettre sa source. Et ce qu'il y a de très bien, c'est que lui justement laisse l'option de faire la différenciation entre énergie de fabrication et énergie du matériau. C'est vraiment pas mal pour jongler justement entre les deux. Mais c'est une analyse qui peut être très compliquée ; on peut vraiment pousser l'étude très loin. Le plus pertinent pour moi, c'est vraiment le travail de fond et montrer qu'il y a des choses qui ne sont pas logiques dans les modèles pour bâtiments plutôt que le résultat en lui-même.

Smeesters E. : Tu peux participer à la visite qu'on va faire maintenant

avec les membres de EUSBBA.

12.12 Interview 3 - Représentant de l'entreprise Argibat

Cette interview est réalisée le lundi 16 novembre 2015, au sein du site d'exploitation de l'entreprise Argibat. Sont présents Monsieur NONET Aurélien (recherche et développement), Monsieur ATTIA Shady et moi-même.

Nonet A. : Je vous propose de venir avec moi, on va faire le tour dans le flux normal de matière. Comme ça, on peut voir un peu la production et, le temps qu'on traverse l'usine, resituez-moi un peu votre mémoire.

Delvenne F. : Le but est donc de faire une analyse comparative au niveau du cycle de vie et du cycle des coûts, pour comparer une maison traditionnelle en Belgique (c'est-à-dire briques et blocs de béton), qui serait de préférence passive...

Nonet A. : Passive ou basse énergie ?

Delvenne F. : Passive.

Nonet A. : Passive passive. Juste un petit aparté. Le passif apparaît de plus en plus comme de l'extrémisme pour certain. Mais, maintenant, un bon basse énergie peut valoir un passif.

Delvenne F. : Le but n'est pas vraiment de respecter la norme de manière exacte mais plutôt d'atteindre une performance relativement proche.

Attia S. : Et le challenge, c'est quoi ? Bruxelles a envie de passif aujourd'hui dans sa réglementation et en Wallonie, cela va arriver vers 2019 - 2020. Du coup, à l'université, on se dit « Pourquoi pas ? »

Delvenne F. : Voilà. Et donc, je voudrai comparer cette maison traditionnelle avec des maisons construites en matériaux naturels, c'est-à-dire l'argile, la paille, le béton de chanvre et le bois. Je voudrai montrer que c'est possible de construire autrement tout en étant plus durable. Parce qu'il y a assez bien de personnes qui sont réticentes à l'idée de réaliser ce type de construction.

Nonet A. : Oui, c'est dur de faire changer les mentalités comme ça...

Attia S. : Oui mais, à l'université, elle fait une formation d'ingénieur architecte et donc on veut aussi une approche comparative, montrer qu'il y a du choix, ne pas se limiter à un seul matériau. Et une partie de la thèse

sera aussi autour de la technique de construction.

Nonet A. : On est dans le cadre d'un travail de fin d'études ou d'une thèse de doctorat ?

Delvenne F. : Un mémoire.

Nonet A. : Parce que j'ai entendu thèse et je me suis dit que ce n'était pas la même échelle alors. Très bien. Ça correspond tout à fait à un manque d'informations qu'on subit, nous, entrepreneurs et industriels. Donc, c'est typiquement le genre d'informations qui sont intéressantes ; ce n'est pas un projet dans le vent et ça me plaît bien.

Nonet A. : D'abord, en trois mots, nous sommes à la base entrepreneurs travaux publics et privés en région namuroise. On a plusieurs entreprises et on représente aujourd'hui un groupe de 150 personnes. C'est une entreprise familiale. On est 7 Monsieur Nonet et 3 Madame Nonet dans l'entité du groupe avec chacun un petit peu son secteur. Moi, je m'occupe de tout ce qui est recherche et développement. Sur le site de Floreffe, on a un centre de recyclage et on a développé une nouvelle filière pour valoriser les terres parce qu'on a beaucoup de terre qui arrive. La terre est considérée comme un déchet en Région Wallonne et donc nous coûte très cher en mise en décharge. Et, on a en parallèle des amis dans un bureau d'études (thermique) qui conseillent à leurs clients de mettre de l'argile dans leurs constructions. Mais le seul argile qu'on pouvait trouvé provenait d'Allemagne.

Attia S. : En haut...

Nonet A. : Oui. Et il s'est demandé s'il n'y avait pas là quelque chose. Il nous a sensibilisé à ça. On a fait des petits essais et on a développé une petite presse : c'est une fendeuse à bois derrière un tracteur qu'on a modifiée. On peut faire des briques une par une donc c'était très précieux ! Et donc on a lancé ça, on avait une petite unité de production qui commençait à tourner. On était prêt. On avait préparé tout le dossier pour investir, pour faire quelque chose qu'on aurait pu proposer à un prix compétitif. C'était des investissements importants donc le projet restait un peu dans les tiroirs. Puis, au moment où on a entendu parler de la fermeture de la briqueterie, on a pris contact, via le BEP, pour voir s'il y avait moyen de monter un projet.

Attia S. : Le BEP Namur ?

Nonet A. : Oui. Mais, on était trop petit pour reprendre l'entièreté de la briqueterie. Le BEP a donc mis plusieurs partenaires potentiels autour

de la table et on est allé jusqu'au bout du projet avec Thomas & Piron. Ils étaient intéressés dans un premier temps pour mettre de l'argile dans leurs constructions en bois via TomWood. Finalement, ils ont pris un petit peu peur. Ils voyaient les choses de manière petite alors que nous, on voyait les choses en grand. Donc, on a trouvé un arrangement : Nous, on a repris l'usine, l'argilière et le personnel. Eux, ils ont repris la partie droite du site, en gros, un terrain et un bâtiment pour une opération immobilière. Mais, ça nous a permis de diminuer les coûts et de pouvoir se lancer dans ce projet. Donc, c'est un peu la situation. Pour la genèse du projet, ça fait 5 ans qu'on travaille concrètement dans l'argile et 10 ans qu'on le fait au niveau de la stabilisation de sol. Donc, on a acquis un certain savoir-faire. On a développé notre labo pour le mélange de chaux-ciment et de différents liants pour la stabilisation.

Attia S. : Ca signifie que vous ne vous limitez pas qu'aux bâtiments, aux briques...

Nonet A. : Voilà. On était plus dans l'extérieur et puis on a développé un savoir-faire dans la gestion de l'argile pour ensuite l'appliquer dans la construction en intérieur.

Attia S. : Là, vous parlez à grande échelle, avec Thomas & Piron.

Nonet A. : Eux voyaient petits. Ils se disaient : « On va garder l'usine mais on va avancer petit à petit. On va produire puis on va voir comment on peut vendre. » Mais non, si on veut vendre des briques, il faut pouvoir vendre toute une gamme : il faut des enduits, des enduits de finition, des enduits colorés, des mortiers etc. On a un outil merveilleux pour produire des briques mais pour produire toutes ces choses-là, il faut développer des outils. Donc, il faut pouvoir investir en plus et ça ne leur plaisait pas trop. Mais c'est ce que nous, nous avons fait. Il faut vraiment aller de l'avant et pas se dire qu'on a quelque chose et se contenter de voir comme ça vivote. Non, on veut vraiment aller de l'avant.

Nonet A. : Alors, avant, l'argile était extrait autour de l'usine et même en dessous. Puis, il y a une trentaine d'années, elle a brûlé et donc ils l'ont reconstruite. Elle était perpendiculaire à la voirie avec l'argilière autour. Mais comme elle a brûlé, ils ont reconstruit dans l'autre sens pour pouvoir exploiter là où l'usine était précédemment. Maintenant, on a tout le terrain qui est ici, qui est un terrain communal, avec le permis d'exploiter. Alors, en fait, on ne le voit pas bien mais on exploite sur différentes zones. Il y a des sondages qui ont été faits, on connaît les couches géologiques et on sait si on va avoir de l'argile plus ou moins grasse, plus ou moins schisteuse, à différents endroits. Donc, on va recomposer un merlon, un stock qui est ici, où

on sait qu'on va mettre autant de centimètres, par exemple 40 centimètres d'une zone et 50 qui viennent d'une autre zone et ainsi de suite (Figure 7.4).



FIGURE 12.4 – Argilière située en face de la briqueterie

Nonet A. : On va donc avoir au final le mélange qui nous convient . Et donc ce qu'on fait maintenant par exemple, c'est reprendre un peu de toutes ces couches en même temps et mélanger le tout. Ensuite, il y a le transport. Pourquoi est-ce que je parle du transport ? Parce qu'il y a toujours une partie de terre qui part pour faire du cuit dans une autre briqueterie puisque nous, on fait uniquement du cru. Et donc, pour le cru, le transport, ça va être de là à là (traverser la route) mais ça reste un transport, un chargement et un déchargement avec remise en stock. Alors pour la petite histoire, sur le site, on produit des matériaux de construction mais on a aussi fait un centre de recyclage qui est un de nos métiers premiers (Figure 7.5). Le recyclage des matériaux de construction, c'est typiquement une boucle dans laquelle 100% de ce qui entre est recyclé. On va avoir des camions qui entrent et sont pesés. Ils vont déverser leurs déchets à différents endroits en fonction de ce que c'est : de la terre, du mixte, du béton, du tarmac, de la pierre. Tout est entre guillemets trié et c'est dans leur intérêt de trier directement sur chantier. S'ils rentrent du béton, il va rentrer gratuitement. S'ils le mélangent

avec de la terre, ça risque de rentrer comme de la terre à 13 euros la tonne et, s'ils le mélangent avec des briquaillons ou n'importe quoi, ça va rentrer comme du mixte à 11 ou 12 euros la tonne. Donc, on voit qu'il y a vraiment un grand intérêt pour les entrepreneurs à gérer correctement leurs déchets dès leur production sur chantier.



FIGURE 12.5 – Centre de recyclage à l'arrière de la briqueterie

Nonet A. : Nous, on va les cribler. Il y a un crible en action là-bas. On pourra y jeter un coup d'œil par la suite. Ils sont donc criblés et concassés. On va donc obtenir différentes granulométries et ça va avoir différents usages mais toujours dans la même boucle de construction, principalement pour des fondations ou des sous-fondations de voiries ou de terrains, typiquement dans un zoning, ou quand on fait un parking ou encore des dalles pour un Décathlon, etc. On fait donc la stabilisation du sol. On va remélanger l'argile ou plutôt le sol en place, avec de la chaux et puis les couches supérieures seront faites à base de recyclés. Donc typiquement, dans un centre de recyclage comme celui-ci, 100% de ce qui rentre ressort. Et, sur notre site de Floreffe, on a même 105% de ce qui entre qui sort. Comment est-ce possible ? Simplement parce qu'il y a quelques années qu'on stockait des matériaux avec lesquels on ne savaient rien faire. On avait fait de belles montagnes. Puis, on a développé des produits qui sont intéressants et donc, on est en train de sortir plus de marchandises que ce qui entre pour le moment. Après, il faut trouver l'équilibre technico-économique.

Nonet A. : Dans un centre de recyclage, il fait toujours sale. En été,

c'est la poussière et le restant de l'année, c'est de la boue. Le seul moment où il fait propre, c'est en hiver quand il gèle mais alors on ne travaille plus. Donc, si on suit la filière de l'argile, il est extrait. Il va être mis en stock de ce côté-ci pour ne plus devoir traverser la voirie. Puis, avec un bull, on vient le chercher et le rentrer juste là derrière, il y a une grande trémie où l'on amène la terre. Alors, ici, on rentre vraiment dans la production de la brique. La préparation de la terre, c'est une partie de l'usine à laquelle on a très peu touchée. Donc la terre arrive par l'extérieur, là-bas, dans un doser, puis elle monte dans la toile ici.

Nonet A. : Elle va arriver par des bols de transport et les deux meules vont presser la terre pour la faire passer à travers une grille dont les trous font un gros centimètre. C'est le premier broyage (Figure 7.6).



FIGURE 12.6 – Broyage de la terre par les meules

Nonet A. : Après, ça tombe en dessous et on a des spaghettis. Une vis va les reprendre et on arrive au niveau du laminoir. Là, des cylindres crantés tournent. L'argile passe dedans. On est donc toujours en phase de préparation. On va éclater des paquets de schiste parce que, pour l'instant, on a un mélange dans lequel il y a beaucoup de schiste. C'est ce qui donnait la dureté à la brique de Wanlin. On règle les cylindres sur 1 ou 2 millimètres. On va donc avoir des éléments qui font 2 millimètres maximum mais qui peuvent être des plaquettes d'une certaine longueur, quand je dis une certaine longueur, ce n'est pas 20 centimètres, c'est 4 ou 5 millimètres. C'est ce qui va donner une certaine texture à la brique. Ensuite, la brique passe dans

le stock tampon. Du stock tampon, elle passe dans l'étireuse. C'est vraiment le cœur de l'usine, de la production de briques. Alors, l'étireuse, qu'est-ce que c'est ? L'argile arrive au-dessus et l'opérateur a différentes vannes pour ajouter de l'eau, pour avoir la plasticité souhaitée au niveau de l'étireuse, à différents endroits, et en amont, au niveau du premier broyeur. Il va donc vraiment gérer l'humidité qui est très importante. On a ici deux vis qui vont pousser l'argile à travers une plaque. On va de nouveau faire des spaghettis et, en dessous, une grosse vis va reprendre tout ça. Entre les deux, avec le tuyau bleu, on fait le vide d'air. Comme ça, quand on arrive à la pression atmosphérique, on a un kilogramme par centimètre carré de pression supplémentaire. On a vraiment quelque chose qui est bien compacté. Cette grosse vis, dont on voit le bout ici, pousse l'argile. Ici, on va venir mettre différentes choses. La première des choses, ce sont des plaques avec des tiges, qui sont mises dans ce sens-ci, et des formes (Figure 7.7). Si on veut faire des trous dans les blocs, c'est comme ça qu'on fait. On peut monter, au bout des tiges, des ronds, des rectangles, plus ou moins arrondis, plus ou moins rapprochés. On peut faire ce qu'on veut.



FIGURE 12.7 – Moules permettant de donner sa forme à l'argile

Attia S. : Il y a un processus de coupe ensuite ?

Nonet A. : Oui. On va en parler juste après. Donc, on sort un gros boudin ici. Ce boudin va être mis en forme sur les côtés par une filière. Je raconte beaucoup de choses qui ne vous serviront probablement jamais, mais c'est important de voir tout le processus. Donc les filières, ce sont des moules en bois dans lesquels il y a des plaques en inox qui viennent petit

à petit donner la forme finale des blocs. Entre les plaques, de nouveau, on injecte de l'eau pour lubrifier et, en sortie, on a le boudin qui a la forme souhaitée. Ça peut être un rectangle mais on va aussi en avoir certains qui ont vraiment des formes particulières. Avec ça, on a vraiment les plaquettes de schiste et l'argile qui sont mis pour donner un beau fini, bien lisse. Si ce n'est pas ce qui est souhaité et qu'on veut quelque chose de rugueux ou un format qu'on n'a pas comme ça, comme des formats rectangulaire, on fait une coupe au fil. Donc, ici, ce sont des fils qui vont couper le boudin qui sort (Figure 7.8). On va voir les plaquettes de schiste qui vont s'accrocher et qui vont, petit à petit, passer. Ça donne un fini rugueux. On va le voir de l'autre côté. On fait des moules en bois parce que c'est le meilleur matériau, celui qui s'usine facilement et qui résiste aux fortes contraintes qu'il y a au moment de l'extrusion. Ça reste suffisamment souple mais suffisamment rigide et c'est assez facile à travailler.



FIGURE 12.8 – Coupe au fil

Attia S. : Le chanvre est-il déjà rentré dans le mix à cet instant ?

Nonet A. : Non, pas ici. Le chanvre, on en verra plus loin, mais il est produit ailleurs.

Attia S. : Et la paille ?

Nonet A. : La paille va entrer dans le circuit mais pour les enduits. On a vu là-bas qu'il y a plein de stock.

Attia S. : Cela signifie que c'est purement et simplement le schiste et l'argile ?

Nonet A. : Oui, c'est cela. Et l'eau ainsi que la préparation. Ici, on a un gros boudin qui sort. Les morceaux qu'on a coupé au fil, qu'est-ce qu'ils font ? Ils tombent en dessous sur la bande et ils bouclent ici. Tout ce qui est préparé est bon. Supposons qu'on ait sorti un boudin et qu'on sent qu'il n'est pas bien, on le remet en dessous et il boucle. C'est juste un petit peu d'énergie dépensée. Ici, on arrive au niveau du coupeur. Ce sont les fils qui vont découper les blocs. En fonction des réglages de la machine, du nombre de fils - on peut en mettre un sur deux ou un sur trois - on va faire des blocs plus ou moins grands. Ça travaille en continu. C'est pour ça qu'on voit que le premier fil, ici au niveau de la coupe, est incliné. comme ça, il fait une découpe verticale dans le bloc pendant qu'il avance. Alors, une fois en dessous, il faut bien qu'il remonte. Ce qu'on fait, c'est qu'on espace les blocs. Pour les espacer, la toile suivante va un peu plus vite. Dès qu'ils sont espacés, on fait remonter les fils. Comme ça, ils tournent et coupent les blocs. Donc ici, on a des blocs qui sont espacés. On fait des blocs qui font 5 centimètres au minimum et les plus grands en font 30. On ne sait pas en faire de plus petit parce qu'alors ils sont sur la tranche et tombent tout de suite. Parfois, on les fait volontairement tomber pour qu'ils restent stables pendant le restant du processus. C'est à ça que sert l'outil qu'on a mis ici. Les briques arrivent et tombent. On peut mettre quelqu'un là pour les faire tomber ou simplement utiliser ce système. Elles arrivent ici. On va introduire une paire de lattes métalliques en dessous. Elles vont venir se déposer à ce niveau-ci. En fonction de la durée de notre réunion, on pourra peut-être les voir tourner tantôt, ça sera plus parlant. Donc, les briques viennent se déposer ici. Les lattes avancent. On va accumuler sur la paire de lattes, en fonction du format, 2, 4, 10, 15 blocs. On va les monter dans l'ascenseur (Figure 7.9).



FIGURE 12.9 – Ascenseur permettant de transporter les lattes métalliques vers le séchoir

Nonet A. : A chaque fois qu’une paire de lattes y est mise, on monte d’un cran. Quand tout est plein, tout avance d’un cran. Quand tout est rempli, l’ascenseur avance. Là, c’est un train sur un train. On vient les chercher et les mettre dans les séchoirs (Figure 7.10).

Nonet A. : On a donc ici un fini de brique quand la forme est donnée directement par la filière. Par contre, une coupe au fil, c’est comme ceci, beaucoup plus rugueux. Ça peut être souhaité ou pas. Si on veut mettre de l’enduit, il vaut mieux que ça soit rugueux pour que ça accroche. Si on veut le laisser apparent, il vaut mieux que ça soit lisse. Donc, les blocs sont mis en séchoir. Dans chaque séchoir, on vient mettre 10 paquets. Un paquet, c’est une charge complète, avec le transbordeur. Un séchoir (Figure 7.10) est composé de deux chambres avec un couloir central. Dans chaque chambre, on peut mettre à peu près 30 tonnes de terre. Entre les deux, il y a un gros ventilateur qui fait toute la hauteur du séchoir et qui, lui, va brasser l’air. Au dessus, il y en a encore deux autres qui soufflent l’air vers le bas. Avant, les séchoirs étaient chauffés avec la récupération d’air du four. On avait donc de l’air à 120 degrés. Maintenant, on ne l’a plus. Ça permettait de faire sécher les blocs et de brasser l’air pour avoir quelque chose d’homogène. Maintenant, on souffle de l’air à température ambiante, sauf quand il faut vraiment sécher, on a un brûleur complémentaire. L’idée, c’est vraiment de travailler en consommant le moins d’énergie pour deux choses : rester cohé-



FIGURE 12.10 – Lattes métalliques sur lesquelles sont posés des galets d'argile, dans un séchoir

rent au niveau global de la production de matériaux en argile et parce que, économiquement, ça coûte moins cher de l'air à température ambiante que de l'air chaud. Quand les blocs sont secs, on fait le chemin inverse. On vient les chercher et on va les envoyer sur cette ligne-ci. On va faire l'inverse de tout à l'heure. On va redescendre petit à petit les paires de lattes pour les amener ici. Elles vont avancer pour aller de la bande transporteuse sur le tapis. La pince jaune vient et les prend par le côté, toutes d'un coup. Elle va les déposer sur un convoyeur à chaîne. Les lattes, quant à elles, repartent de l'autre côté. Elles sont stockées dans l'ascenseur qui est là. Donc, les lattes bouclent ici et les briques, qui sont produites et qui passent dans les séchoirs, viennent par ici et repartent de l'autre côté. Quand elles quittent ici, on a des produits finis. Sur un produit fini, il y a toujours trois belles faces.

Attia S. : Ça prend combien de temps, plus ou moins, à sécher ?

Nonet A. : Si on sèche à 120 degrés, cela prend 48 heures. Si on sèche à l'air ambiant, ça prend d'une semaine à 10 jours, voire même à 6 mois si on essaye de sécher à cette période de l'année. Maintenant, ça sèche très mal parce qu'il fait froid et humide. Donc, si on souffle tout le temps sur les briques, pendant la nuit on les refroidit. Le matin, de 6 heures jusque

13 ou 14 heures, puisqu'on a refroidit les briques, on souffle de l'air qui se condense dessus. A partir du mois d'octobre, il y a toute une logistique à avoir au niveau de la gestion des paramètres de température et d'humidité dans les séchoirs et dans l'air ambiant, si on veut parvenir à sécher. Ici, ce qu'on fait, c'est qu'on a produit, on a fait du stock, pour pouvoir passer l'hiver et travailler sur autre chose. Sinon, en temps normal, on produit les briques et, pendant qu'elles sèchent quand les séchoirs sont pleins, on produit des enduits. Dès qu'il y a une ou deux chambres sèches, on boucle et on tourne comme ça. C'est ça le principe.

Nonet A. : On est à peu près depuis un an toujours en train de démonter et remonter, de déplacer des choses. Ici, on va monter du nouveau pour la production des enduits (Figure 7.11). On a déjà une ligne de séchage de sable. Là, on sèche avec un brûleur à gaz dans un tambour. Puis, les sables sont criblés. Ils vont être stockés dans des silos, qui sont couchés là-bas mais qui vont être redressés. En dessous des silos, il y a des vis de dosage. Une fois qu'on a dosé le sable ou l'argile ou les différents constituants des enduits, ils sont envoyés dans une trémie qui est pesée puis dans une plus petite trémie en alu. C'est un tampon. Puis, le tout passe dans le malaxeur bleu, où l'on va mélanger. Quand c'est mélangé, ça tombe dans la trémie verte puis, avec une vis de dosage, on va remplir les big-bags. On a deux technologies de sacs différentes et des seaux pour certains produits.



FIGURE 12.11 – Production des composants d'enduit

Nonet A. : Alors, ici, on arrive dans la partie conditionnement. Les blocs vont arriver à la queue leu leu (Figure 7.12), par paquet, en fonction du nombre de blocs sur les lattes. On va les arrêter et les bloquer ici. On les laisse passer puis on les arrête de nouveau pour faire des paquets d'un certain nombre de blocs. Avec le poussoir jaune (Figure 7.13), on va les avancer pour faire un certain pattern sur la bande transporteuse qu'on voit ici.



FIGURE 12.12 – Blocs d'argile arrivant par paquet



FIGURE 12.13 – Poussoir jaune

Nonet A. : Arrivés au bout, on va les pincer, leur faire faire une rotation de 90 degrés et les poser sur le convoyeur en face. Ici, c'est entre guillemets une boucle compliquée. On voit qu'il y a énormément de chaînes. C'est parce qu'on peut faire énormément de formats différents. Donc, pour avoir de la souplesse, on a quelque chose d'un peu plus compliqué que si on travaillait avec un format unique. On va donc avoir ici des blocs qui ont déjà la forme qu'on va mettre sur les palettes. On va de nouveau les laisser avancer, pour faire un lit de palette complet. Puis, on avance la toile. On fait le deuxième lit et on avance à nouveau la toile. On vient les chercher ici avec la pince. Les deux pinces sont capables de pincer, tourner de 90 degrés, s'écarter, prendre le bon empâtement, lever ou descendre. Elles viennent donc ici. On remplit les palettes 1 et 3, puis les 2 et 4, en faisant à chaque fois une rotation de 90 degrés entre les différents lits (Figure 7.14). Une fois rempli, tout cela avance. On met 4 nouvelles palettes et c'est reparti. On travaille toujours en continu. On va palétiser quand on sort des blocs du séchoir. Quand on sort des blocs du séchoir, on en rentre dans le séchoir. Et, si on en rentre, on en produit. Tout travaille toujours en même temps. Pourquoi ? Entre autre, parce que si on se contente de vider un séchoir pour palétiser, les lattes sur lesquelles sont posées les blocs vont s'accumuler. A un moment, on en aura de trop ; on ne saura plus les mettre dans l'ascenseur qui lui peut stocker les lattes de deux séchoirs.



FIGURE 12.14 – Palettes de blocs d'argile

Nonet A. : Alors, là-bas, on retrouve les enduits. Un enduit est un mélange de sable et d'argile principalement. Essayer de mélanger de la terre

et du sable humide, ce n'est pas efficace. On n'obtient pas un mélange qui est bien fini. Le meilleur moyen, c'est de sécher tous les composants. Et, le meilleur moyen de sécher l'argile, c'est de faire des briques pour les concasser. Alors, c'est un peu dommage parce que, énergétiquement, on passe d'un taux d'humidité d'à peu près 10 % à l'extérieur, à 14 % pour avoir la plasticité nécessaire à la fabrication des briques, pour finalement redescendre à 1 %. Donc, on effectue 13 % de séchage alors qu'on pourrait en faire 9 seulement. Il y a une marge de 4 % qu'on pourrait gagner. Mais, pour sécher des blocs, il faut de la surface d'échange et, pour avoir facilement de la surface d'échange, faire des blocs et les concasser est une bonne solution. Puisqu'il faut les concasser, on fait un format un peu particulier. C'est celui qu'on voit dans les palette là-bas ou qui est ici derrière. Il s'agit d'un petit format, avec beaucoup de surface d'échange. Il ne va pas passer par la phase de mise en palettes. Il va continuer son chemin et passer par là. On trouve un gros broyeur qui va exploser les blocs pour en faire de gros morceaux. Ils passent ensuite par là et le produit qui va sortir est sous forme de farine. Mais, il s'agit d'une farine dans laquelle on voit qu'il reste les plaquettes de schiste qui, elles, ne nous intéressent pas forcément. Pour faire des enduits fins, on va devoir retirer ce schiste. Pour cela, il y a un passage par une vis de dosage puis un crible. En fait, ce sont deux étages avec des mailles espacées de 500 microns. Tout bouge comme ça. C'est donc un véritable criblage. On va récupérer le schiste pour le mettre en big-bags (on a une filière de valorisation pour lui) et l'argile, qui lui va être soufflé par le tuyau gris pour retourner dans la production. On transporte donc cette farine en soufflant de l'air.

Attia S. : Donc, pour l'analyse du cycle de vie, l'enduit doit être traité à part.

Nonet A. : Il faut faire le bloc puis l'enduit oui.

Attia S. : J'imagine qu'il y a aussi une différence de prix.

Nonet A. : Ils n'ont pas le même prix. Typiquement, quand on fait de l'enduit, si on met un tonne d'argile dedans, c'est deux tonnes de briques qui sont produites, la moitié en argile et la moitié en schiste. Si on regarde au niveau des produits, on a des blocs de différents formats. On a aussi des blocs avec des tenons mortaises verticaux pour que le maçon puisse poser rapidement les blocs. Ils ont aussi des gros trous ici, pour pouvoir poser sa main, pour un point de vue rendement sur le chantier. C'est un aspect auquel on est très attentif : avoir un prix de revient pour un prix final le plus bas possible. C'est donc important de veiller à ce que la mise en œuvre soit facile. Pour la faciliter, il faut penser au format. On fait les plus gros blocs possibles pour en mettre moins par mètre carré. Mais, s'ils sont gros, ils sont lourds. On a donc demandé à des maçons quel est le meilleur poids auquel

on puisse arriver pour qu'ils sachent les prendre d'une main et utiliser la deuxième pour s'aider à les positionner correctement. Légèrement, on peut aller jusqu'à 25 kilogrammes mais manipuler des blocs de 25 kilogrammes toute la journée, ce n'est pas possible. Ici, je pense qu'on est à 16,5 kilogrammes.

Attia S. : Cela signifie que vous optimisez le produit en pensant à la manière de le travailler et de le mettre en œuvre.

Nonet A. : Alors, en ce qui concerne le mortier pour maçonner les blocs, il s'agit d'un mélange d'argile et de sable (Figure 7.15). On ne va pas avoir de prise chimique, de réaction, quand on le prépare. C'est simplement le bloc qui va absorber une partie de l'eau. Le mortier va donc durcir. Ça permet d'avoir du mortier comme celui-ci qui reste frais. On pourrait ici peut-être lui ajouter un peu d'eau. Mais, il est là et il reste frais pendant des semaines. Dès qu'on le met en œuvre, en une demi-heure, l'eau est absorbée. On obtient quelque chose qui est rigide et qui est dur. Si on travaille avec un mortier traditionnel avec du ciment, soit on met un 32 ou un 42.5 normal. On va pouvoir monter un mètre par jour. Après, il faut attendre sinon, quand on place le bloc suivant, le mur bouge, ce qui n'est pas très pratique. Sinon, on peut choisir un ciment rapide mais il ne faut pas qu'il reste plus d'une heure dans la cuvette sinon il va prendre et il est bon à jeter.



FIGURE 12.15 – Mortier

Nonet A. : On fait des enduits. On a donc un enduit de base qui suit le même principe que celui que vous voyez : tant qu'il est dans la cuvette, il est là et reste souple, il ne prend pas. Par contre, quand il est appliqué au mur, même chose, il va rapidement dégager de l'humidité, en absorber dans le mur et donc durcir. Ici, c'est un enduit de plafonnage qui permet d'avoir une surface plane pour remplacer le MP 75. Dessus, on vient mettre des enduits de finition colorés. On est alors sur un enduit beaucoup plus fin : le sable est plus fin et on ne met pas de paille dans celui-ci. Dans l'enduit de base, on met de la paille. Elle va le fibrer pour limiter la fissuration lors du retrait. Sur ceux-ci, on a vraiment quelque chose de très fin, pour remplacer la dernière couche, le fix finish et la peinture. Donc, pour les blocs, on peut avoir des finis lisses ou rugueux mais on peut aussi mettre des éléments pour avoir de l'accroche à l'échelle du centimètre. On peut vraiment faire ce qu'on veut. Au niveau de la palette de coloris, on a ici sur les murs des exemples de ce qui est faisable (Figure 7.16). Évidemment, on est dans un environnement industriel donc c'est tout poussiéreux et ça ne vieillit pas très bien.



FIGURE 12.16 – Enduits de finition colorés

Nonet A. : Alors, on parlait tout à l'heure du chanvre. On a ici des blocs de chez IsoHemp (Figure 7.17). Ce sont des blocs de chaux-chanvre qui sont produits à Fernelmont. On organise à peu près toutes les deux semaines des présentations à des groupes d'architectes. On réalise ça avec eux pour leur montrer un système constructif complet. On a donc côté extérieur des blocs de chaux-chanvre, respirant, et à l'intérieur, des blocs d'argile pour amener de l'inertie. Puis, enfin, on a de l'argibase et un enduit de finition. On peut aussi travailler dans l'autre sens.



FIGURE 12.17 – Mur combinaison de blocs d'argile et de blocs IsoHemp

Attia S. : Donc, l'argile peut être à l'extérieur ?

Nonet A. : Il ne résiste pas à l'eau puisqu'il n'est pas cuit. Donc, il faut soit un enduit de chaux, soit un bardage voire même une brique, pourquoi pas. Puis, il faut de la masse et un isolant sur lequel on peut venir plafonner et mettre des enduits de finition.

Attia S. : C'est donc le même ordre ? On va seulement venir placer le bardage à la place de l'enduit ?

Nonet A. : Et, sur les blocs à l'extérieur, plutôt que de mettre de l'enduit d'argile, on peut mettre un enduit à la chaux pour les protéger des intempéries.

Delvenne F. : Il sert quand même de mur porteur ?

Nonet A. : Il pourrait servir de murs porteurs. On a 2 mégapascals de résistance. Par contre, quand ils sont comme ça, une fois immergés dans l'eau, ils vont fondre complètement. Ça reste de l'argile. On a donc préparé des blocs stabilisés à la chaux. Par contre, leur processus de séchage est beaucoup plus long et donc, économiquement parlant, on n'en produit pas. Il faut soit les chauffer, soit les laisser très longtemps dans les séchoirs, ce qui n'est pas très intéressant. Pour celui qui veut un bloc porteur, il y a pour le moment d'autres solutions qui sont plus avantageuses. Ou, on peut partir sur une structure portante poteaux-poutres, une structure en bois ou une structure métallique, qu'on va remplir d'argile. C'est un peu les différentes possibilités. Sinon, dans tous nos projets, on a des formats comme ceux-ci, tenons mortaises, qu'on vient simplement empiler les uns sur les autres. Le creux est un petit peu plus bas, comme ça, on peut mettre un mortier colle pour les maintenir ensemble. C'est celui-ci qui était destiné à être stabilisé, à être porteur.

Attia S. : J'ai quelques exemples. Je suis originaire d'Égypte. Dans le Sud, il y a des villages où on ne construit qu'avec ce matériau. Le seul souci, ce sont les inondations. Je ne crois pas qu'en Belgique, on va laisser ce matériau à ce niveau là. Ce sera plus probablement utilisé pour des cloisons. Est-ce qu'il y a réellement un risque ? Je suppose qu'on aura une structure en béton ? Je peux peut-être poser la question différemment. Avec quel système structurel est-ce que vous nous conseillez de combiner ce système de parois ou de finition ? Un système poteaux-poutres ? Un système de murs porteurs ?

Nonet A. : Les deux.

Attia S. : Le béton aussi ?

Nonet A. : Oui. Si on fait du béton, on amène déjà de l'inertie et de la masse. Il y a donc moins d'intérêt à mettre de l'argile. Si on choisit du bois, on a une structure légère, qui va manquer d'inertie. C'est donc important d'ajouter de l'argile. On peut en ajouter à la structure en béton mais c'est moins nécessaire. Par contre, là où le béton ne va pas faire effet, c'est dans la régulation du taux d'humidité. Si on a une atmosphère qui est trop sèche

ou trop humide, on sort très rapidement de la zone de confort. On peut prendre les deux extrêmes. En été, il va faire chaud, on est bien, on peut travailler dehors, il n'y a pas de soucis. Un orage arrive le soir ; d'un coup, il fait lourd. On souffre de la chaleur parce qu'il fait trop humide. S'il y a trop d'humidité, on ressent trop la chaleur et on en souffre. Physiologiquement parlant, quand il y a trop d'humidité et qu'il fait chaud, on n'assimile plus l'oxygène quand on respire, on étouffe, on est réellement mal. En hiver, c'est l'inverse. S'il n'y a pas assez d'humidité, on ne ressent pas la chaleur. Quand est-ce qu'il fait trop sec dans un bâtiment ? Si on chauffe un peu l'air froid extérieur qui contient très peu d'humidité, dès qu'on le réchauffe, l'humidité relative descend. S'il est trop sec, on ne sent pas la chaleur et on augmente le thermostat. On va passer de 19 degrés à 20, 21, 22, 23 degrés pour avoir un sentiment confort. Or, on l'avait déjà à 19 degrés mais avec un taux d'humidité plus élevé. L'argile, lui, va pouvoir absorber et restituer l'humidité, chose que le béton ne fait pas du tout, ni la terre cuite. Le plâtre le fait un petit peu mais proportionnellement à son poids. Un centimètre d'argile sur un mètre carré représente 16 kilogrammes. Pour le plâtre, on est à 10 kilogrammes. On a donc, avec l'argile, 60 % de masse en plus, donc 60 % d'absorption d'humidité et d'inertie thermique en plus.

Attia S. : L'argile n'est donc pas du tout vendu d'un point de vue structurel. On le vend principalement pour un aspect écologique, bien sûr, et pour sa fonction de régulateur d'humidité, pour le confort interne qu'il apporte.

Nonet A. : Oui. Typiquement, les endroits où il se situe très bien à l'intérieur, c'est en face d'un mur vitré exposé au Sud. Il absorbe l'excédent de chaleur en été, limite la surchauffe et en hiver, il va stocker la chaleur au moindre rayon de soleil. En Belgique, quand il y a un rayon de soleil, il va faire bon dans les maisons et on va ouvrir les fenêtres. Le lendemain, il va faire gris et on va devoir chauffer. Tandis qu'avec l'argile, on va stocker la chaleur et on va en profiter plus longtemps. On a un exemple dans un bâtiment passif, qui n'a pas le label à cause de son étanchéité à l'air. A Noël, les propriétaires ont fait une raclette avec des amis. C'est une maison qu'ils chauffent. Ils ont besoin d'un kilowatt pour la chauffer en hiver quand il fait -10 degrés. Ils avaient ce jour-là trois appareils à raclette, donc 3 fois 2 kilowatts. La température a directement augmenté. La chaleur a été absorbée dans les murs. Il y a à peu près 12 tonnes d'argile dans le bâtiment. Cinq jours plus tard, ils avaient encore 2 degrés de plus que la température habituelle parce que la chaleur avait été accumulée et restituée. Sinon, ils auraient dû ouvrir les fenêtres et, le lendemain, ils auraient retrouvé la température habituelle et aurait dû apporter un peu de calories. Autre exemple, cette fois en ce qui concerne la régulation d'humidité. Dans une salle de bain, on peut mettre de l'argile, que ce soit comme enduit ou sous forme de blocs, aux endroits qui ne sont pas des endroits de projection d'eau. Là, il faut un

enduit imperméable. Mon cousin a mis ça dans sa salle de bain et il a trois enfants. Ses enfants peuvent prendre un bain puis lui sa douche et, quand il sort, il peut se raser. Il n'y a aucune condensation sur les miroirs. Le taux d'humidité n'est pas monté assez haut pour cela alors qu'on est dans une phase de génération d'humidité très importante. Pourquoi ? Parce que les murs se sont asséchés pendant la journée. A ce moment là, ils vont absorber l'humidité et ont tout le temps de la restituer. Si on regarde le cycle d'une salle de bain, si on est une famille de 5 personnes et que chacun l'utilise 1 heure, on arrive à un total de 5 heures et il en reste 19 pour éliminer l'humidité. On n'arrive donc jamais à la saturation complète.

Attia S. : J'ai deux petites questions par rapport au passif. Il semble qu'aujourd'hui, avec le passif, on assiste à des surchauffes en été. Comme vous n'étiez pas très contents qu'on parle de passif au début de l'interview, j'aimerais vous entendre là dessus. Ma deuxième question est en rapport avec la typologie des bâtiments. Il me semble que l'argile est fortement associé au secteur résidentiel. Je travaille sur un projet en Suisse, pour l'entreprise Ricola. J'ai été dans l'usine et ils cherchent à régulariser sa température. C'est un bâtiment industriel fait uniquement de terre.

Nonet A. : En pisé préfabriqué.

Attia S. : Ma question est donc de savoir si vous avez des clients hors secteur résidentiel ainsi que votre avis sur le passif.

Nonet A. : On a des clients pour des bâtiments administratifs. Sur notre site de Floreffe, on a repris un bâtiment dans lequel on a placé une partie administrative, un atelier mécanique et le pôle recherches et développement. On lui a créé une annexe. C'est une structure métallique qui supporte une toiture plate en béton. On retrouve un remplissage en blocs d'argile. A l'extérieur, on est venu fixer des panneaux d'isolation en polystyrène expansé et on a fait un crépis dessus. On occupe le bâtiment depuis janvier 2015. Donc, il était occupé cet été et au moins de juin, quand il y a eu la canicule. Les conducteurs de chantier sont toujours sur chantier ou vont faire des réunions dans différentes sociétés, dans divers bâtiments. Dès qu'on rentre dans nos bureaux, il fait frais. On n'a pas de climatisation dans ce local et pourtant, il y a une dizaine d'ordinateurs et une dizaine de personnes qui y travaillent. Donc, 10 personnes multiplié par 100 watts quand ils sont simplement assis en train de faire leurs papiers : on arrive à 1 kilowatt de puissance thermique.

Attia S. : C'est un bâtiment isolé, avec des gains internes élevés et qui, malgré tout, fonctionne.

Nonet A. : Oui. On reste vraiment dans des plages de températures

confortables, même avec un extérieur très très chaud. Il faut dire qu'on triche quand même un petit peu. On est peu exposé au soleil dans les heures les plus chaudes. La protection thermique est aussi très importante. Dans le secrétariat par contre, on n'a pas eu la possibilité de mettre l'argile et, en plus, il est situé derrière une grande baie vitrée exposée au soleil sur deux faces. Là, il fait chaud et il faut utiliser la climatisation. Mais, techniquement, ça n'était pas possible.

Attia S. : Ce serait intéressant de proposer une thèse dans les prochaines années sur l'étude dans le secteur tertiaire. On pourrait associer une ventilation nocturne à ce système. On ferait alors une simulation pour voir ce qu'on peut obtenir comme résultat.

Nonet A. : Au niveau de la ventilation, le problème, c'est la législation belge. On est obligé de ventiler avec un renouvellement fixé. Donc on épuise le réservoir de calories, que ce soit en chaud ou en froid. Quand on veut travailler intelligemment, il faut réduire le débit quand ce n'est pas intéressant de rentrer de l'air chaud, limiter la surchauffe et surventiler la nuit dès que les températures s'inversent. Là, on a des gains vraiment importants. On a fait une étude thermique dynamique avec un bureau d'étude. On a vu que le gain le plus important de l'argile est le confort, pas vraiment l'économie d'énergie de chauffage. On y gagnait un peu mais cela restait marginal à l'échelle des calculs. Une erreur de calcul aurait pu faire basculer la balance dans un sens ou dans l'autre. Ce qu'on avait fait, c'est prendre un bâtiment et étudier les différentes quantités d'argile dedans, en modifiant l'inertie. On appliquait un modèle unique. On a pu identifier les degrés heures de surchauffe et la puissance de chauffe nécessaire en hiver.

Attia S. : Et quel est votre avis sur le passif ?

Nonet A. : Selon nous, dans le passif, il faut amener de l'argile. Il y a différentes manières de faire du passif. Est-ce que les bâtiments zéro énergie entrent dans la catégorie passive ? On fait du faux passif : on va mettre plein de climatisation et puis des panneaux solaires. C'est une des voies pour l'atteindre mais elle n'a pas beaucoup de sens. Nous, on pense que c'est vraiment possible d'y arriver, sans consommer d'énergie, en utilisant les bons matériaux et les bons enduits. C'est vraiment l'idée. L'argile a véritablement sa place là-dedans. Par exemple, on travaille avec des fabricants d'ossature bois. On travaille en préfabriqué. On leur fait des blocs qu'ils vont mettre dans les ossatures, dans les gaines techniques, pour amener de l'inertie dans leur cloison et passer à la classe de masse supérieure. L'argile a vraiment sa place. On sent qu'on apporte vraiment quelque chose de supplémentaire par rapport aux autres solutions. Le béton va amener de l'inertie mais pas de régulation d'humidité et donc des zones d'inconfort. Le plâtre va amener une

petite régulation d'humidité et une petite inertie mais au niveau densité, il est 60 % moins efficace que l'argile. On veut pouvoir proposer ça à des prix mis en œuvre sur chantier qui soient compétitifs.

Attia S. : Je trouve ça vraiment intéressant de faire quelques études dans le tertiaire.

Nonet A. : On travaille aussi avec d'autres fabricants, comme Paille-Tech par exemple, pour ne pas les nommer.

Delvenne F. : J'y suis allée vendredi.

Attia S. : Le travail de sa thèse est en rapport avec...

Delvenne F. : IsoHemp, PailleTech et pour le bois, j'ai contacté Mobic.

Attia S. : Et donc Argibat, comme ça on a les quatre matériaux.

Nonet A. : Il y a des liens entre chacun. Mobic introduit l'élément d'argile dans ces cloisons. C'est de ses éléments que je viens de parler. C'est nous qui les produisons. En ce qui concerne IsoHemp, on présente les blocs avec eux parce que c'est cohérent dans l'ensemble. Et PailleTech, on produit certains mélanges pour eux, pour qu'ils puissent vraiment faire une préfabrication mécanique, la mise en œuvre des produits. On fait la préparation des mélanges d'enduit qu'ils vont appliquer. Ce sont vraiment des partenaires, avec des ramifications, des liens entre chacun. Même s'il s'agit d'actionnaires différents, nous sommes tous dans la même dynamique de construction : faire du travail proprement, intelligemment et de manière efficace.

Nonet A. : Maintenant que la pièce là-bas est nettoyée, on peut aller s'asseoir et boire un café. On a donc fait le tour de l'usine. on voit ici les différents formats. Typiquement, on fait plusieurs formats d'épaisseurs différentes. On fait des 9 centimètres pour les murs de cloisons et des 14 centimètres pour les murs qui pourraient potentiellement devenir porteurs. On fait aussi des blocs de 19 centimètres qui étaient prévus pour être porteurs mais, économiquement, ce n'est pas intéressant. Dans la gamme, il y a tout ce qui est briques et blocs qui sont sur palettes. On retrouve les enduits de plafonnage qui sont soit en sacs de 25 kilogrammes, en papier, comme le mortier, soit en big bags d'une tonne. Les enduits de finition colorés sont eux en seaux. Pour vous montrer qu'on touche un peu à tout, on fait aussi des essais de claveaux en argile pur. On a des poutres en lamellés-collés qui sont de l'autre côté. L'idée est de pouvoir faire des plafonds en argile massif. On fait une chape de compression en béton d'argile par dessus, retenue dans la structure par des pythons au-dessus de chaque poutre. Cela

permet d'amener de la masse, non plus au niveau des murs mais au niveau des planchers.

Attia S. : Qu'est ce que c'est un béton d'argile ?

Nonet A. : Plutôt que d'utiliser du ciment comme liant, on utilise de l'argile. On a des formules qui permettent d'atteindre 4 à 6 mégapascals de résistance à la compression pour des bétons d'argile. Typiquement, on va avoir un béton de sol qui a à peu près cet aspect-ci et qui agit comme celui-ci. Chez PailleTech, dans la salle de réunion, au sol, c'est un béton comme ceci. Il n'est pas très propre. C'était un essai et il n'y a pas eu de couche de protection dessus. Mais, on a l'impression d'arriver sur un vieux béton industriel alors que c'est du béton de terre.

Attia S. : J'imagine que vous utilisez du Diesel ou du gaz comme source d'énergie ? Pour l'analyse du cycle de vie, quel est le principal carburant ?

Nonet A. : Ici, on utilise principalement de l'électricité.

Attia S. : Et ce n'est pas trop cher ?

Nonet A. : On ne fait rien d'électrique. L'électricité est utilisée pour nos moteurs. Après, on chauffe un peu, au propane. Les citernes de propane étaient la source principale d'énergie avant qu'on ne récupère l'usine.

Nonet A. : Il y a aussi un autre plaisir quand on travaille avec l'argile. Si on maçonne un mur, une fois arrivé au bout, il faut couper dans le bloc. On coupe. Le morceau restant, avec une brique normale, est jeté. Ici, on le casse avec un marteau et on le mélange dans le mortier. Dans un chantier d'argile, il n'y a pas de génération de déchets.

Nonet A. : On est dans une phase de démarrage de l'activité. Précédemment, le bâtiment au bout servait de bureaux et de show-room. Il a été repris par Thomas & Piron. Nous, on a le petit bâtiment qui est ici mais qu'il faut rénover. Donc, en attendant, on utilise ce local-ci. Je vous ai présenté un peu l'outil, on a discuté, on s'est penché sur certains points. Je ne sais pas de quelles informations vous avez besoin pour votre travail, ni comment vous comptez le structurer.

Delvenne F. : La première chose, c'est une analyse du cycle de vie. Le but est d'arriver à calculer les impacts des constructions. Le logiciel fournit différents résultats mais je compte me concentrer essentiellement sur l'énergie primaire et les quantités de dioxyde de carbone équivalent. Donc, bien évidemment, il me faut des informations pour les entrer dans le logiciel :

consommation de diesel, électricité, à peu près tout ce qui est utilisé ici dans l'usine au niveau des quantités...

Nonet A. : Alors, ici, on est à la fois bien situé et mal situé. Pour le calcul de consommation d'énergie, il faut savoir qu'on n'est pas en régime établi. Je ne peux pas simplement prendre ma facture d'électricité et diviser le montant par la production. Ce n'est pas correct parce qu'on fait de la production mais aussi des modifications dans l'usine : on soude, on transporte des éléments etc. Ce qu'on peut faire pour avoir une idée de la consommation et ce que nous, nous avons fait, c'est prendre les données de l'usine lorsqu'elle appartenait toujours au propriétaire précédent, Wienerberger. L'usine était la même et, au niveau de l'endroit où on voit les séchoirs à sable, on trouvait un four tunnel. Celui-ci a été démonté. Donc, on peut reprendre les consommations électriques précédentes et diviser cela par la production à ce moment là. On obtient l'énergie nécessaire. On ne tient pas compte du propane, seulement de l'électricité, chose assez correcte par rapport à ce qu'on fait maintenant. On peut donc avoir une idée de la consommation électrique pour la production.

Delvenne F. : De toute façon, le but n'est pas d'avoir des chiffres précis mais plutôt d'avoir une idée d'ordre de grandeur pour pouvoir faire une comparaison.

Nonet A. : Pour la production d'argile, on vient de faire une campagne d'extraction. Donc, on peut retrouver, pour avoir la matière première prête à entrer dans la filière, combien d'engins ont été utilisés, combien de jours de travail ont été nécessaires et ce qui a été consommé. C'est une information qu'on peut trouver facilement. Et on peut dire combien de tonnes ont été préparées avec cette méthode.

Attia S. : Et au niveau du prix ? Qu'est-ce qui influence leur modification d'année en année ?

Nonet A. : Argibat a commencé ses activités en septembre de l'année passée. On est tout jeune, tout frais. On n'a donc pas encore eu plusieurs itérations de prix. Pour le moment, notre plus gros problème est d'ouvrir le marché. Le marché n'est pas en attente de blocs d'argile crue. Il y a déjà quelques petits producteurs en Wallonie. Ça couvre et sature le marché. Nous, on est en train de s'appliquer à ouvrir le marché. Pour nous, c'est vraiment le plus gros problème. Ce n'est donc pas un problème de coût ou de technique, c'est un problème de marché. Là, le marché s'ouvre beaucoup plus facilement pour les enduits de finition et les enduits de plafonnage. Donc, on est là-dessus. On a, dans un premier temps, mis beaucoup d'énergie dans les blocs mais on s'est rendu compte que les débouchés n'étaient

pas gigantesques. On s'est donc plus appliqué sur les enduits sachant qu'en plus, il s'agit du même travail à la base, la fabrication de blocs. Après, on reprend la filière de production des enduits avec les puissances et les débits théoriques de chacun des composants qui entrent dans la chaîne. On peut donc faire un listing de tout ce qui est consommé pour la fabrication d'un enduit. Si on veut aller plus loin, on peut parler du recyclage des matériaux et voir ce qu'on fait ici chez Recybat. On peut constater quelle énergie est nécessaire pour mettre un déchet dans un autre matériau. Mais, ici, on est dans une logique de recyclage vers l'échelon inférieur : pas un matériau issu du recyclage mais plutôt un matériau de remblai ou de fondation. Soit on se trouve dans cette optique de recyclage, soit dans celle de l'argile qui est Cradle-to-Cradle. Il faut voir comment ça entre dans votre analyse du cycle de vie.

Delvenne F. : Pour le moment, je ne le sais pas encore. Je ne suis pas totalement dans l'étude parce que j'ai encore des cours tous les jours.

Nonet A. : Un des gros avantage de l'argile est qu'il se recycle tout seul. Si on abandonne un bâtiment, une ossature bois avec de l'argile, et qu'on revient le voir dans 200 ans, il n'en reste rien. Le bois s'est décomposé. L'argile, avec la pluie, a fondu et s'est petit à petit nourri à nouveau en humus. Comme je l'ai dit, en utilisant de l'argile, il n'y a pas de déchets en cours de chantier. Pour un autre matériau, on compte au moins 10 % de perte. Ici, par contre, tout est recyclé directement. Il faut aussi prendre en compte la difficulté de gestion des stocks. J'ai besoin de 10 mètres carrés. Est-ce que j'en commande 10 ou 11 ? Et ce onzième mètre carré, est-ce que je le laisse sur mon chantier, traîner là, ou est-ce que je demande à mon fournisseur de le reprendre ? Tout qui a fait des travaux a, dans le fond de son jardin, une palette de blocs ou de tuiles qui traînent et ne serviront jamais. Comment est-ce qu'on en tient compte ? Mais, je pense que c'est un détail, un paramètre qui vient uniquement modifier les décimales des résultats qu'on obtient. Il faut d'abord travailler de manière à se situer dans un ordre de grandeur plus large.

Attia S. : Que pensez-vous des certifications ? Par exemple, chez Iso-Hemp, la personne qui nous a reçu nous a dit que l'entreprise souhaite prendre la certification Cradle-to-Cradle. Elle a également fait faire une analyse du cycle de vie de son produit. Une approche de label pourrait peut-être s'avérer être une approche d'ouverture du marché. Est-ce que vous y avez déjà pensé ?

Nonet A. : On y a pensé. On regarde un peu. Faire une analyse du cycle de vie coûte très cher et prend beaucoup de temps. Personnellement, je n'ai jamais eu de chantier où on nous en a demandé une. Ça n'ouvre donc

pas de porte mais ça peut de temps à autre en fermer. Dans le cadre d'un gros projet immobilier public, il est possible que soit demandée une analyse du cycle de vie de chacun des matériaux. Généralement, il est encore temps de se lancer dans le calcul à ce moment là si le projet est accepté. En ce qui concerne la certification, pour les blocs, et plus spécialement les blocs destinés à être porteurs, elle est nécessaire. Mais, le marché n'est pas en demande de ce produit. On s'est renseigné également sur les labels écologiques. Il n'y en a pas vraiment un qui sort du lot. Ils restent des grosses boîtes noires dont le client est content de voir le logo. Pour le moment, fournir les explications concernant le produit est suffisant ; un label écologique n'est pas nécessaire. C'est de l'argile. Les gens ont du bon sens et savent lire une étiquette. Pour de l'argile, un label n'est pas forcément nécessaire.

Attia S. : J'ai travaillé en Suisse. Les Suisses pensent qu'il faut industrialiser les matériaux naturels. Est-ce qu'ils ont raison selon vous, de vouloir industrialiser ces produits ?

Nonet A. : Oui.

Attia S. : Mais, par l'industrialisation, on joue aussi le jeu du capitalisme. On pense quand même de plus en plus à industrialiser des solutions complètes, plus seulement un produit.

Nonet A. : Notre démarche est de pouvoir proposer un produit techniquement abouti, à un prix intéressant, pour ouvrir le marché. Si, pour cela, il faut passer par des labels, on le fera. On a été approché par une personne qui a un projet de pisé porteur ici, en Wallonie. Il voulait faire toute la logique du processus : extraction de la terre - qui devait idéalement être une terre recyclée d'un terrassement - afin de l'amender correctement, réalisation des essais, utilisation dans le projet, certification du CSTC et obtention d'un ATG. C'est un super projet. Nous, c'est ce qu'on veut faire à terme ; on ne veut plus utiliser l'argile de l'argilière mais les terres qui entrent chez Recybat. Mais, il y a énormément de paramètres à maîtriser et ça ne se fait pas du jour au lendemain. Il n'y a pas de miracle. Il faut savoir que tous les coûts de développement sont amortis par le ou les premiers clients. Si on ne veut pas avoir là un coût trop important, il faut pouvoir étaler cela de la manière la plus large possible. Pour l'étaler de la manière la plus large possible, il faut des filières qui soient garanties dans le temps. On doit pouvoir développer un produit et, pendant plusieurs années, le produire à base d'un stock qui va varier peu et dont on va maîtriser les paramètres. Si, chaque fois qu'un camion de terre arrive, on doit le mélanger, l'analyser, attendre le résultat puis seulement réactiver la filière en aval, ça ne fonctionne pas. Donc, ce qu'on propose, c'est qu'on est intéressé de développer une terre à pisé et qu'on peut le faire. A terme, on veut le faire avec une terre de

recyclage mais, dans un premier temps, ça ne peut être envisagé qu'avec l'argile de Wanlin. C'est bête de produire et de déplacer de la terre. Ça ne reste jamais que de la terre. Mais, on veut rester dans un environnement proche. On ne va pas faire comme Pretech, qui produit en Allemagne des pisés qu'il envoie au Japon. Ils vendent ça uniquement à une chaîne de bijouterie qui trouve que c'est magnifique et qui donc fait du pisé au Japon avec de la terre allemande. Ça n'a pas de sens mais, quand on ne se tracasse pas pour l'argent et pour sa responsabilité écologique, pourquoi pas ? Nous, on pense qu'il faut rationaliser et pouvoir faire ça de manière à assurer une continuité dans la qualité du produit. Pour le moment, l'extraction est la meilleure voie possible. Sinon, on a réfléchi au label oui, mais on ne se lance dans rien pour le moment. Par contre, quand il faut faire des essais, même de grande ampleur, pour valider les performances du produit, on y va. On passe beaucoup de temps à faire des essais avec le CSTC. A l'Université de Liège, on a fait des essais de résistance au feu. Ce sont des essais où l'on part chaque fois pour presque 10 000 euros de tests pour un bloc. Mais, si on veut construire une école par exemple, il faut s'assurer que ce soit résistant au feu pendant autant de temps. On a donc un beau papier avec un cachet. Il sera peut-être utile pour un projet mais, en attendant, on a le sentiment que c'est beaucoup d'argent et d'énergie dépensés pour une seule chose. Maintenant, il faudrait qu'on effectue de nouveaux tests, pour savoir si la capacité portante est garantie pendant un certain temps.

Attia S. : L'Union Européenne va forcer ses états membres, dès 2018 probablement, à avoir des déclarations environnementales - EPD - pour tous les produits. Donc, vous devrez le faire aussi. Je dis ça parce que Wienerberger vend aujourd'hui son produit en Belgique en annonçant qu'il est véritablement durable. On le voit également dans les magazines. Ils annoncent avoir augmenté la durabilité de leur produit. Quand on les contacte pour demander quelle est la différence avec le produit précédent, ils répondent que leur produit est simplement devenu plus épais. Cela signifie moins d'énergie consommée pour le client. Maintenant, j'aurai aimé voir un tableau comparatif, avec leur produit précédent et avec d'autres produits comme le vôtre.

Nonet A. : On pourrait même citer les différents produits de Wienerberger.

Attia S. : Voilà et votre brique Argibat. C'est ce qu'on cherche dans cette étude. Et si vous deviez estimer l'énergie grise de votre produit, vous avez une idée de chiffre ? On sera proche de zéro ?

Nonet A. : On est aux alentours de 50 kilowattheures par tonne. Si on choisit une terre cuite ou un béton, on se situe toujours au-dessus de 200. Après, il faut voir ce qui entre réellement dans le calcul. Considère-t-on

juste l'argile qui entre et la brique qui sort ou aussi l'extraction ? Pour la personne qui réalise des parements en béton, est-ce qu'il prend vraiment tout en compte : la production de granulats, la production de ciment, la production du bloc, etc ? S'arrête-t-il à mi-chemin ? Ce sont des chiffres auxquels on n'a pas accès. On ne sait pas ce que les autres mesurent. Il est facile de jeter des chiffres comme ça puisqu'il n'y a pas vraiment de norme derrière. On ne sait pas comment le calcul est effectué. Nous, on obtient ce chiffre là et c'est un chiffre qu'on obtient en prenant des marges. On pense qu'on est largement inférieur à cette valeur mais on doit pouvoir annoncer un chiffre dans lequel on croit, dont on ne doute pas.

Attia S. : Et si on parle du prix au mètre cube maintenant : vous avez une idée de la différence entre la terre crue et le béton par exemple ?

Nonet A. : Le prix va fortement dépendre du format. Quand on est sur des grands formats, qui sont prévus pour être mis en œuvre avec des prix de revient inférieur, on est dans le même ordre de grandeur. Ce n'est pas du tout un facteur 2 ou autres, seulement un petit pourcentage au-dessus ou en-dessous des autres produits.

Attia S. : Donc un mètre cube de blocs coûte plus ou moins combien ?

Nonet A. : Pour un mètre cube, on va être autour de 100 euros, plus ou moins. Un de nos commerciaux a réalisé un tableau en comparant un mètre carré de mur avec nos produits et d'autres produits. Il compare différentes techniques. Je peux essayer de vous le fournir.

Delvenne F. : Ce serait très intéressant.

Attia S. : Vous avez répété à plusieurs reprises que le prix joue un rôle important pour vous. Mais, si je reviens sur vos prix, ils sont comparables à ce qu'on trouve sur le marché. Quel est votre argument de vente alors ?

Nonet A. : Pour le même prix qu'un matériau dit « traditionnel », on a les performances de l'argile qui, elles, permettent d'améliorer le confort et de diminuer la consommation d'énergie. Donc, pour le même montant investi aujourd'hui dans le bâtiment, on a une qualité supérieure et des coûts d'utilisation moindres.

Attia S. : Donc, l'argument de la qualité.

Nonet A. : Typiquement, ce sont les paramètres qui permettent de vendre de l'argile aujourd'hui : la qualité et le confort. Les autres matériaux sont uniquement en train de se battre sur le prix. Si on choisit un plafon-

nage en plâtre traditionnel, il existe deux ou trois grands fabricants. Ils se battent uniquement sur le prix. Il n'y en a pas un parmi eux qui va dire que son plâtre est meilleur. Non, c'est la même chose, entre guillemets, la même solution de masse. Ils se battent donc sur le prix, la technique de mise en œuvre, la disposition en sols, la machine de production, les rendements et ce genre de choses. Nous, on a quand même un avantage qui est l'avantage technique de qualité.

Attia S. : Le responsable que nous avons rencontré chez IsoHemp nous a parlé de la manière dont il pouvait diviser sa clientèle entre les personnes qui cherchent une solution écologique et les personnes qui s'intéressent au coût. Il nous a dit que la majorité de sa clientèle se trouve être des auto-constructeurs. Les écologistes ne représentent que 5 ou 7 personnes maximum. Qu'en est-il dans votre cas ?

Nonet A. : Je ne saurai pas répondre parce que je n'ai pas une vue complète du marché. C'est la technique commerciale et la direction qui ont cette information. On s'adresse vraiment à deux secteurs. Historiquement, l'argile était réservée uniquement aux auto-constructeurs parce que c'est un matériau peu cher mais qui demande énormément de temps de mise en œuvre. On retrouvait aussi des personnes qui le choisissaient pour des raisons écologiques ou bien encore des raisons de frime : un matériau le plus cher possible, joli, mais toujours avec une philosophie derrière. Pourquoi cher ? Parce que les applicateurs devaient faire leur mélange sur place, faire des essais, trouver ce qui fonctionne, avancer, refaire du mélange, le mettre en œuvre etc. Donc, le marché se divisait entre ces deux segments. Nous, nous voulons pouvoir l'ouvrir un maximum. On s'adresse beaucoup au plafonneurs pour leur permettre de proposer un autre produit à leurs clients. Ainsi, quand on leur demande de remettre leur prix pour un chantier, ils peuvent proposer du plâtre à un tel prix du mètre carré ou l'argile, avec tous ses avantages, qui est dans la même fourchette de prix. Précédemment, si on parlait d'enduit à l'argile, il fallait compter de 60 à 100 euros du mètre carré. Maintenant, on peut mettre un enduit d'argile pour 20 euros du mètre carré sans soucis. C'est tout à fait comparable à du plâtre. Alors, évidemment, avec du plâtre mis en œuvre par des Polonais, on va encore pouvoir diminuer le prix. Pour le plafonneur, cela lui permet de remettre un prix correct avec lequel il va pouvoir vivre. Son enduit d'argile ne va pas coûter plus cher que du plâtre et le client est prêt à mettre ce prix là.

Attia S. : Vous mettez donc en avant la technique et vos prix comparables à ceux sur le marché.

Nonet A. : Voilà. On peut comparer le prix. Si on regarde globalement l'entièreté du mur, il faut compter la maçonnerie, le plafonnage et la pein-

ture. Honnêtement, on triche un peu parce que, généralement, le particulier va réaliser sa peinture lui-même. Elle va donc lui coûter 2 ou 3 euros du mètre carré au lieu des 15 demandés par le peintre. Si on prend l'entièreté des couches traditionnelles et l'entièreté des couches avec l'argile, on a un coût tout à fait comparable parce que c'est le plafonneur qui va pouvoir mettre l'enduit de finition.

Attia S. : J'ai une question. Je reviens sur l'industrialisation faite par PailleTech. Ils vendent une solution complète. Nous vivons dans une société où l'on veut une solution rapide et complète sans devoir se salir les mains. Je ne vois pas cette approche chez vous... Pourtant, je pense que ce genre de proposition est important. Chez IsoHemp, on a vu par exemple une matériauthèque avec une ossature bois, différents types de blocs de béton de chanvre, etc. C'est une approche, de vendre une solution complète, qui peut aussi ouvrir le marché. Il me semble aussi que les écologistes n'ont pas beaucoup de poids dans la société belge. Quel est votre avis sur cette idée de solution complète ?

Nonet A. : C'est dans cette démarche qu'on est en proposant tous les matériaux, du mur à la finition. Notre idée première était de recycler la terre qui entre dans les centres de recyclage. Donc, si on veut recycler la terre, il faut faire du volume. S'il faut faire du volume, il faut faire des murs et pour faire des murs, il faut faire des blocs. On s'est vite rendu compte qu'uniquement des blocs, ce n'était pas intéressant. Si on voulait pouvoir vendre quelque chose, il fallait un ensemble complet : les blocs, le mortier, l'enduit et l'enduit de finition. On a donc développé toute une gamme et on est en train de développer d'autres produits pour justement pouvoir compléter cette gamme de manière plus orientée vers les applicateurs. On veut leur faciliter la vie, éclaircir leur choix et faciliter la transposition par rapport aux techniques actuelles pour utiliser les enduits d'argile. Pour le moment, nos enduits ne passent pas bien dans les projeteuses des plafonneurs. Il faut faire son mélange à côté puis le mettre dedans. Pour le plâtre, on vient simplement craquer un sac au dessus de la machine, on se met au bout de la lance et on projette. Avec l'argile, ça ne fonctionne pas aussi bien. On est en train de travailler là-dessus. Il y a deux voies possibles : soit on travaille les enduits d'argile traditionnels, soit on travaille des produits révolutionnaires à base d'argile. On travaille actuellement les deux. Au niveau des produits révolutionnaires, on a été cherché des solutions écologiques et qui sont appliquées dans des domaines autres que la construction. On reprend ces technologies pour faire des produits qui vont nous permettre de nous différencier et de favoriser la mise en œuvre tout en conservant les performances de l'argile. Mais, sinon, la remarque est tout à fait pertinente et il serait intéressant de pouvoir montrer les diverses solutions.

Attia S. : Vous avez une recommandation pour un système de chauffage ?

Nonet A. : Si on part sur du passif, il ne faut pas prévoir de chauffage, juste une petite source de chaleur. C'est même un problème pour les développeurs de foyers bois : comment réaliser des foyers avec des puissances très faibles ? Parce que même quelques kilowatts peuvent s'avérer être de trop. On veut pouvoir faire une petite flambée, brûler deux ou trois bûches. Une bûche, c'est 2 kilowattheures. Si on fait un petit feu, qu'on brûle une, deux ou trois bûches, on envoie trop d'énergie dans l'habitation et c'est la surchauffe garantie. La solution est de répartir ça dans le temps. On peut donc partir sur des systèmes dans le style poêle de masse, donc un petit foyer, avec beaucoup d'argile autour. On ramène de la masse pour limiter la surchauffe et pouvoir en bénéficier longtemps. Typiquement, dans une maison basse énergie, si on brûle quelques bûches le soir, au moment où on a envie d'avoir ce sentiment de profiter de la flamme, il va encore faire chaud entre 24 et 48 heures.

Attia S. : Et les pellets ?

Nonet A. : Même problème, la puissance. On peut peut-être régler ça si on utilise vraiment de très petites quantités, pourquoi pas. Personnellement, les pellets, je n'aime pas parce que je trouve que prendre du bois, le mettre en forme, dépenser de l'énergie pour le chauffer pour le mettre en forme de granulés, le transporter...

Attia S. : Ça vient du Brésil.

Nonet A. : Oui, ils viennent de bien loin. Moi, j'aime autant trouver un producteur de bois local et me chauffer directement au bois. Maintenant, c'est une solution alternative entre les combustibles fossiles et le bois. Quand on a un poêle à pellets, on peut programmer le poêle pour qu'il fasse 21 degrés quand on rentre chez soi et pour qu'à 23 heures ou quand il n'y a plus personne dans la maison, il se coupe. C'est quelque chose qu'on ne peut pas faire avec un poêle à bois.

Attia S. : Et par rapport au passif ? Est-ce qu'on peut l'atteindre avec le chanvre ? J'aurai voulu connaître la composition de parois de la maison passive dont vous avez parlé tout à l'heure.

Nonet A. : Pour la première, on avait placé une isolation en polyuréthane.

Attia S. : Une solution écologique peut-être ?

Nonet A. : La paille.

Attia S. : Donc, pour arriver au niveau passif avec votre produit, vous nous conseillez une combinaison avec la paille ?

Nonet A. : Par exemple, oui. Avec le chaux chanvre, il faut une certaine épaisseur de mur. Les bâtiments dans lesquels on a atteint les meilleures performances étaient des rénovations de corps de logis en pierre et paille. On a reconstruit une ossature bois à l'intérieur du bâtiment. Elle supporte les étages, les planchers, est isolée à la paille et on retrouve un enduit d'argile au dessus. A certains endroits, on est passé par un panneau d'abord, pour des raisons de facilité. On place donc un panneau de type Fermacel sur lequel on vient enduire.

Delvenne F. : Et pour les cloisons intérieures ?

Nonet A. : On pouvait passer par nos blocs. A ce moment là, ce n'était pas les mêmes formats mais oui, soit une structure légère, soit les blocs.

Attia S. : Au niveau ressources, est-ce qu'il est possible de trouver des publications ? Vous nous avez parlé d'études ? Où peut-on les trouver ?

Nonet A. : Pas sur Internet, mais je peux vous fournir certaines choses.

Attia S. : Il n'y a aucun travail de fin d'études ?

Nonet A. : Comme étude, j'ai une étude thermique dynamique du bâtiment. Il s'agit d'une ossature bois, une construction complète neuve.

Delvenne F. : Est-ce que vous auriez une référence de construction ? Cela m'intéresserait de pouvoir étudier un bâtiment réel.

Nonet A. : Le choix du bâtiment est toujours un peu compliqué parce que l'architecture va changer beaucoup et l'usage aussi - un certain nombre de chambres, de grandes pièces dans ou en dehors du volume chauffé. Ce choix pose toujours problème. Il faut se fixer des choses et partir sur un bâtiment relativement standard pour avancer.

Attia S. : Pour l'étude paramétrique de Florence, on va prendre une même maison et modifier les techniques de construction soit : une ossature bois avec des blocs de béton de chanvre, le système PailleTech, une ossature bois avec de la cellulose et une solution impliquant de l'argile. On souhaite retrouver de l'enduit dans la paroi, pas uniquement comme enduit de fi-

nition. Qu'est-ce que vous nous conseillez ? Au niveau cloison, le choix est facile mais qu'en est-il à l'extérieur ?

Nonet A. : Il y a la solution de faire un pisé porteur. Nous, on va préparer des mélanges. Il y a un projet de Cédric Evrard, qui travaille à l'Université Catholique de Louvain, sur le site de Tournai, qui vise à réaliser un bâtiment en pisé porteur. C'est donc du pisé extérieur avec érosion contrôlée. Il s'agit d'un bâtiment pour lequel il a déposé les permis d'urbanisme. Son frère, Arnaud, travaille à l'Université Catholique de Louvain à Architecture et Climat. Il passe son temps à simuler des bâtiments d'un point de vue thermique, hygrométrie, etc.

Attia S. : Je connais Arnaud, nous avons travaillé dans le même bureau pendant 4 ans. Il est à présent en Autriche où il va rester une année.

Nonet A. : C'est le bâtiment de leurs parents qu'ils vont construire en pisé porteur.

Attia S. : Vous nous conseillez donc le pisé plutôt qu'un bâtiment avec vos blocs ?

Nonet A. : On ne le conseille pas tout simplement parce que c'est quelque chose qu'on ne maîtrise pas encore. Mais, on met les pieds dedans.

Attia S. : Mais, on recherche un quatrième cas d'étude autour d'Argibat. On veut baser notre calcul sur l'argile qui provient d'ici. On essaye de réaliser une paroi basée sur votre brique.

Nonet A. : Pour faire quelque chose entièrement en argile ?

Attia S. : Ça ne doit pas être purement en argile mais il doit dominer. Est-ce que vous avez une solution à nous proposer ?

Nonet A. : Avec une visée passive donc. On va réfléchir un peu aux différentes solutions et voir ce qui est le plus cohérent pour pouvoir aller au bout de la démarche.

Attia S. : Je n'ai plus de questions alors.

Nonet A. : Au niveau du déroulement du travail, comment est-ce que ça se passe ?

Delvenne F. : Ici, je ne suis pas vraiment dedans. Je fais plutôt des recherches. C'est à partir de février que la quasi-totalité de mon temps sera

consacrée à ça. A ce moment là, le plus gros du travail va être l'encodage dans le logiciel mais il faut d'abord que je définisse chaque maison, explique chaque type de construction. Le but est d'écrire d'abord un état de l'art. Je vais expliquer le fonctionnement de chaque construction. Puis, une fois l'inventaire réalisé, je vais entrer dans le logiciel. Il me faut beaucoup de détails, une idée de chiffres etc. Ensuite, même chose pour ce qui est des coûts. C'est par contre simplement une feuille Excel avec un minimum de calculs. Je vais déterminer le coût, les remplacements en fonction de la durabilité des matériaux. Je vais donc avoir une idée des coûts à la construction et pendant l'utilisation.

Nonet A. : Je réfléchis en me disant qu'en fonction du choix du système de construction, on peut soit décider d'aller jusqu'au gros œuvre fermé et décider le restant ne change plus rien, soit aller plus loin parce que le système constructif peut peut-être influencer le choix des derniers éléments. Est-ce vraiment le choix d'un bâtiment complet jusqu'à la pose de technique et de tout ce qui va avec ?

Delvenne F. : Dans l'idéal, j'aimerais que ça soit le choix. Ça dépend de la vitesse à laquelle j'arrive à récupérer toutes les informations.

Attia S. : Pour nous, ce n'est pas difficile d'entrer dans une simulation thermique. Mais, on essaye vraiment d'explorer les systèmes constructifs, donc je crois que c'est plus simple de fixer les paramètres correspondant au passif.

Delvenne F. : Le but n'est pas de faire une simulation énergétique de chaque bâtiment.

Attia S. : On se concentre davantage sur le volume, le type de matériaux et le système constructif.

Delvenne F. : L'idée est de récolter les données du producteur local parce qu'autrement, je peux tout trouver dans les bases de données déjà établies. Je veux me concentrer sur une production belge et locale.

Attia S. : Avec une méthodologie européenne.

Nonet A. : Chez nous, on peut maîtriser tout ce qui est argile. Mais on a des intrants, des sables et des pigments. Ça entre à l'échelle du pour cent dans la fabrication des enduits mais qu'est-ce qu'il se cache derrière ?

Attia S. : Voilà. Nous, on veut pouvoir faire un comparatif. On ne s'intéresse pas aux chiffres précis. Je crois que ça va générer une discussion très

riche. Moi, je n'ai pas d'autres questions et toi ?

Delvenne F. : Non, pas pour l'instant.

Nonet A. : Moi, je vais essayer de remettre la main sur les différentes études qui peuvent être intéressantes.

Delvenne F. : Merci beaucoup !

Nonet A. : On peut aller jeter un coup d'œil à nouveau dans l'usine. Il y a peut être des choses qui sont en train de bouger. On voit l'extrudeuse qui est entièrement montée. On peut voir au-dessus, dans le miroir, l'argile qui est en train d'arriver. On voit aussi que ce sont deux vis qui prennent la matière. L'argile commence à arriver dans la filière. On est maintenant dans la phase de réglage. Il boucle donc. On est en train de faire le vide dans la partie intermédiaire. Donc, au début, on avait quelque chose qui était toujours très souple. Ici, cela devient de plus en plus cassant. On a quelque chose de mieux compacté. Si je faisais des tests en laboratoire maintenant, on verrait que ce qu'ils laissent passer a exactement 14 % d'humidité. Ils le sentent rien qu'en le touchant et en réglant les vannes. Ils ont l'air satisfait, donc on va passer aux réglages suivants. On voit ici que la première ligne va être prête (Figure 7.18). Donc ici, il va venir tout chercher et avancer tout d'un cran. Évidemment, il faut que la suivante arrive pour que le cycle se fasse. Il y a en permanence deux opérateurs : un qui travaille au niveau de l'extrudeuse et un qui donne un coup de main, approvisionne la terre à l'entrée et surveille le processus.



FIGURE 12.18 – Production des galets d'argile utilisé par Mobic dans le système ArgiMob

Attia S. : Comment est-ce que Mobic est parvenu à cette idée ?

Nonet A. : Ils ont commencé à produire eux-même de petits cylindres. Ils ont déposé un brevet d'ailleurs, je pense, pour ça. Puis, il se sont rendus compte que la production n'est quand même pas évidente. C'est comme ça qu'on s'est retrouvé à les produire pour eux. On a un outil tout à fait adapté et c'est notre métier. Leur métier n'est pas de produire des éléments d'argile mais des éléments de maison. Voilà, on a fait tout le tour comme ça.

Attia S. : Merci beaucoup.

Delvenne F. : Merci beaucoup pour la visite et pour le temps que vous nous avez accordé.

12.13 Interview 4 - Représentant de l'entreprise Mobic

Cette interview est réalisée le vendredi 27 novembre 2015, au sein du site de fabrication de l'entreprise Mobic. Sont présents Monsieur MOUTSCHEN Jean-Philippe (responsable commercial Belgique), Monsieur ATTIA Shady et moi-même.

Delvenne F. : Je suis ici dans le cadre de mon mémoire que je réalise à l'Université de Liège. Le but de ce travail est de comparer une construction traditionnelle, de type blocs de béton - isolant - briques avec des constructions écologiques c'est-à-dire une construction en paille, une en argile, une en béton de chanvre et donc une en bois. Je me limite au secteur résidentiel et j'ai choisi uniquement des entreprises locales. Cette comparaison se fait donc grâce à une analyse du cycle de vie et un étude du coût du cycle de vie.

Moutschen J.-P. : Et le critère de base est une même performance énergétique je suppose, conforme à la PEB actuelle ?

Delvenne F. : Non, une maison passive.

Moutschen J.-P. : Une maison passive, donc pas le critère de conformité à la PEB. Et, dans votre analyse du coût de la construction, vous analysez seulement le système constructif ou bien la maison clé sur porte ?

Delvenne F. : C'est encore à définir parce que si j'amène le même système, pour atteindre les mêmes performances, est-ce que cela vaut vraiment la peine de le faire ?

Attia S. : Oui, on va peut-être avoir un système commun et essayer d'éviter tout ce qui est finitions...

Moutschen J.-P. : Ce qui m'arrangerait car je ne m'occupe pas de tout ça.

Delvenne F. : Non, bien sûr.

Attia S. : On sort de ça et on laisse une certaine liberté dans le projet. Ce qui nous occupe, c'est de savoir comment on peut avoir un système qui tient, qui est solide, qui est conforme à l'exigence passive mais, en même temps, avec une variation de matériaux. Mais, en tous cas, le bois rentre dans la construction en paille et est aussi présent dans la construction en béton de chanvre...

Delvenne F. : Dans celle en argile aussi.

Moutschen J.-P. : Le système en paille, je connais bien. Pour les systèmes chanvre et argile, qu'est-ce que vous définissez ? Un système poteaux poutres remplis d'argile ? Comment est-ce que vous envisagez ça ?

Delvenne F. : Pour l'argile, on réfléchit encore. Je suis allée chez Argibat et ils m'ont parlé du projet qu'ils réalisent en collaboration avec vous, cet argile sous forme de galets. Du coup, je ne sais pas trop quoi envisager parce que le but est tout de même de différencier le projet en bois du projet en argile.

Moutschen J.-P. : L'argile n'est pas un isolant. L'argile amène de l'inertie. Donc si vous choisissez un système constructif en argile, ça ne contribue pas à rendre la paroi passive.

Delvenne F. : C'est pour ça que j'aurai voulu éviter tout ce qui est paille, argile et chanvre. Pour pouvoir dire que j'ai un projet qui est différent et avec beaucoup plus de bois que les autres. Maintenant, je ne sais pas si c'est possible.

Moutschen J.-P. : Attendez, je n'ai pas suivi votre raisonnement.

Delvenne F. : Le but est de ne pas retomber dans quelque chose que j'aurai déjà, de trouver un système différent.

Moutschen J.-P. : Un système en paille, c'est un poteaux-poutres rempli de paille. La paille reste de l'isolant. Un système en ossature bois est un poteaux-poutres aussi, même si les poteaux sont plus petits, auxquels on ajoute une isolation et, nous, sur laquelle on ajoute de l'argile pour amener de l'inertie pour être conforme à la PEB actuelle. A partir du début de cette année, on doit tenir compte du facteur d'inertie dans un bâtiment. Une construction en argile est une construction en blocs d'argile sur lesquels on ajoute un isolant. Donc, là, il n'y a pas besoin de bois. La construction en chanvre, ça je ne connais pas.

Delvenne F. : Les blocs de chanvre servent d'isolation.

Moutschen J.-P. : Donc, c'est un poteaux-poutres à nouveau et c'est le chanvre qui sert d'isolation.

Delvenne F. : Oui.

Moutschen J.-P. : Mais c'est une ossature aussi finalement.

Attia S. : Et la difficulté dont on a discuté la semaine dernière lors de la visite d'Argibat, c'est qu'on ne peut pas réellement avoir une construction en argile mais on peut avoir une augmentation maximale de l'argile dans le bâtiment. Par exemple, on peut en mettre au niveau des cloisons intérieures mais, l'argile n'est bien évidemment pas un isolant. Argibat a même créé un produit perméable d'argile. Ils essayent aussi de travailler avec Isohemp - l'entreprise de blocs de béton de chanvre - pour créer une paroi passive qui n'existe pas aujourd'hui.

Moutschen J.-P. : Argile et chanvre donc.

Attia S. : Mais ça n'est pas encore véritablement mis en œuvre. Les solutions que nous a proposées le responsable recherches et développement d'Argibat, c'est un mur intérieur d'argile et une solution chanvre - argile à l'extérieur avec un bardage. Mais, avec cette composition, on n'atteint pas l'exigence passive. Il a été très critique en ce qui concerne le passif. On a défendu ça en disant que ce n'est pas un choix commercial mais plutôt un choix que, d'ici 2020, la Région Wallonne va adopter. C'est déjà fait à Bruxelles. C'est donc une étude qui prévoit aussi ce qu'on peut avoir et exiger dans un futur proche afin de donner des informations aux gens. Dans la pratique, votre remarque est pertinente. L'ossature bois et la construction en paille sont des systèmes très clairs, l'argile et le chanvre moins. Pour le chanvre, on peut mettre en œuvre une ossature bois aussi. On ne peut par contre pas avoir une construction en argile sauf si on en fait un béton. En France, il existe un béton argileux. On crée donc une construction poteaux-poutres - béton d'argile qui permet d'obtenir des murs non perméables à l'eau à l'extérieur. Il faut un bardage en plus de ça et une isolation importante pour arriver à la valeur U qu'on souhaite atteindre (0,15) qui risque de dépasser la paille en terme d'épaisseur.

Moutschen J.-P. : Je peux vous aider. Je peux même y consacrer des ressources. Je peux demander à Julien qui est notre responsable PEB de suivre le projet avec vous. L'idéal, ce serait d'avoir un plan, je pense, pour avoir une base de travail. Je pense que vous pouvez en trouver n'importe où, même en allant sur Blavier. Ça n'a pas d'importance finalement. Au plus simple il sera, au plus facile ce sera puisque l'idée n'est jamais que de comparer. Il faut un rectangle, une hauteur sous corniche et une toiture deux pans... Enfin me semble-t-il. Si c'est vous qui réalisez l'architecture, vous allez tout compliquer. J'en ai mais, quelque part, je pense que c'est plus intéressant de partir d'un projet d'une autre entreprise et de le soumettre à l'ensemble des entreprises. C'est plus simple à mon avis. Sur cette base là, ce qu'on pourra vous fournir, c'est la composition du mur. Il faut réaliser une

ossature bois avec de la cellulose puisque c'est ce qu'on utilise le plus comme isolant. Sinon, on peut faire une laine de verre ou une laine de roche, mais la cellulose est mise de manière industrielle chez nous. Il faut atteindre la performance et le critère passif, donc savoir quels sont les techniques mises en place pour réaliser les étanchéités à l'air, le coût de la construction. Vous ferez ensuite une analyse du cycle du bois, du circuit court... avec Julien. C'est son métier chez nous, donc il fera ce suivi-là avec vous si ça vous convient.

Delvenne F. : C'est exactement ce qu'il me faut oui.

Moutschen J.-P. : Je pense que, pour travailler, il faut une base c'est-à-dire un plan. Ce sera à mon avis plus simple que vous choisissiez le modèle de bâtiment.

Delvenne F. : Oui. Disons qu'ici, j'essaye de glaner un maximum d'informations, d'avoir un contact avec tout le monde, avant de pouvoir commencer le travail en tant que tel.

Moutschen J.-P. : Ok. Si vous avez besoin de commencer maintenant, je peux appeler Julien. Mais, sans base de plans...

Delvenne F. : Non, c'est encore trop tôt pour l'instant.

Attia S. : Je peux peut-être vous faire une demande personnelle, par curiosité? J'ai plusieurs choses à faire dans mon laboratoire. J'ai un projet pour lequel je travaille avec le CTSC sur la rénovation en bois. C'est un projet bruxellois. Il y a aussi une thèse de doctorat qui débute en janvier. Un étudiant va travailler sur la densification des villes via la construction d'étages supplémentaires en construction légère. Donc, le bois est un élément important dans ce type de construction. Donc, ça fait déjà deux projets autour du bois dans la recherche. D'un autre côté, je donne les cours de Techniques de construction des bâtiments en première année de bachelier et un cours d'atelier en troisième année de bachelier. Dans le premier, j'enseigne tout ce qui est en rapport avec les techniques de construction. Ils doivent réaliser un travail pratique qui consiste à réaliser un modèle 3D, un détail technique grandeur nature d'un type de construction. Donc, ce serait intéressant s'il était possible d'avoir des échantillons. J'essaye de créer une matériauthèque aussi complète que possible. En ce qui concerne l'atelier, les étudiants doivent concevoir un logement collectif Cradle to Cradle ou régénératif. Il s'agit de 15 appartements. La plupart des étudiants ont commencé avec des constructions en béton, en acier etc. avant de réaliser que ce n'est pas durable du tout. Ils tendent donc à modifier leurs projets en se dirigeant vers la paille, les blocs de chanvre, la brique et la plupart

ont choisi l'ossature bois. Personnellement, je n'arrive pas à leur dire d'où vient ce bois. J'aimerais connaître la situation, le marché belge. Donc, j'aimerais comprendre facilement d'où vient la majorité des bois utilisés ici mais aussi connaître les traitements etc. J'ai la même question pour la cellulose, puisque c'est le matériau le plus important dans ce type de paroi en terme de volume. Et dernière chose, hier, un étudiant souhaitait choisir un bardage en briques Wienerberger pour son ossature bois. Il m'a demandé comment ce type de structure tient...

Moutschen J.-P. : Des briques collées ?

Attia S. : Non, il veut un mur en briques. Je ne suis pas capable de lui répondre parce que je ne comprends pas comment fonctionne ce système hybride briques - ossature bois.

Moutschen J.-P. : La structure en bois est une structure portante. L'ossature comme on l'utilise chez nous, c'est le principe d'un assemblage de poteaux. C'est un poteaux poutres sauf que les poteaux sont plus petits. Les poteaux sont assemblés entre deux lisses, une lisse haute et une lisse basse, qu'on stabilisent avec un panneau. Le panneau est un voile travaillant. En général, c'est un OSB qui va se trouver sur le côté intérieur, qui est le voile travaillant. Il permet de diffuser la charge sur l'ensemble des poteaux. A l'intérieur de ce mur, on place un isolant. On choisit l'épaisseur du mur en fonction de la performance qu'on veut atteindre. On ferme côté extérieur avec un panneau de fibre de bois, ouvert à la vapeur d'eau. Si, à un moment donné, on laisse passer de la vapeur d'eau au travers de la cloison de manière accidentelle, la panneau de fibre de bois permet qu'elle s'évacue par l'extérieur et donc le point de rosée n'est pas atteint dans l'isolant. C'est le principe du sandwich. En hiver, on observe une différence de pression et une différence de température qui amène une migration de la vapeur. La différence dans ce système porteur par rapport à d'autre, c'est que l'isolant est emprisonné dans l'ossature et qu'on doit gérer la vapeur d'eau. A coté de ça, on a toujours une lame d'air côté extérieur. C'est le même principe qu'en maçonnerie. Ensuite, on a une brique rapportée. Au lieu d'avoir des crochets qui sont déjà insérés dans la brique, ce sont des crochets vissés dans les panneaux puisque la brique se tient toute seule. Excepté ça, le système est le même.

Attia S. : Et si je veux mettre un panneau Cellit, pour avoir une étanchéité à l'eau du côté extérieur, pour remplacer votre panneau ?

Moutschen J.-P. : Le panneau Cellit est un panneau de fibre de bois, étanche à l'eau.

Attia S. : Et je peux le placer à l'extérieur ?

Moutschen J.-P. : C'est comme ça qu'il est posé, oui. Nous, on n'utilise pas de panneaux Cellit parce que ce sont des panneaux qu'on ne sait pas mettre sur notre ligne robotisée. On utilise un autre panneau mais c'est le même principe.

Attia S. : Mais il est aussi étanche à l'eau ?

Moutschen J.-P. : C'est aussi étanche à l'eau oui.

Attia S. : Comme ça, on a créé la paroi. Maintenant, à l'extérieur, on a la liberté d'avoir plusieurs revêtements ?

Moutschen J.-P. : Si vous placez une brique, vous faites une coulisse ventilée comme en maçonnerie et puis vient la brique.

Attia S. : Et on peut monter des étages ? Ça tient ?

Moutschen J.-P. : Les crochets qu'on utilise dans la brique sont justement là pour empêcher, lors du montage, que la brique ne tombe.

Attia S. : Et les crochets seront fixés dans ce panneau ?

Moutschen J.-P. : Voilà, les crochets, au lieu d'avoir des crochets qui sont mis dans la maçonnerie, ce sont des petits plats qui sont vissés sur l'ossature. On appelle ça des crochets à visser. Ce sont des petites languettes. C'est un système très courant, tous les maçons utilisent ça.

Attia S. : Comme ça le maçon peut continuer à monter, la languette va tenir les briques. Et on monte avec le même mur jusqu'au quatrième étage ?

Moutschen J.-P. : Voilà, c'est aussi simple que ça. C'est exactement l'équivalent de la maçonnerie. Quant à l'approvisionnement de bois, nous avons notre propre scierie. Nous scions notre production. La scierie est à Etalle, à Arlon, et on est labellisé *Bois Local*. Le bois qu'on travaille dans notre scierie provient de plus ou moins 100 à 200 kilomètres autour de la scierie, donc essentiellement des Ardennes belges et allemandes.

Attia S. : Et il s'agit de quel type de bois ? De quelle espèce ?

Moutschen J.-P. : On travaille du résineux, de l'épicéa. Le bois est découpé et séché à la scierie puis il est envoyé ici où il va être raboté en longueur puis usiné et traité par aspersion dans notre cabine. Tout ce

qu'on utilise comme approvisionnement est du bois local et certifié PEFC. Par contre, il y a des panneaux que nous ne fabriquons pas. Les panneaux d'OSB par exemple sont fabriqués chez Norbord Sterling, une usine à Gand. Les panneaux de fibres de bois posés côté extérieur sont fabriqués en Belgique aussi. Le seul produit qu'on importe vraiment, c'est la cellulose, qui vient d'Autriche. Les plus grands fabricants de cellulose sont en Autriche et en Allemagne.

Attia S. : Vous êtes très régional. Vous n'avez pas cherché ou trouvé un isolant qui va avoir de bonnes performances et être de provenance locale ?

Moutschen J.-P. : C'est toujours difficile de faire un prix industriel quand on a un produit qui n'est pas compétitif sur le marché. Soit on fait de la laine de verre et de la laine de roche ou on va vers des isolants plus performants type polyuréthane, polystyrène extrudé etc. Mais vous ne voulez pas ça non plus. Ou alors on va vers un produit qui a une connotation écologique, c'est la cellulose. L'idée est d'utiliser des journaux, du papier recyclé, pour faire un produit isolant. Il n'y a pas vraiment de fabrication en Belgique ou le seul fabricant qui existe pour l'instant en Belgique le fait en petits ballots. Or, nous avons besoin de grands ballots, qui ne sont fabriqués qu'en Allemagne ou en Autriche. Le fabricant belge fait donc des petits ballots. Pour la machine qu'on a, qui est un gros volume, on a besoin d'avoir des ballots de 250 kilogrammes. Eux ne font pas ça. On est bien obligé de s'approvisionner là où on fait ce grand ballot. Donc, il vient d'Autriche. Maintenant, la cellulose est un produit qui va disparaître puisqu'il est fait avec des journaux recyclés et qu'on en utilise de moins en moins. Donc, forcément, le produit va s'essouffler à un moment donné. Je n'ai pas une préférence particulière pour la cellulose. Il se trouve que c'est un produit avec une bonne connotation en terme de recyclage, assez facile à industrialiser en usine puisque c'est un robot qui fait l'insufflation en usine dans notre ligne. Donc c'est un produit avec des performances intéressantes. Mais je cherche aussi à trouver d'autres isolants, des isolants que je peux considérer comme étant raisonnables pour la production industrielle. La paille n'est pas un produit raisonnable pour une production industrielle. C'est un système d'isolation marginal. Il y a une entreprise belge, PailleTech, qui est spécialisée là-dedans. C'est un marché niche qui correspond à 5 ou 10 bâtiments par an pour lesquels ils ont l'exclusivité puisqu'ils sont pratiquement les seuls à le faire. Je n'ai pas d'intérêt à aller sur ce marché là. Je ne pense pas que je vais pouvoir industrialiser le concept et, personnellement, je ne suis pas du tout convaincu par la paille. A partir du moment où la production de paille devient industrielle, elle perd sa connotation écologique et donc ça n'est plus intéressant. Qu'est ce qu'il y aurait d'autre comme isolant ? Je n'en connais pas beaucoup...

Attia S. : La fibre de bois ?

Moutschen J.-P. : Alors, la fibre de bois... De nouveau, les usines qui proposent la fibre de bois ne sont pas en Belgique. L'inconvénient de la fibre de bois par rapport à la cellulose, c'est le foisonnement de l'isolant dans la cloison. Sa structure amène à un tassement assez conséquent. On a aussi du tassement dans la cellulose mais on en a beaucoup plus avec la fibre de bois. Or, nous, depuis l'usine, on doit encore transporter les murs isolés sur chantier. On est donc déjà obligé de mettre une densité supérieure quand on travaille en cellulose pour éviter le tassement. Ce serait encore plus catastrophique si on le faisait en fibre de bois ; la quantité de fibre de bois qu'on doit injecter dans le mur n'amène plus une connotation écologique puisqu'on doit en mettre beaucoup plus qu'on ne le ferait sur chantier. C'est pour ça que la fibre de bois n'a jamais vraiment pris. Il y a des gens qui soufflent de la fibre de bois mais ça reste très marginal par rapport à la cellulose puisque les phénomènes de tassement sont moins maîtrisés. Notre machine permet de faire de la cellulose et de la fibre de bois mais les tentatives en fibres de bois n'ont pas fonctionné. On a même essayé la laine de verre et la laine de roche insufflées mais ça ne fonctionne pas non plus. Il y a aussi le chanvre. C'est encore un peu marginal pour le moment et on ne sait pas l'industrialiser non plus. L'entreprise EcoChanvre fait ça mais ça reste quand même très artisanal pour le moment. Pour l'instant, on part plutôt vers des isolants de type billes de polystyrène. Contrairement à beaucoup d'autres isolants, la façon dont on sait les fabriquer, les recycler mais aussi leurs performances sont intéressantes. Dans l'analyse globale du cycle de vie de l'isolant, on trouve que ce n'est pas un produit inintéressant. La piste est à explorer en tous cas. On ne le fait pas encore mais on est en train de regarder si on ne peut pas insuffler de billes de polystyrène graphité dans les murs. Le problème de la cellulose, c'est qu'elle n'est pas percolante. Quand on a des problèmes d'infiltration d'eau dans une cloison, ce qui pourrait arriver de façon accidentelle, on a des dégâts qui sont un peu compliqués à gérer.

Attia S. : Et par rapport à la cellulose, qui sera une composante importante dans ce cas d'étude, est-ce qu'une analyse du cycle de vie a déjà été faite ?

Moutschen J.-P. : Je pense qu'on pourra sans problème se tourner vers le fabricant autrichien pour avoir des informations sur ce sujet.

Attia S. : Du point de vue volume, c'est bien la cellulose le plus grand volume ?

Moutschen J.-P. : Oui. Elle représente 85 % de l'ossature.

Attia S. : Et au niveau du bardage, quelle est votre proposition ?

Moutschen J.-P. : Moi je m'occupe de la structure portante. Donc, les deux panneaux qui emprisonnent la cellulose avec l'échelle de bois, la contre-latte technique côté intérieur et la plaque de plâtre posée côté intérieur. Tout cela se fait en usine parce que, dans cette contre-latte technique, il y a de l'argile qu'on intègre pour amener de l'inertie. On ne va peut-être pas parler d'argile pour ne pas amener de confusion. Ça ne rentre pas dans la performance en terme d'objectif à atteindre pour la bâtiment passif mais c'est nécessaire normalement pour être conforme à la PEB.

Attia S. : Vous pouvez nous conseiller de prendre quel bardage ou quel finition ?

Moutschen J.-P. : Ça n'influence pas la performance du bâtiment en terme de résultat passif. C'est tout à fait libre.

Attia S. : Est-ce que vous avez des clients qui vous demandent une solution complète ?

Moutschen J.-P. : Non. Mobic est un fabricant industriel d'ossature bois. Nos clients habituels sont des promoteurs, des professionnels, des architectes, qui viennent chez nous pour acheter la structure. J'ai aussi des particuliers mais ce sont des particuliers qui viennent directement à l'usine, qui ont un architecte et un projet à réaliser. Ils veulent une ossature et nous l'achètent en direct. Ils engagent chacun des corps de métier eux-mêmes ou veulent faire le reste en auto-construction. Cela représente à peu près 50 bâtiments faits par an. Pour le reste, ce ne sont que des professionnels qui viennent acheter la structure chez Mobic comme vous iriez chez Echo pour acheter des hourdis ou chez un marchand de tuiles pour acheter des tuiles. Maintenant, par rapport à la performance de la cloison, on pourra vous dire quelle épaisseur d'isolant est nécessaire pour être conforme aux bâtiments passifs.

Attia S. : Cela ferait combien de centimètres selon vous ?

Moutschen J.-P. : Actuellement, pour être conforme à la PEB, il faut mettre 18 centimètres. Pour être passif, je pense qu'on est à un eu plus de 30 centimètres. Ça sera confirmé par la personne qui vous suivra, Julien.

Attia S. : Par rapport aux couches qu'on retrouve dans cette ossature, on aura une couche d'étanchéité à la vapeur ?

Moutschen J.-P. : Donc, de l'extérieur à l'intérieur, vous allez avoir

un pare-pluie...

Attia S. : Un pare-pluie en EPDM ?

Moutschen J.-P. : Non. On va avoir un pare-pluie respirant comme on place en dessous des tuiles. C'est un panneau de fibres de bois, l'équivalent d'un Cellit. Puis on retrouve une structure en bois avec une profondeur fonction de la performance à atteindre, un panneau OSB précédé d'un pare-vapeur, une contre-latte technique, l'argile et une plaque de finition.

Attia S. : Le pare-pluie vient de Belgique ?

Moutschen J.-P. : Oui, il est fabriqué en Belgique.

Attia S. : En quel matériau ?

Moutschen J.-P. : Le pare-pluie, c'est un film de polyéthylène, comme ce qu'on trouve dans les toitures.

Attia S. : Et l'alternatif du Cellit s'appelle comment ?

Moutschen J.-P. : C'est le RWH.

Attia S. : Qui le produit ?

Moutschen J.-P. : Spanotech, en Belgique.

Attia S. : C'est belge aussi. Quel matériau est-ce ?

Moutschen J.-P. : C'est de la fibre de bois, l'équivalent du MDF sauf que les liants qui sont utilisés sont un peu différents pour amener de l'étanchéité.

Attia S. : Pour l'analyse du cycle de vie, où est-ce qu'on peut trouver des informations ?

Moutschen J.-P. : Je peux vous donner les coordonnées des fabricants. Vous pouvez les contacter pour voir s'ils ont des informations sur le cycle de vie. Les panneaux RWH, c'est de la fibre de bois, c'est assez facile. Les panneaux OSB, ce sont des copeaux entrecroisés assemblés par un liant. J'imagine que, chez Spanotech ou Norbord Sterling, ils doivent avoir des informations sur le cycle de vie.

Delvenne F. : Autrement, il y a des bases de données. Je voulais vraiment, pour ce qui est de la structure spécifique, prendre les informations du producteur belge. Le reste, je peux aller voir dans des bases de données européennes. Sinon, si je dois tout chercher, je n'aurai toujours pas commencé mes calculs au mois de juin.

Attia S. : Et si demain, l'Union Européenne impose une limite d'émission à ne pas dépasser par mètre cube de matériaux produits, êtes-vous prêt à dire combien de kilogrammes de dioxyde de carbone sont émis pour votre production ? Avez-vous ce chiffre ?

Moutschen J.-P. : Il faut distinguer deux choses. Il y a le produit mis en œuvre et la production. La quantité de dioxyde de carbone qui est dégagée dans la fabrication du bois reste très réduite. Que ce soit pour la fabrication des panneaux ou des montants, finalement, la quantité d'énergie utilisée pour les mettre en œuvre est très réduite. Par contre, par rapport au matériau en lui-même, il est toujours neutre dans la production de dioxyde de carbone puisque le bois a la particularité de faire de la photosynthèse. Dans sa croissance, il va absorber du dioxyde de carbone pour grandir. On va le mettre en œuvre et, quand on va le décomposer, il ne va faire que libérer le dioxyde de carbone qu'il a absorbé. C'est le contraire des énergies fossiles : on va chercher dans le sol de l'énergie fossile et on ramène du dioxyde de carbone à la surface. Donc, tout le monde est d'accord pour dire que le bois est globalement neutre. C'est justement tout l'intérêt.

Attia S. : Je trouve que la relation avec la dalle est toujours difficile. Quelle est le concept de votre dalle ?

Moutschen J.-P. : On travaille en plate-forme. La première plate-forme du rez de chaussée est une plate-forme en maçonnerie. Le maçon fait exactement la même chose que ce qu'il aurait fait pour un autre bâtiment, c'est-à-dire soit des hourdis soit une dalle en béton. Sur cette dalle, on va venir poser une feuille d'étanchéité pour éviter les remontées d'eau et une sablière d'ancrage. C'est donc un bois qui va être mécaniquement fixé dans la fondation puisque la contrainte de l'ossature bois est l'arrachement, comme on est sur une structure légère. Cette sablière est une sablière autoclavée : c'est un bois traité à cœur. Dessus, on va venir poser la structure du mur préfabriqué. La seule contrainte qu'on a par rapport aux fixations dans la maçonnerie, c'est la contrainte d'arrachement et donc la quantité d'ancrages qu'on va poser dans la sablière. La deuxième contrainte, c'est de rattraper les différences de tolérance qu'il y a entre la maçonnerie et l'ossature. En maçonnerie, la précision est de l'ordre du centimètre alors qu'en menuiserie, la précision est de l'ordre du millimètre. Donc, on va aller relever la dalle avec une station de géomètre pour donner les points de calage à nos mon-

teurs qui vont simplement rattraper le niveau pour poser la sablière. Mais, l'association des deux est un concept qui fonctionne assez bien.

Attia S. : Comme ça, on monte avec les murs et on va créer chaque étage. Vous faites aussi des dalles en bois ?

Moutschen J.-P. : Le plancher, ça va être une plate-forme en bois, sur les murs du rez de chaussée. On va poser la structure portante en lamellé-collé entre laquelle on retrouve des poutres de plancher et des panneaux OSB. C'est l'équivalent du mur, sans l'isolation. Sur cette plate-forme de plancher, on va monter les murs de l'étage. On travaille donc en plate-forme et pas en système Balloon. Les planchers sont posés sur les murs et puis les murs sur les planchers et ainsi de suite jusqu'à la charpente.

Attia S. : Il n'y a aucune poutre ? Le plancher est un élément totalement homogène ?

Moutschen J.-P. : Il y a une poutre périphérique portante. Le plancher se trouve dans cette épaisseur.

Attia S. : Et on peut arriver jusqu'à combien de portée ?

Moutschen J.-P. : La portée est limitée par la hauteur de la poutre. En général, dans des maisons unifamiliales, on est sur des portées de 4 à 6 m dans des pièces. Maintenant, si les portées sont plus importantes, tout est possible. La seule contrainte, c'est que l'épaisseur du plancher va augmenter. Dans ce cas, on va plutôt travailler en poteaux-poutres plutôt qu'en ossature. On va faire de grands ensembles, comme un hall industriel. On fait de grands portiques qui sont habillés à l'intérieur avec une ossature. Mais, on privilégie le système d'ossature puisque, dans une maison unifamiliale, il y a toujours des séparations de pièces pour reprendre les charges de planchers et de charpente.

Attia S. : Et au niveau résistance au feu ? Acoustique ?

Moutschen J.-P. : La résistance au feu est d'abord définie par le matériau qui est le premier attaqué aux flammes. Donc, ça va être la plaque de plâtre. Une plaque de plâtre de 12.5 millimètres est déjà RF une demi-heure. Dans les bâtiments type maisons unifamiliales, il n'y a pas d'autres notions apportées. Il faut savoir que, dans le dimensionnement du bois, c'est très facile aussi de faire de la résistance au feu. Une poutre est résistante au feu assez longtemps. Si on veut augmenter la performance, on augmente simplement la section du bois. Pour l'acoustique, que ce soit mitoyen ou en plancher, il a été démontré par le CSTC qu'on pouvait atteindre le niveau

acoustique supérieur demandé par la norme de 2008. En fait, on remplit simplement le plancher d'isolant.

Attia S. : De la cellulose aussi ?

Moutschen J.-P. : C'est plutôt une laine de roche dans ce cas là. Au dessus du plancher, on pose alors une chape sèche, en fibre de plâtre. Et, dans le cas d'appartements, on place un faux plafond désolidarisé. Je vois que, finalement, vous avez peu de notions ou une notion très vague de la construction bois. Je vais vous donner notre cd. Il reprend la composition technique de l'ossature. Cela sera sûrement plus clair.

Attia S. : Ce serait intéressant parce qu'il faudra définir les parois et le plancher. Ce sont les éléments les plus importants en terme de volume de matériaux. Sur base du cas d'étude, tu pourras alors avoir rapidement des chiffres. On vous invitera bien évidemment à la présentation du travail. Il me semble que, parmi les solutions qu'on a vu, le chanvre, la paille et l'argile ne se font pas à l'échelle industrielle. On peut parler de low-tech, d'auto-construction. Dans ce cas-ci, on est plutôt high-tech, industriel. C'est intéressant d'étudier ce type de variation. A votre avis, dans le contexte belge, pour se diriger vers une construction plus durable, doit-on suivre la piste de l'industriel ? Est-ce que le client veut du clé sur porte ou est-ce qu'il préfère l'auto-construction ?

Moutschen J.-P. : On est sur deux extrêmes. Il y a le marginal, qui construit lui-même, qui va lui-même couper les bois etc. Il a une gestion du chantier qui est très performante en terme de cycle de vie. L'auto-construction qui passe par une petite entreprise non industrialisée, ça devient plus complexe je pense. Je reste persuadé que, si on veut une gestion durable du processus de fabrication / de la mise en œuvre / du recyclage dans ce secteur, on doit passer par une phase industrielle. Ce qui fait que la laine de verre ou la laine de roche, même si le matériau en lui-même a une connotation négative, a un cycle de vie intéressant puisque le processus est industrialisé de la fabrication au recyclage. Ils ont suffisamment de moyen pour étudier comment on peut recycler le produit et comment on va le mettre en œuvre en diminuant le coût de l'énergie. C'est ce qui fait que, pendant un certain temps, on voyait sur le site WWF, par exemple, qu'ils conseillaient de prendre la laine de verre comme isolant parce que son bilan global était plus intéressant. Maintenant, il y a les dérives des grandes industries. Nous sommes une PME mais, quand on passe dans le stade vraiment industriel, dans les grandes multinationales, ils font du lobby, ce qui permet de cacher ce qui se passe derrière, dans la production etc. Dans la construction bois comme nous on la propose, je pense que ce n'est intéressant que si on industrialise le processus. Notre vocation n'est pas de réaliser tous les bâtiments

en bois, notre vocation est de dire qu'un maximum de bâtiments en bois peuvent être industrialisés pour être fabriqués dans nos usines robotisées et donc à un prix intéressant. Maintenant, quelqu'un viendrait chez nous en disant qu'il veut faire un bâtiment en paille et qu'il a besoin d'une section particulière de bois, il ne trouvera pas chez nous un prix intéressant parce que ça sortira de la capacité de nos machines. On doit donc les rediriger vers des entreprises spécialisées là-dedans. Donc, Mobic ne veut pas tout faire. Mobic dit que la plupart des bâtiments peuvent être industrialisés et donc être réalisés selon notre concept. Celui qui veut un bâtiment différent ne trouvera pas un prix intéressant chez nous.

Attia S. : Et du point de vue business ? Quand vous avez commencé, je suppose que vous aviez des chiffres qui indiquaient que vous alliez avoir un revenu ? Comment est-ce que vous pouvez décrire le marché belge ? J'ai lu sur le site InfoBois qu'entre 7 et 12 % des nouveaux permis sont des constructions en bois. Comment avez-vous basé votre projet, vous êtes-vous assuré qu'il y avait une certaine demande ?

Moutschen J.-P. : Donc les chiffres, c'est en fait entre 8 et 10% de maisons qui seraient réalisées en bois. C'est ce qu'annonce le site web InfoBois. C'est assez facile, sur cette base, de dire le marché qu'on a devant nous, puisqu'on sait combien de permis de bâtir sont introduits chez nous par an. C'est une chose pour évaluer la quantité de clients potentiels. La deuxième, on doit tenir compte d'un autre facteur : la contrainte de la PEB. Puisque la PEB est maintenant mise en place et qu'elle s'accélère d'années en années, pour atteindre des performances de plus en plus élevées, elle a permis de favoriser le secteur du bois puisqu'il a été plus facile en bois de mettre plus d'isolant et de faire des étanchéités à l'air que dans des systèmes en maçonnerie, pour lesquels d'ailleurs, ils sont toujours en train de chercher des solutions pour être performants. On va avoir des murs de plus en plus épais et de plus en plus de difficultés à atteindre la même performance avec la maçonnerie. Ça a permis de pousser le bois en avant. Dans une entreprise comme la nôtre, la croissance a toujours été de 15 % par an. On sait que le marché, puisqu'il ne représente que 10 %, est toujours devant nous. On peut toujours grappiller des parts de marché sur la maçonnerie, contrairement à d'autres pays comme le Canada ou les États Unis où l'on construit uniquement en bois. Mais l'avantage de construire exclusivement en bois, c'est qu'ils n'ont pas besoin d'innover, de développer le produit. Nous, nous avons dû être innovants et mettre en place des systèmes comme des brevets qu'on a déposés chez Mobic, qui permettent de contrôler l'humidité dans les murs ou d'amener des produits d'argile pour augmenter l'inertie ou bien encore des structures de charpente comme les fermes autoportantes qui ont permis de faire évoluer la structure bois. On est beaucoup plus performant que dans d'autres pays même si le marché est plus réduit. Mais à côté du

secteur résidentiel, il y a un tout autre secteur non négligeable, c'est l'habillage de grandes façades, ce qu'on appelle les murs rideaux. D'ailleurs, le CSTC est en train de finaliser sa notice technique les concernant. Cela consiste à habiller des structures portantes qui ne sont pas forcément en bois, qui peuvent être en acier ou en béton, avec des murs qui ne sont pas porteurs, qui supportent simplement leur propre isolant placé à l'intérieur. Ça représente l'essentiel de notre activité chez Mobic, des murs rideaux pour des bâtiments de marché public. On ne fait pratiquement plus que ça.

Attia S. : C'est-à-dire que vous faites...

Moutschen J.-P. : C'est une ossature bois. C'est donc une structure en bois avec deux panneaux entre lesquels on place un isolant, qui va être fixée sur une façade en béton, en acier ou en bois. Le problème, c'est que comme il s'agit de marchés publics, ce sont des grands bâtiments et donc des grands volumes.

Attia S. : Et vous ne placez pas les fenêtres et châssis ?

Moutschen J.-P. : Ça n'est pas intégré en usine mais les découpes sont déjà faites dans les murs.

Attia S. : Et donc vous vous arrêtez là ?

Moutschen J.-P. : Voilà. Par exemple, on a réalisé la toiture du Libramont Exhibition Congress (Figure 7.19). C'est une structure en lamellés collés cintrés. Il y a 5000 mètres carrés de toiture. Ce sont des caissons de 9 x 1.25 mètres, remplis de cellulose, qui ont été posés sur le lamellé collé cintré. Ça a été fabriqué chez nous, en usine. Mais 5000 mètres carrés de caissons, ça correspond à 10 maisons en terme de volume.

Attia S. : C'est-à-dire que si vous avez 100 % de travail, je peux dire que 20 % va pour les logements et le reste pour les murs rideaux ?

Moutschen J.-P. : Les murs rideaux mais aussi les halls industriels et ce genre de choses.

Attia S. : Donc, c'est intégré dans votre business plan dès le début, parce qu'au niveau volume, le résidentiel avec le PEB ne crée pas une demande suffisante ?

Moutschen J.-P. : Ça dépend des objectifs de chaque entreprise. On a commencé à 4 et on est 65 maintenant. On aurait pu rester à 4 et continuer à faire 10 maisons. Maintenant, c'est clair que l'entreprise est en croissance



FIGURE 12.19 – Libramont Exhibition Congress (Martin, 2015)

depuis toujours.

Attia S. : Parce que je trouve qu'il ne faut pas tenir compte que de la PEB. On va avoir aussi une certaine PEB environnemental qui va arriver d'ici quelques années.

Moutschen J.-P. : La PEB impose des contraintes. Elles sont obligatoires. Celui qui introduit un permis doit être conforme à la PEB. Quand on a commencé, chez Mobic, en 1998, nos premiers bâtiments comptaient 9 centimètres d'isolant. Personne ne nous demandait autre chose. La première fois qu'on m'a demandé de mettre 14 centimètre, c'est parce que l'architecte pensait que 9 centimètres de bois ne permettaient pas d'avoir un mur porteur. Ce n'était donc pas pour avoir plus d'isolant. Ce n'est arrivé qu'en 2002, 2003 ou 2004 qu'on nous a dit qu'il fallait isoler plus. Maintenant, on est obligé de mettre 18 centimètres mais parce que la PEB l'impose. Donc la PEB impose un rythme de croisière. Après, réfléchir au cycle de vie du bâtiment, aux émissions etc., c'est une chose intéressante mais de là à ce que ça devienne contraignant et donc en faveur du bois, on en est loin. L'objectif actuel de la Région Wallonne, c'est la PEB et atteindre le passif à l'horizon 2020. Ça oblige les gens ; ils n'ont pas le choix. Si je demande maintenant à un particulier qui vient chez moi, combien de centimètres d'isolant il voudrait, je suis sûr que 8 personnes sur 10 vont parler de 15 centimètres. Or, ils sont obligés d'en mettre 18. Maintenant, de là à dire que le particulier va choisir de construire en bois parce que la Région Wallonne ou l'Europe favorise un circuit court, ce n'est pas pour tout de suite. Ça reste pour le moment une démarche philosophique même si, vous avez raison, elle arrive. Cette réglementation arrive mais, sur le long terme, ce n'est pas quelque chose qui influence notre marché. Le particulier qui veut construire en bois,

99 fois sur 100, c'est un des arguments qu'il retient parmi d'autres. Il aime surtout le fait que c'est rapide, avec des performances intéressantes, mais aussi qu'on puisse faire facilement des travaux soi-même et enfin, parce que le matériau est sympathique. Le fait d'aimer le matériau n'est jamais la première raison du choix du client, ce qui par contre pourrait être le cas de la paille. Celui qui choisit de construire en paille, il construit parce que, philosophiquement, il se retrouve dans ce matériau, pas parce que c'est rapide ou non. Il veut un isolant écologique, bio, qui corresponde à son mode de vie. C'est moins le cas pour le bois, tout simplement parce que la construction en bois est beaucoup plus répandue maintenant. Il faut aussi savoir que, dans la construction en bois, l'ossature n'est pas le seul système. Il y a les contre-collés, les contre-cloués, les madriers empilés (qui eux sont marginaux). Mais l'ossature reste le système le plus répandu. Il y a beaucoup d'entreprises qui construisent en bois en Belgique depuis des dizaines d'années : Sibomat, Jumatt, Kijk en Bouw. Ils ne faisaient pas de publicité puisqu'à l'époque, ça n'avait pas forcément une connotation positive de construire en bois. Ce n'est que depuis 10 ans qu'ils ont changé leur marketing, en déclarant qu'ils construisaient en bois même s'ils le faisaient déjà il y a 40 ans. Le système constructif en ossature bois existait avant le système en maçonnerie.

Attia S. : Je n'ai plus de questions. Et toi, Florence ?

Delvenne F. : Non, je n'ai plus vraiment de questions. Merci beaucoup pour le temps que vous nous avez accordé.

Delvenne Florence

Curriculum Vitae

rue El Fagne 11
4860 Pepinster
Belgique
☎ 0478/74.23.06
☎ 087/46.98.95

✉ florence.delvenne@student.ulg.ac.be



Informations complémentaires

Née le 17 septembre 1993, à Verviers

Autre email flodelvenne@hotmail.com

Études

- 2015 - 2016 **Deuxième année du master en sciences de l'ingénieur, orientation Ingénieur civil Architecte**, *Université de Liège*, Faculté des Sciences Appliquées.
- Janvier 2016 **Attestation de réussite du programme WISBA - Wienerberger Sustainable Building Academy**, *Université de Vienne*, Faculté d'économie et de commerce.
- Juin 2014 **Diplôme de Bachelier en sciences de l'ingénieur, orientation Ingénieur civil Architecte**, *Université de Liège*, Faculté des Sciences Appliquées.
- Juillet 2011 **Attestation de réussite à l'examen spécial d'admission aux études de Bachelier en Sciences de l'Ingénieur**, *Université de Liège*, Faculté des Sciences Appliquées.
- Juin 2011 **Certificat d'Enseignement Secondaire Supérieur (CESS)**, *Institut Saint Roch Theux*, Enseignement général de transition.

Langues

- Français Langue maternelle
- Anglais Conversation et écrit courant (Niveau universitaire)
- Néerlandais Conversation et écrit de base (Niveau secondaire)

Compétences informatiques

- Texte Microsoft Word, Latex, Microsoft Powerpoint, Microsoft Project
- Math. Microsoft Excel, MatLab, EES
- Dessin - mise en page Autocad, Autodesk Revit, Archicad, Google Sketchup, Artlantis, Blender, Adobe Indesign, Adobe Illustrator, Adobe Photoshop, DiaLux, Qgis
- ACV - Bilan énergétique PEB, DesignBuilder, OpenLCA

Expérience

- février - mai 2016 **Étudiante monitrice - Cours de Morphologie urbaine et intégration paysagère donné par le professeur Jacques Teller**, *Université de Liège, Place du 20 Août 7, 4000 Liège*.
- octobre - décembre 2015 **Étudiant travailleur - Calculs statistiques dans le cadre de la rédaction d'un article scientifique par Christophe BREUER, doctorant**, *Université de Liège, Place du 20 Août 7, 4000 Liège*.
- août 2014 **Stage dans un bureau d'architecture**, *Atelier d'architecture Lejeune Giovanelli et associés, rue Neuve 138, 4860 Pepinster*.
- septembre - octobre 2014 **Job d'étudiant dans un bureau d'architecture**, *Atelier d'architecture Lejeune Giovanelli et associés, rue Neuve 138, 4860 Pepinster*.



Analyse du cycle de vie et coûts du cycle de vie de matériaux régénératifs: Analyse comparative dans le secteur résidentiel belge

Authors: DELVENNE Florence

E-mail: florence.delvenne@student.ulg.ac.be
Address: Building Design Lab (SBD)
Quartier Polytech 1
Allée de la Découverte 9
4000 Liège, Belgium
www.sbd.ulg.ac.be
Tel: +32 43.66.91.55
Fax: +32 43.66.29.09

RESUME

L'analyse du cycle de vie est un outil d'évaluation de l'impact environnemental de plus en plus reconnu. Appliquée dans le cadre de cette étude à quatre bâtiments (construction traditionnelle / IsoHemp / ArgiMob / PailleTech), elle est couplée au calcul du coût du cycle de vie, permettant ainsi de mettre en parallèle les conséquences des diverses constructions étudiées sur l'environnement et les contraintes financières associées.

MOTS CLES

Matériaux régénératifs – Analyse du cycle de vie – Coût du cycle de vie – Analyse comparative – Maison - Belgique

PROBLEMATIQUE

De nos jours, plus personne n'ignore la problématique du réchauffement climatique. Le secteur de la construction a un sérieux impact sur l'environnement. Il convient donc de réaliser que nous vivons dans un monde limité et qu'il est temps de modifier notre manière de vivre, de construire et de consommer. Ainsi, l'utilisation de matériaux régénératifs est tout à fait pertinente dans le cadre du développement durable.

En 1972, lors d'un sommet sur l'environnement, René Dubos a déclaré que nous devons agir local et penser global. Cette réflexion est à la base de ce travail.

OBJECTIFS / HYPOTHESES

Le but est de réaliser une analyse du cycle de vie et un calcul de coût du cycle de vie de quatre cas d'étude : maison traditionnelle belge (bloc de béton, isolants et briques) et maisons en paille / argile / béton de chanvre associées à un système d'ossature bois. L'objectif est de comparer les résultats obtenus et d'en tirer des conclusions afin de répondre à la question de recherche

AUDIENCE

Des architectes professionnels, des candidats bâtisseurs, des entreprises de construction peuvent être impliqués dans un tel projet et bénéficier des connaissances qui peuvent en découler.

QUESTION DE RECHERCHE

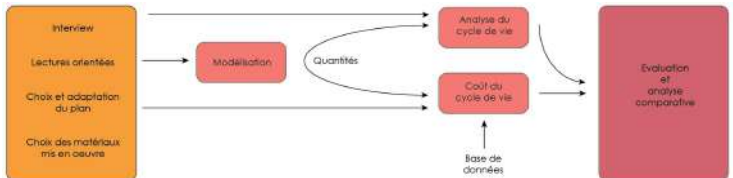
Comment pouvons-nous construire, en Belgique, autrement que de manière traditionnelle, tout en étant plus durable?

INNOVATION

Ce mémoire pourrait:

- ✓ Apporter des modifications dans la manière de construire ou au moins être à l'origine d'une réflexion de la part des architectes, des entreprises de construction et des candidats bâtisseurs;
- ✓ Apporter une nouvelle économie circulaire en Wallonie;
- ✓ Permettre de réduire les émissions / la pollution due au secteur de la construction;
- ✓ Inverser la tendance actuelle en passant de constructions à impacts négatifs à celles ayant un impact positif sur l'environnement.

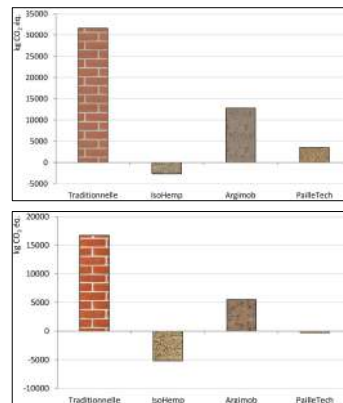
METHODOLOGIE



RESULTATS

L'unité fonctionnelle de cette étude est un bâtiment (son plan interne faisant référence) ayant une durée de vie de 50 ans, dont les parois extérieures possèdent un U de 0,11 W/m²K et dont la consommation d'énergie pour le chauffage correspond au critère passif, soit 15 kWh/m².an.

Les résultats obtenus au terme de l'analyse du cycle de vie et du coût du cycle de vie sont nombreux. Je ne présenterai ici que les deux résultats que j'estime les plus importants, soit les émissions de dioxyde de carbone pour chaque type de construction ainsi que ces mêmes émissions pour les cloisons extérieures de chaque construction. Ces derniers sont d'ailleurs les seuls éléments des habitations qui sont réellement comparables.



On observe dans le premier graphe ci-contre les impacts en terme de réchauffement climatique des quatre constructions complètes et dans le second ces mêmes impacts pour les cloisons extérieures. La maison traditionnelle a bien les émissions les plus importantes. On observe aussi que la construction IsoHemp absorbe plus de CO₂ qu'elle n'en émet.

Il n'existe pas de solutions idéales à proposer. Il est tout à fait possible de construire de manière plus durable que la construction traditionnelle mais malheureusement cela a un coût.

CONCLUSION

L'objectif de ce mémoire est de répondre à la question « Est-il possible, en Belgique, de construire différemment de la manière traditionnelle, tout en étant plus durable? » La réponse est assurément positive. Mais derrière cet objectif se cache aussi la volonté de fournir une aide à la prise de décision aux candidats bâtisseurs et de leur faire découvrir des alternatives locales. Il faut tout de même rester conscient du fait qu'il n'existe pas de solution idéale. A ce jour, l'architecture écologique est, je pense, avant tout une architecture de conviction. Elle reste généralement réservée à une minorité pour qui les moyens financiers ne sont pas à l'origine du choix du type de construction. Y aurait-il dès lors moyen de démocratiser cette architecture ? De mieux la faire connaître et de la rendre accessible à tout un chacun ?