

UNIVERSITE DE LIEGE  
FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES

# Analyse de cycle de vie des bâtiments



**Travail de fin d'études réalisé par**

**Elise BOURCY**

**en vue de l'obtention du grade  
de Master Ingénieur Civil des Constructions**

**Membres du jury : Reiter Sigrid et Rossi Barbara,  
Jaspart Jean-Pierre, Huet Valérie**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2010-2011



UNIVERSITE DE LIEGE  
FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES

# Analyse de cycle de vie des bâtiments



**Travail de fin d'études réalisé par**

**Elise BOURCY**

**en vue de l'obtention du grade  
de Master Ingénieur Civil des Constructions**

**Membres du jury : Reiter Sigrid et Rossi Barbara,  
Jaspart Jean-Pierre, Huet Valérie**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2010-2011

## REMERCIEMENTS

Ce travail de fin d'études a été réalisé au centre de recherches AC&CS du CRM group à Liège (anciennement centre de recherches RDCS d'ArcelorMittal), au sein du département « Steel Solutions Design for Construction » (SSDC).

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude à M. Michel Beguin, directeur du centre de recherches, pour m'avoir accueillie au centre, ainsi qu'à M. Dominique Ninforge, responsable du département SSDC pour m'avoir permis d'effectuer ce TFE dans les meilleures conditions.

Je remercie chaleureusement Mmes Sigrid Reiter et Barbara Rossi, mes promotrices, pour leur disponibilité, leur promptitude à répondre à mes questions ainsi que leur regard attentif sur mes recherches.

Je tiens à remercier personnellement Mlle Valérie Huet, ingénieur au centre de recherches, pour toute l'aide qu'elle m'a apportée ainsi que pour toutes les explications qu'elle m'a fournies et dont la disponibilité et l'écoute ont encadré toute la période de ce TFE.

Je remercie enfin toutes les personnes que j'ai côtoyées durant mon TFE, lesquelles m'ont permis de travailler et d'évoluer dans une ambiance à la fois très conviviale et fort instructive.

Elise BOURCY

Juin 2011

# ENONCÉ

**Titre du travail** : Analyse de cycle de vie des bâtiments

Grâce aux outils d'Analyse en Cycle de Vie (ACV), il est possible d'évaluer l'impact environnemental du choix des matériaux, des composants et des systèmes porteurs d'un bâtiment sur la totalité de son cycle de vie, en prenant en compte les phases de production, construction, utilisation du bâtiment, rénovations et déconstruction en fin de vie.

Ce travail de fin d'études consiste à utiliser ces outils de manière à comparer les ACV de plusieurs enveloppes appliquées à un même bâtiment.

Après un bref état de l'art sur le sujet et une brève description du bâtiment « de base » étudié, nous allons, dans un premier temps, déterminer quelles seront les différentes peaux que nous allons considérer et étudier tout au long du travail.

Une fois cela fait, nous allons composer les différentes parois des alternatives envisagées : les murs extérieurs et intérieurs, la toiture, la dalle de sol et les planchers intermédiaires, tout en essayant de créer des compositions qui pourraient être réellement mises en œuvre dans un bâtiment construit actuellement.

Le bâtiment devra, en outre, respecter la nouvelle réglementation belge sur la performance énergétique des bâtiments (PEB), qui est d'application en Région wallonne.

Lorsque les compositions seront déterminées, nous pourrons procéder à l'analyse du cycle de vie des différentes alternatives envisagées.

L'outil que nous allons utiliser pour procéder à ces ACV sera « Building Ecodesign Tool », qui a été mis au point par ArcelorMittal.

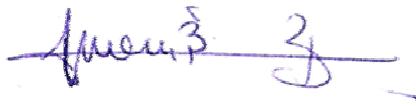
Ainsi, une fois ces ACV réalisées, nous allons comparer les résultats obtenus pour les différents cas analysés et tirer des conclusions quant à ceux-ci. Ainsi, en comparant les résultats de 2 bâtiments ayant la même structure portante mais des enveloppes différentes, nous pourrons déterminer laquelle de ces 2 enveloppes provoque le moins d'impacts environnementaux. Nous pourrons également tirer des conclusions en comparant les phases d'une même ACV entre elles, etc.

## **Membres du jury** :

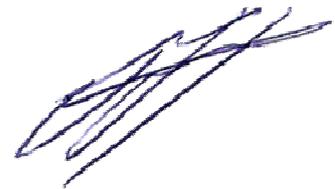
S. REITER (promoteur)



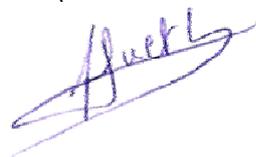
B. ROSSI (co-promoteur)



J.-P. JASPART



V. HUET (membre extérieur)



# RÉSUMÉ

**Titre du travail** : Analyse de cycle de vie des bâtiments

**Auteur** : Elise Bourcy

**Section** : Construction

**Année académique** : 2010-2011

Dans ce travail, nous procédons à l'analyse du cycle de vie de 6 alternatives d'un même bâtiment (une maison unifamiliale à 2 niveaux), ces ACV étant réalisées avec l'outil « Building Ecodesign Tool » mis au point par ArcelorMittal.

Les alternatives sont les suivantes :

- maison structure acier peau Trespa,
- maison structure acier peau acier,
- maison structure acier peau brique,
- maison structure mixte acier/maçonnerie peau brique,
- maison traditionnelle (maçonnerie, hourdis en béton et fermettes en bois),
- maison structure acier peau Trespa sans cloison en bauge.

L'unité fonctionnelle, pour toutes ces analyses, est la maison étudiée : sa surface de plancher chauffé est de  $115,2 \text{ m}^2$ , elle est située près de Liège, est habitée par une famille de 4 personnes et sa durée de vie est de 80 ans. De plus, cette maison respecte la certification énergétique PEB en vigueur en Belgique.

Concernant la frontière du système étudié, nous prenons en compte dans les ACV les phases de production (extraction des matières premières, fabrication des matériaux de construction et transports internes), d'utilisation (transport des matériaux, consommations pour l'électricité et le chauffage, et maintenance du bâtiment) et de fin de vie (transport et traitement des matériaux).

Les indicateurs que nous étudions dans ces ACV sont le Global Warming Potential (GWP) et le Cumulative Energy Demand (CED).

Le résultat de ces ACV est que, des 6 cas étudiés, c'est la maison avec structure portante en acier et parement en brique qui produit le moins d'impacts environnementaux, suivie par la maison acier peau acier pour le GWP et par la maison mixte acier/maçonnerie peau brique pour le CED.

Concernant la maison traditionnelle, il apparaît donc qu'elle n'est pas la plus efficace d'un point de vue environnemental. Ses valeurs élevées de GWP et CED que l'on obtient semblent dues principalement à l'utilisation, pour le premier indicateur, de fermes en bois plutôt qu'en acier, tandis que pour le second indicateur, cela serait plutôt dû à l'emploi de polystyrène expansé à la place de laine de bois comme isolant principal.

Finalement, en analysant les résultats par phases du cycle de vie, il apparaît pour tous les cas étudiés que c'est la phase d'utilisation du bâtiment qui induit la majorité des impacts environnementaux, avec un pourcentage proche de 90 %.

# ABSTRACT

**Title report** : Buildings' life cycle assessment

**Author** : Elise Bourcy

**Section** : Construction

**Academic year** : 2010-2011

In this report, we proceed to the life cycle assessment of 6 alternatives of the same building (a 2 levels single family house), these LCA being realized with the tool "Building Ecodesign Tool" developed by ArcelorMittal.

The alternatives are the following ones :

- steel-framed house with Trespa façade cladding,
- steel-framed house with steel façade cladding,
- steel-framed house with bricks façade cladding,
- steel/masonry mixed structure house with bricks façade cladding,
- traditional house (masonry, concrete floor slab and wood-framed roof)
- steel-framed house with Trespa façade cladding and without "mud" partition

The functional unit, for all these analysis, is the studied house : it has a heated surface of  $115,2 m^2$ , is located in the commune of Liège, is occupied by a family of four persons and has a life time of 80 years. Moreover, this home fulfills the energy certification PEB which is in force in Belgium.

Concerning the boundaries of the studied system, we take into account, in the LCA, the production phase (raw material extraction, manufacturing of construction materials and transport), the use phase (transport, electricity and heating consumptions, and building maintenance) and the end of life phase (transport and treatment of materials).

The indicators we are studying in these LCA are the Global Warming Potential (GWP) and the Cumulative Energy Demand (CED).

The result of these LCA is that, among the 6 cases studied, it's the house with steel framing and bricks façade cladding which produces the least environmental impacts, followed by the house with steel framing and steel façade cladding for GWP and the house with mixed steel/masonry structure and bricks façade cladding for CED.

Regarding to the traditional house, it appears that it is not the most effective for an environmental point of view. The high values of GWP and CED obtained seem mainly due to the use, for the first indicator, of wood framing roof rather than steel, while for the second indicator, that would be rather due to the use of expanded polystyrene instead of wood wool as main insulator.

Finally, by analyzing the results by life cycle phases, it appears, for all the studied cases, that it's the use phase of the building which induces the biggest part of environmental impacts, with a percentage close to 90 %.

# TABLE DES MATIÈRES

Remerciements.....	iii
Enoncé .....	iv
Résumé .....	v
Abstract.....	vi
Table des matières.....	vii
I. Introduction .....	12
I.1. Généralités .....	12
I.2. Analyse de cycle de vie : généralités .....	14
I.2.1. Définitions générales.....	14
I.2.2. Objectifs et champ de l'étude .....	15
• Unité fonctionnelle.....	16
• Frontière du système.....	16
I.2.3. Inventaire du cycle de vie (ICV) .....	16
I.2.4. Evaluation de l'impact du cycle de vie .....	16
I.2.5. Interprétation .....	17
I.3. ACV dans le secteur du bâtiment .....	17
I.4. Objectifs et champ de l'étude de ce travail.....	18
I.4.1. Objectifs.....	18
I.4.2. Champ de l'étude .....	18
• Système étudié .....	18
• Unité fonctionnelle.....	19
• Frontière du système.....	19
• Types d'impacts.....	20
I.5. Etat de l'art.....	20
II. Description du bâtiment de référence étudié .....	26
II.1. Fonction et description générale du bâtiment étudié .....	26
II.2. Plans et dimensions de la maison .....	26
II.3. Description de la structure portante de la maison .....	29
II.4. Modification des dimensions de la maison .....	30
III. Description des parois de la maison .....	33
III.1. Détermination des cas d'étude .....	33
III.2. Description des compositions des parois des 6 cas .....	34

III.2.1.	1 <sup>er</sup> cas : Maison acier peau trespa .....	35
•	Mur extérieur .....	35
•	Toiture .....	38
•	Plancher.....	41
•	Dalle de sol .....	43
•	Cloison intérieure .....	46
III.2.2.	2 <sup>ème</sup> cas : Maison acier peau acier .....	48
•	Mur extérieur .....	48
III.2.3.	3 <sup>ème</sup> cas : Maison acier peau brique .....	50
•	Mur extérieur .....	50
III.2.4.	4 <sup>ème</sup> cas : Maison mixte acier/maçonnerie peau brique .....	51
•	Mur extérieur .....	51
III.2.5.	5 <sup>ème</sup> cas : Maison traditionnelle.....	52
•	Mur extérieur .....	52
•	Toiture .....	52
•	Plancher.....	53
III.2.6.	6 <sup>ème</sup> cas : Maison cas 1 sans bauge.....	55
IV.	Réglementation PEB .....	56
IV.1.	Définitions et exigences .....	56
IV.2.	Vérification des exigences sur le <b>U</b> des parois du bâtiment .....	59
IV.2.1.	Mur extérieur .....	63
•	Maison acier/trespa (avec et sans bauge).....	63
•	Maison acier/acier.....	64
•	Maison acier/brique .....	65
•	Maisons mixte/maçonnerie et traditionnelle .....	65
IV.2.2.	Toiture .....	66
•	Maisons acier/trespa, acier/acier, acier/brique, mixte/maçonnerie.....	66
•	Maison traditionnelle .....	67
IV.2.3.	Plancher 1 – finition parquet.....	68
•	Maisons acier/trespa, acier/acier, acier/brique et mixte/maçonnerie.....	68
•	Maison traditionnelle .....	68
IV.2.4.	Plancher 2 – finition carrelage.....	68
•	Maisons acier/trespa, acier/acier, acier/brique et mixte/maçonnerie.....	68

•	Maison traditionnelle .....	68
IV.2.5.	Dalle de sol 1 – finition parquet .....	69
IV.2.6.	Dalle de sol 2 – finition carrelage .....	69
IV.2.7.	Cloison intérieure normale.....	69
IV.2.8.	Cloison intérieure en bauge .....	69
IV.2.9.	Ouvertures extérieures .....	70
IV.3.	Analyse PEB complète du bâtiment .....	71
IV.3.1.	Création d’un nouveau projet .....	71
IV.3.2.	Calcul des déperditions par ventilation.....	73
IV.3.3.	Encodage des parois.....	74
IV.3.4.	Inertie de la maison.....	76
IV.3.5.	Chauffage.....	77
IV.3.6.	Ventilation .....	78
IV.3.7.	Eau chaude sanitaire .....	79
V.	Building Ecodesign Tool .....	80
V.1.	Description rapide de « Building Ecodesign Tool » .....	80
V.2.	Description détaillée de Building Ecodesign Tool .....	81
V.2.1.	Alcyone – 1 .....	81
V.2.2.	Pleiades.....	86
•	Composition des parois .....	86
•	Scénarios .....	90
V.2.3.	Alcyone – 2 .....	94
V.2.4.	Pleiades – 2.....	95
V.2.5.	Template de fichier Excel .....	97
•	Description des différentes feuilles du template .....	97
•	Explications du datapool .....	99
•	Calcul de la consommation d’électricité .....	104
VI.	Transport.....	106
VII.	Résultats globaux.....	108
VII.1.	Maison acier peau trespa.....	108
VII.1.1.	PEB.....	108
VII.1.2.	Résultats ACV.....	110
•	Inventaire : .....	110
•	Evaluation des impacts environnementaux : .....	111

VII.2.	Maison acier peau acier .....	112
VII.2.1.	PEB.....	112
VII.2.2.	Résultats ACV.....	113
•	Inventaire : .....	113
•	Evaluation des impacts environnementaux : .....	114
VII.3.	Maison acier peau brique.....	115
VII.3.1.	PEB.....	115
VII.3.2.	Résultats ACV.....	116
•	Inventaire : .....	116
•	Evaluation des impacts environnementaux : .....	117
VII.4.	Maison mixte acier/maçonnerie peau brique.....	118
VII.4.1.	PEB.....	118
VII.4.2.	Résultats ACV.....	119
•	Inventaire : .....	119
•	Evaluation des impacts environnementaux : .....	120
VII.5.	Maison traditionnelle .....	121
VII.5.1.	PEB.....	121
VII.5.2.	Résultats ACV.....	122
•	Inventaire : .....	122
•	Evaluation des impacts environnementaux : .....	123
VII.6.	Maison acier/trespa sans bauge .....	124
VII.6.1.	PEB.....	124
VII.6.2.	Résultats ACV.....	125
•	Inventaire : .....	125
•	Evaluation des impacts environnementaux : .....	126
VIII.	Comparaison des résultats.....	131
VIII.1.	Impacts sur toute la durée de vie du bâtiment.....	136
VIII.2.	Impacts par phases du cycle de vie .....	139
VIII.3.	Impacts par type de matériaux .....	141
VIII.4.	Impacts par emplacement dans le bâtiment.....	146
IX.	Analyse de sensibilité.....	151
IX.1.	Changement de la température de consigne pour le chauffage.....	151
IX.2.	Changement des distances de transport.....	154
IX.3.	Changement du climat .....	157

IX.3.1. Ostende .....	158
IX.3.2. Nice.....	160
X. Conclusion générale.....	167
XI. Perspectives .....	171
XII. Table des figures .....	172
XIII. Table des tableaux .....	176
XIV. Annexes.....	178
XV. Références .....	224

# I. INTRODUCTION

## I.1. Généralités

Durant ces dernières années, il y a eu une prise de conscience de plus en plus grande de l'importance de la protection de l'environnement. Désormais, l'environnement et sa préservation est une des préoccupations majeures de ce 21<sup>ème</sup> siècle.

Les gaz à effet de serre émis par les activités humaines réchauffent la Terre, c'est incontestable. Ce fait a été clairement identifié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat des Nations unies (GIEC). Ce réchauffement planétaire entraîne des changements climatiques mondiaux dont les effets sur les plans économique, environnemental et humain s'accroîtront dans les prochaines décennies [1].

La recherche scientifique a suggéré que pour prévenir les impacts les plus importants liés aux changements climatiques, nous devons limiter le réchauffement climatique de la planète à 2°C au-dessus du niveau préindustriel, ce qui est juste 1,2°C au-dessus du niveau actuel. Dans ce but, le Conseil Européen a décidé, en octobre 2009, que les pays développés devraient réduire d'ici à 2050 leurs émissions de gaz à effet de serre de 80 à 95 % par rapport à 1990<sup>1</sup> [1], [2].

Ainsi, après Kyoto, l'Union Européenne s'est déjà engagée à réduire sa consommation d'énergie et ses émissions de gaz à effet de serre de 20 % (par rapport à 1990) et à porter à 20 % la part des énergies renouvelables dans l'approvisionnement énergétique d'ici à 2020 [1], [2].

Etant responsable d'environ 40 % de la consommation d'énergie et de 36 % des émissions de CO<sub>2</sub> de l'UE, le secteur de la construction doit donc impérativement s'adapter pour répondre à ces objectifs de l'UE [4].

Pour cela, une directive européenne a vu le jour : the Energy Performance of Buildings Directive 2002/91/EC (EPBD) [4], [5], [6]. Dans cette directive, les pays membres de l'UE se doivent d'appliquer des exigences minimales en ce qui concerne la performance énergétique des bâtiments neufs et existants (durant la phase d'utilisation), de veiller à la certification de la performance énergétique de ces bâtiments et d'imposer l'inspection régulière des chaudières et des systèmes de climatisation des bâtiments [4].

Ainsi, dans certains pays membres de l'UE, il apparaît des systèmes de certification énergétique des bâtiments [5] :

- PEB en Belgique<sup>2</sup>
- RT 2005 et plus récemment RT 2012 – BBC Effinergie en France
- Minergie en Suisse

---

<sup>1</sup> Cette politique fait suite au protocole de Kyoto de 1997, qui requérait déjà, pour les 15 pays membres de l'UE à ce moment-là, une diminution de leurs émissions de 8 % d'ici 2012 par rapport à 1990 [3].

<sup>2</sup> On reparlera ultérieurement dans ce travail de la réglementation PEB belge.

- Passivhaus en Allemagne
- Energy-plus Buildings (BEPOS) en France (RT 2020)

On peut classer un bâtiment en fonction de sa consommation annuelle d'énergie primaire en  $kWh/m^2/an$  (pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la ventilation et l'éclairage) :



Figure 1 : Classification des bâtiments en fonction de la consommation d'énergie primaire (source : <http://www.concept-bio.eu>)

Actuellement, la consommation moyenne des bâtiments résidentiels se situe entre 150 et 250  $kWh/m^2/an$  <sup>3</sup> [7]. On se situe donc dans la catégorie D. Pour ce qui est des nouvelles certifications, nous avons :

Certification	Consommation	Catégorie
PEB	maximum 170 $kWh/m^2/an$	C
RT 2005	entre 80 et 130 $kWh/m^2/an$	C
BBC Effinergie (RT 2012)	maximum 50 $kWh/m^2/an$	A
BEPOS (RT 2020)	< 0 $kWh/m^2/an$ <sup>4</sup>	/
Minergie	maximum 38 $kWh/m^2/an$	A
Passivhaus	maximum 120 $kWh/m^2/an$	C

Tableau 1 : Consommations relatives à certaines certifications (valeurs provenant de <http://www.minergie.fr>, <http://energie.wallonie.be/>, <http://www.rt-batiment.fr>, <http://www.concept-bio.eu>)

<sup>3</sup> Valeurs pour la France

<sup>4</sup> Une maison « Energy-plus » est un bâtiment qui produit plus d'énergie qu'il n'en consomme.

## **I.2. Analyse de cycle de vie : généralités**

### **I.2.1. Définitions générales**

Pour s'inscrire dans le concept de développement durable<sup>5</sup> et de protection de l'environnement, la volonté de limiter la consommation d'énergie n'est cependant pas suffisante. En effet, d'autres problématiques, comme la consommation des matières premières, la production de déchets et la consommation d'eau doivent être prises en compte, celles-ci ayant des impacts environnementaux importants.

Remarque : de nouveau, le secteur de la construction intervient pour beaucoup dans ces problématiques : 40 % de l'utilisation mondiale des matières premières, pour 30 % de la production des déchets solides, et pour 16 % de la consommation totale d'eau [9].

Pour tenir compte de toutes ces problématiques et de leurs impacts associés et dans l'absolu pour y remédier, de nouvelles méthodes ont été développées. L'une de ces techniques, en cours de développement, est l'analyse du cycle de vie (ACV)<sup>6</sup>.

Comme outil de gestion de l'environnement, l'ACV est devenue un critère internationalement reconnu [10].

La technique de l'ACV est définie par l'Organisation Internationale de Normalisation ISO : normes ISO 14040 et 14044 [11], [12].

Une analyse de cycle de vie traite les aspects environnementaux et les impacts environnementaux potentiels tout au long du cycle de vie d'un produit, de l'extraction et de l'acquisition des matières premières à sa production, son utilisation, son traitement en fin de vie, son recyclage et sa mise au rebut (à savoir, du berceau à la tombe) [11], [12].

L'ACV peut permettre, entre autres, de [9] :

- comparer 2 systèmes en compétition, au niveau de leur cycle de vie complet ou partiel
- comparer les différentes phases du cycle de vie d'un même système
- comparer un système et ses alternatives
- comparer un système à une référence

Ainsi, grâce à ces comparaisons, une ACV peut permettre par exemple de guider des décideurs dans leurs choix, d'un point de vue environnemental (quel système produit le moins d'impacts), mais elle peut également aider à cibler quelles phases du cycle de vie du produit étudié seraient les plus utiles à modifier, dans le but d'améliorer ses performances environnementales.

---

<sup>5</sup> Le concept de développement durable a été défini par le « Brundtland Report » en 1987 : « Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs » [8]

<sup>6</sup> Analyse de Cycle de Vie (ACV) = Life Cycle Assessment (LCA) en anglais

Une ACV se déroule en 4 phases [11], [12] :

- la phase de définition des objectifs et du champ de l'étude
- la phase d'inventaire
- la phase d'évaluation de l'impact
- la phase d'interprétation

L'ACV est une technique itérative. Chaque phase d'une ACV utilise les résultats des phases précédentes :

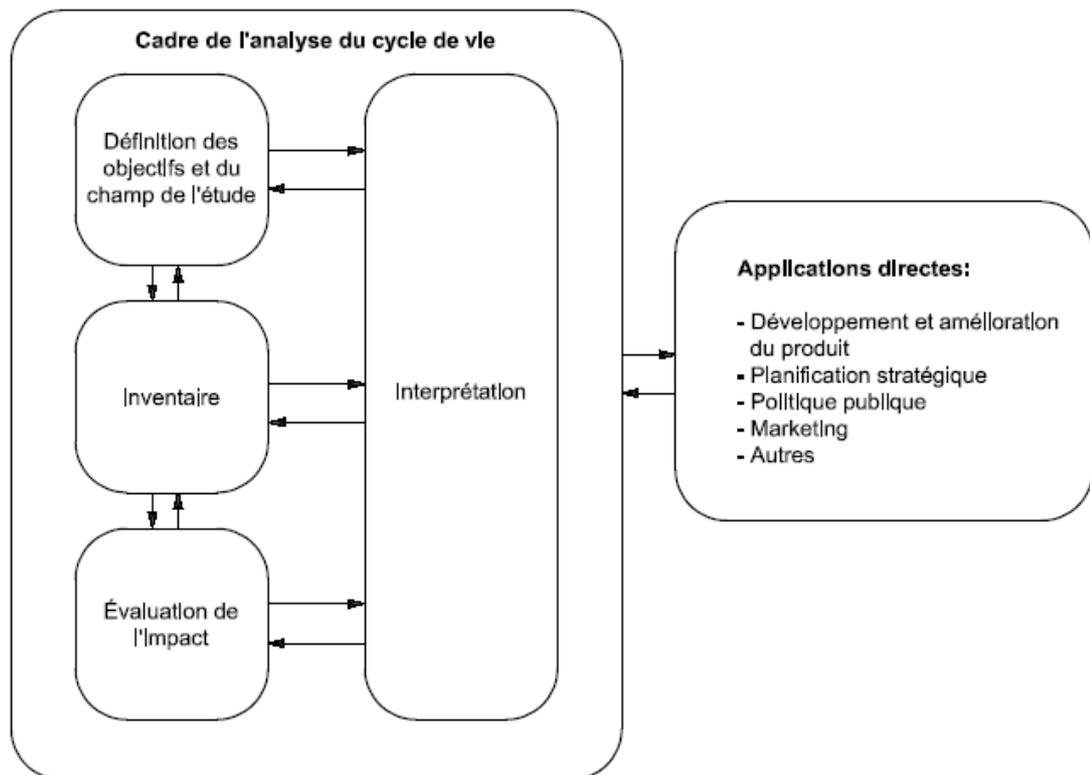


Figure 2 : Phases de l'ACV avec approche itérative (source : [11])

### 1.2.2. Objectifs et champ de l'étude

Dans la première phase, les objectifs et le champ de l'étude sont définis. Au niveau du champ de l'étude, sa définition doit décrire clairement [11], [12] :

- le système de produit à étudier
- l'unité fonctionnelle
- la frontière du système
- les types d'impacts

- **Unité fonctionnelle**

L'unité fonctionnelle définit la quantification des fonctions identifiées du produit. L'objectif premier d'une unité fonctionnelle est de fournir une référence à laquelle les intrants et les extrants sont liés. Cette référence est nécessaire pour assurer la comparabilité des résultats d'une analyse du cycle de vie. Par conséquent, l'unité fonctionnelle doit être clairement définie et mesurable [11], [12].

- **Frontière du système**

Les ACV sont réalisées en modélisant des systèmes de produits qui décrivent les éléments principaux des systèmes physiques. Les frontières du système définissent les processus élémentaires à inclure dans le système [11], [12].

Le choix des éléments du système physique à modéliser dépend entre autres de la définition des objectifs et du champ de l'étude.

Lors de la définition des frontières du système, il convient que plusieurs étapes du cycle de vie, processus élémentaires soient pris en compte, par exemple [11], [12] :

- l'acquisition des matières premières
- la fabrication
- la distribution/le transport
- la production et la consommation de combustibles, d'électricité et de chaleur
- l'utilisation et l'entretien/la maintenance des produits
- la valorisation des produits après usage (réutilisation, recyclage et récupération d'énergie)

### I.2.3. Inventaire du cycle de vie (ICV)

Cette deuxième phase qu'est l'inventaire de l'ACV consiste en le recueil de tous les intrants (matériaux et énergie) et extrants (émissions dans l'air, l'eau et le sol) du système de produits étudié, à chaque étape du cycle de vie [13].

Pour cette étape, on utilise généralement des bases de données préexistantes [9].

### I.2.4. Evaluation de l'impact du cycle de vie

La troisième phase de l'ACV est l'évaluation des impacts. Comme son nom l'indique, elle consiste à évaluer les impacts environnementaux potentiels du système de produits étudié. Pour cela, il faut commencer par choisir quelles catégories d'impacts vont être considérées dans l'analyse, puis on associe à chacune d'elles les données précédemment récoltées dans l'inventaire (deuxième phase de l'ACV) [14].

A chaque catégorie d'impacts correspond un indicateur : l'unité utilisée pour quantifier l'impact potentiel [9].

Voici quelques exemples de catégories d'impacts : effets cancérigènes/toxicité humaine, changement climatique, disparition de la couche d'ozone, écotoxicité, acidification,...

### I.2.5. Interprétation

La quatrième et dernière phase de l'ACV est l'interprétation du cycle de vie. À ce stade, les résultats de l'inventaire et de l'évaluation des impacts sont résumés et discutés pour dégager des conclusions, des recommandations et aboutir à une prise de décision conforme à la définition des objectifs et du champ de l'étude [11].

Durant cette phase, une évaluation des résultats est nécessaire, pour établir leur fiabilité. Une analyse de sensibilité est réalisée, afin de déterminer si les résultats et conclusions de l'étude sont affectés d'incertitudes, et si oui, à quel point [9].

## **I.3. ACV dans le secteur du bâtiment**

La méthode ACV est utilisée dans le secteur du bâtiment depuis 1990, et c'est un outil important pour l'évaluation des bâtiments [14]. Ainsi, au jour d'aujourd'hui, plusieurs outils d'ACV de bâtiments ont été développés dans différents pays [9].

Le cycle de vie d'un bâtiment peut se résumer à 3 phases : pre-building, building et post-building [15].

La phase de « pre-building », ou de production, inclut :

- l'extraction des matières premières (procédé + transport)
- les procédés de fabrication des matériaux de construction
- la distribution (transport interne)

La phase de « building », ou d'utilisation, inclut :

- la construction : transport sur site des matériaux de construction et procédés de construction du bâtiment
- l'utilisation du bâtiment : occupation (consommation d'énergie, d'eau, transport des occupants, production de déchets,...) et maintenance (remplacement des matériaux au cours de la durée de vie du bâtiment)
- la reconstruction éventuelle du bâtiment

La phase de « post-building », ou de fin de vie, inclut :

- la démolition du bâtiment
- la fin de vie des matériaux du bâtiment : évacuation (transport) et traitement des produits de démolition

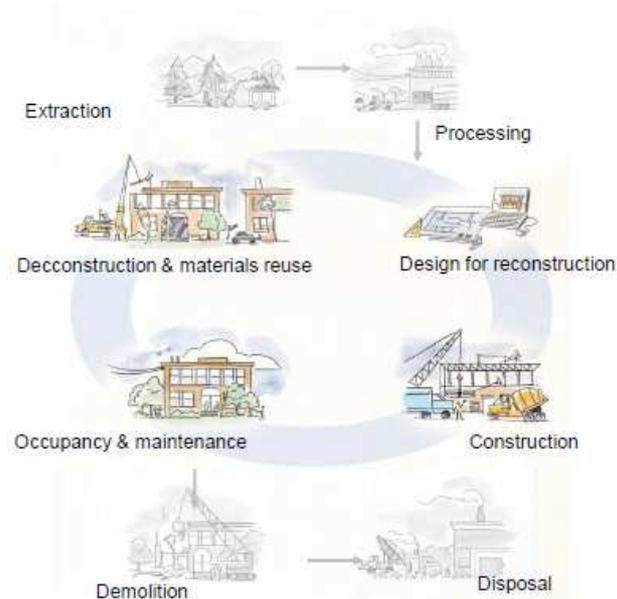


Figure 3 : Phases de l'ACV d'un bâtiment (source : [www.epa.gov](http://www.epa.gov))

## I.4. Objectifs et champ de l'étude de ce travail

### I.4.1. Objectifs

Grâce aux outils d'ACV, il est possible d'évaluer l'impact environnemental du choix des matériaux, des composants et des systèmes porteurs d'un bâtiment sur la totalité de son cycle de vie.

Ce travail de fin d'études consiste à utiliser ces outils de manière à comparer les ACV de plusieurs enveloppes appliquées à un même bâtiment de référence ayant la même structure porteuse. Ces enveloppes devront être réalistes<sup>7</sup>.

Ainsi, nous allons évaluer les impacts environnementaux liés aux différentes enveloppes, et comparer les résultats obtenus (pour cela, la fonction du bâtiment devra être la même pour les différentes variantes étudiées).

L'outil que nous allons utiliser pour procéder à ces ACV est « Building Ecodesign Tool », qui a été mis au point par ArcelorMittal.

### I.4.2. Champ de l'étude

- Système étudié

Le système étudié est une maison unifamiliale construite en 2011-2012 en Belgique, dans la commune de Liège, et qui est occupée par 4 personnes (1 couple et 2 enfants).

<sup>7</sup> Comprenez par « réaliste » que l'enveloppe pourrait réellement être mise en œuvre dans un bâtiment construit actuellement.

Elle est construite sur 2 niveaux (rez-de-chaussée et 1<sup>er</sup> étage), qui sont tous les 2 chauffés : la surface de plancher chauffé de la maison est de 115,2 m<sup>2</sup>.

La durée de vie de la maison est de 80 ans.

Une description plus détaillée de la maison se fera ultérieurement dans ce travail.

- Unité fonctionnelle

Dans ce travail, l'unité fonctionnelle que nous allons considérer est cette maison de 115,2 m<sup>2</sup> construite en 2011-2012 près de Liège, habitée par une famille de 4 personnes et dont la durée de vie est de 80 ans. De plus, cette maison respecte la certification énergétique PEB en vigueur en Belgique.

- Frontière du système

Nous allons à présent définir quels sont les processus dont nous allons tenir compte dans notre ACV.

Au niveau de la phase de production, nous allons considérer :

- l'extraction des matières premières
- le transport du site d'extraction jusqu'à l'usine de fabrication des matériaux
- la fabrication des matériaux de construction
- le transport des matériaux de l'usine aux différents distributeurs

Au niveau de la phase d'utilisation, nous allons considérer :

- le transport des différents distributeurs de matériaux jusqu'au site de construction
- l'utilisation du bâtiment par les occupants : consommation d'électricité et consommation liée au chauffage du bâtiment ; nous allons considérer que ces consommations seront constantes sur toute la durée de vie du bâtiment
- la maintenance du bâtiment : le remplacement des matériaux si leur durée de vie est inférieure à la durée de vie du bâtiment.

Nous faisons l'hypothèse que le remplacement des électroménagers et des ampoules n'est pas pris en compte dans cette analyse. De même, tout ce qui est entretien « quotidien » de la maison (nettoyage, remise en peinture,...) n'est pas pris en compte.

Au niveau de la phase de fin de vie, nous allons considérer :

- le transport du site de construction jusqu'au centre relatif à la fin de vie du matériau
- le traitement des matériaux selon leur fin de vie<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> Nous verrons plus tard quelles fins de vie possibles nous allons considérer.

- Types d'impacts

Nous devons à présent déterminer quelles catégories d'impacts et donc quels indicateurs nous allons étudier.

Le choix de ces indicateurs a été guidé par la volonté de recourir à des impacts fiables et communément acceptés.

Le premier indicateur que nous avons choisi est le Global Warming Potential (GWP). En effet, cet indicateur, qui a été « créé » par l'IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change), est celui qui est le plus représentatif du changement climatique [5], qui est l'impact le plus connu par la population mondiale.

Le second indicateur que nous allons considérer est le Cumulative Energy Demand (CED). Le CED d'un produit représente sa consommation d'énergie directe et indirecte tout au long de son cycle de vie (du berceau à la tombe). Nous avons effectué ce choix car il apparaît que le CED est un très bon indicateur concernant de nombreux problèmes environnementaux [16].

Le GWP s'exprime en *kg CO<sub>2</sub> eq*, tandis que le CED s'exprime en *MJ eq*.

## **I.5. Etat de l'art**

De nombreux articles ont déjà été écrits sur le sujet de l'analyse de cycle de vie appliqué au cas d'un bâtiment.

Certains d'entre eux se concentrent sur des éléments particuliers du bâtiment, comme c'est le cas de l'article de Bragança et Mateus ([17]), qui traite de la comparaison, du point de vue durabilité, de diverses solutions de construction des murs extérieurs d'un bâtiment.

D'autres articles se rapportent, quant à eux, à l'analyse d'un bâtiment dans son ensemble. Le bâtiment étudié est la plupart du temps une maison résidentielle, mais certains articles traitent de l'ACV d'un bâtiment de bureau, comme par exemple l'article de Cole et Kernan [18], qui évalue l'énergie liée au cycle de vie complet d'un bâtiment de bureaux de 3 étages de 50 000 *ft<sup>2</sup>* (4620 *m<sup>2</sup>*) situé au Canada, et ce pour différentes alternatives de structure (bois, acier et béton).

Dans ce travail, comme l'étude se rapporte à une maison résidentielle, c'est aux articles traitant de ce type de bâtiment auxquels nous allons nous intéresser. Il est à noter que les analyses sont généralement menées sur des bâtiments existants et non sur des bâtiments en phase de conception.

Blengini G. A. a étudié, dans son article [13], le cas d'un bâtiment résidentiel multifamilial, situé à Turin en Italie et ayant une durée de vie de 40 ans. Il étudie les 3 phases suivantes : pré-utilisation (procédés de fabrication des matériaux et transport), utilisation (chauffage, refroidissement, ECS, éclairage et cuisine) et fin de vie (élimination finale des déchets).

Les résultats sont que, dans la phase d'utilisation, ce sont les impacts liés à la consommation de chauffage qui sont prédominants, avec 67 % de contribution.

De plus, sur le cycle de vie complet du bâtiment, c'est la phase d'utilisation qui produit la majorité des impacts : de 90,1 % à 95,2 % selon l'impact considéré.

Pour la phase de fin de vie correspondant à ces résultats, il a été considéré que les matériaux pouvant être recyclés l'étaient. Pour montrer l'influence d'une bonne gestion en fin de vie des matériaux, une alternative à cette analyse a été effectuée : celle où on considère que tous les matériaux vont à l'élimination finale. Les résultats sont que, pour cette alternative, on a une augmentation de presque 40 % pour la valeur du GER (Gross Energy Requirement) et de 20 % pour la valeur du GWP, et ce pour les impacts liés à l'embodied energy (sans phase d'utilisation).

Une analyse de sensibilité a été menée dans cet article, pour évaluer la fiabilité des résultats. Ainsi, les calculs ont été effectués en considérant une autre base de données pour les 2 matériaux les plus importants du bâtiment, à savoir l'acier et le béton.

Le résultat de cette analyse de sensibilité est que les incertitudes concernant les données d'inventaire des matériaux du bâtiment sont tout à fait tolérables.

Une autre analyse de cycle de vie a été menée par Zabalza Bribian I. et al [19]. Le bâtiment étudié est une maison unifamiliale de 222 m<sup>2</sup> construite en Espagne et dont la durée de vie est de 50 ans (identique pour tous les matériaux du bâtiment). Cette maison répond aux exigences concernant les limitations de demande d'énergie qui sont établies en Espagne.

Les résultats de l'analyse sont que, pour la demande totale en énergie sur tout le cycle de vie du bâtiment, la phase liée à l'embodied energy contribue pour 31 % tandis que la phase d'utilisation contribue pour 69 %. Concernant le GWP total, les contributions sont de 41 % et 59 % respectivement pour les phases d'embodied energy et d'utilisation.

Blengini et Di Carlo ont réalisé un article [20] sur l'analyse du cycle de vie d'une maison familiale à très basse énergie, occupée par 4 personnes, récemment construite dans le nord de l'Italie, et dont la demande de chauffage en hiver est de 10 kWh/m<sup>2</sup>/an.

La maison étudiée a été conçue selon les principes de l'architecture bioclimatique, et ce dans le but d'avoir une demande d'énergie très basse de 10 kWh/m<sup>2</sup>/an, qui est 10 fois inférieure à la valeur maximale permise par la réglementation thermique en vigueur en Espagne. Ce but a été atteint en mettant en place des systèmes solaires, en optimisant l'isolation, en minimisant les flux d'air incontrôlés, et en utilisant des matériaux à haute performance.

Ainsi, les systèmes solaires mis en place contribuent à 59 % de la demande de chauffage.

Au niveau de la fin de vie des matériaux, les auteurs ont tenu à modéliser un scénario de fin de vie réaliste, contrairement à ce qui est fait généralement dans les autres études.

Les résultats obtenus sont que la phase de production induit des impacts supérieurs à ceux de la phase d'utilisation, et que pour chaque impact intervient un gain dû à la fin de vie : on a une diminution des impacts sur le cycle de vie de 2 – 17 %. Ainsi, lorsque l'on cherche à diminuer les consommations, la contribution de l'énergie liée aux matériaux (phase de production) ne peut pas être négligée.

En ce qui concerne le transport, les résultats trouvés sont que sa contribution aux impacts totaux est mineure.

Après avoir réalisé l'ACV du bâtiment, les auteurs ont effectué une comparaison des impacts entre la maison très basse consommation (TBC) et une maison standard (dont la demande en chauffage en hiver est de  $110 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ ).

Il ressort, de cette comparaison, que la maison standard induit légèrement moins d'impacts que la maison très basse consommation en ce qui concerne la phase de production des matériaux. Par contre, pour la phase d'utilisation, il apparaît une différence plus grande entre les 2 maisons, cette différence se concentrant principalement au niveau des impacts liés au chauffage.

Dans la maison standard, c'est le chauffage et la ventilation qui supplantent tout le reste dans la phase d'utilisation tandis que pour la maison TBC, cette phase est dominée par les autres utilisations : éclairage, appareils électriques, ECS, cuisine.

Pour la maison standard, la phase d'utilisation est responsable pour plus de 80 % de la totalité des impacts CED et GWP, alors que pour la maison TBC, ce pourcentage est inférieur à 50 %.

Les auteurs ont tenu à préciser que ces résultats ne pouvaient pas être généralisés, ceux-ci reflétant la combinaison complexe des caractéristiques du cas étudié : les techniques de construction, les modèles comportementaux des italiens, les conditions climatiques du site, l'energy mix.

Gerilla et al. 2007 [21] évaluent, eux, l'impact environnemental de 2 types de structure pour un bâtiment (structure en bois vs. béton armé), et ce en terme d'énergie consommée et d'émission dans l'air. Le bâtiment étudié est une maison résidentielle typique au Japon ayant une surface de plancher chauffé de  $150 \text{ m}^2$  et une durée de vie de 35 ans. Le résultat de la comparaison des 2 types de structure est que la maison avec structure en béton armé a un impact environnemental plus élevé que celui de la maison à structure en bois : au niveau des émissions totales de  $\text{CO}_2$ , la valeur pour la maison en béton armé est 23 % supérieure à celle de la maison bois. Il apparaît également que c'est la phase d'utilisation du bâtiment qui induit la majorité des émissions, sa part étant de l'ordre de 88 %.

Une analyse de sensibilité a été réalisée dans cet article, portant sur l'utilisation de l'énergie solaire pour répondre aux diverses consommations. Ainsi, en considérant que la totalité des consommations durant la phase d'utilisation est supportée par l'énergie solaire, les émissions de  $\text{CO}_2$  pour la phase d'utilisation sont réduites de 93 % pour les 2 types de maison, entraînant ainsi une réduction de 70 – 73 % des émissions totales de  $\text{CO}_2$  (pour l'ensemble du cycle de vie).

Dans le même ordre d'idée, l'article de Ciutina et al [22] compare, lui, l'analyse de cycle de vie entre un même bâtiment dont la structure est soit faite de profilés en acier formés à froid, soit faite de blocs de maçonnerie. Le bâtiment étudié est une maison unifamiliale construite en 2005 en Roumanie et dont la durée de vie est de 50 ans. La conclusion principale de cet article est que la maison traditionnelle en maçonnerie présente des valeurs plus élevées pour toutes les catégories d'impacts évaluées.

De même, Massetto de Aquino L. et al. [23] présentent, dans leur article, l'analyse de cycle de vie de 2 bâtiments similaires en dimensions, orientations, climat et fonction, mais utilisant 2 systèmes de construction différents : le premier est en maçonnerie traditionnelle faite de blocs de béton et le second possède une structure en acier. Le bâtiment étudié est situé en Belgique, et a une superficie de  $250 \text{ m}^2$  ; il s'agit d'une maison typique belge. Les résultats de l'étude sont que, au niveau de la phase liée à l'embodied energy, c'est la maison en maçonnerie qui présente les émissions en  $\text{CO}_2$  les plus grandes tandis que pour la phase d'utilisation, il s'agit de la maison à ossature acier. Il apparaît néanmoins pour les 2 systèmes que c'est la phase d'utilisation qui induit les impacts les plus importants sur le cycle de vie complet du bâtiment.

L'auteur a également souligné, dans son article, plusieurs éléments pouvant influencer les résultats finaux. Tout d'abord, le choix de l'energy (et electricity) mix, qui peut avoir une grande importance sur les émissions annuelles de  $\text{CO}_2$  pour la phase d'utilisation. Ensuite, les scénarios considérés (scénario d'occupation ou de demande de température) qui, si ils sont modifiés, changent en conséquence les valeurs des impacts. Enfin, la maison étudiée en elle-même (sa configuration, le pourcentage de ses parois vitrées, son enveloppe) qui peut avoir une grande influence sur les résultats finaux.

Huberman et Pearlmutter [24] ont eux envisagé l'utilisation de matériaux alternatifs dans la composition des murs extérieurs et ce dans le but d'optimiser les demandes en énergie du bâtiment sur son cycle de vie complet. Le bâtiment étudié est une partie d'un home étudiants : 4 appartements d'étudiant de  $28 \text{ m}^2$  chacun. Le bâtiment est situé dans le désert Negev en Israël, et sa durée de vie considérée est de 50 ans. Notons que ce bâtiment a été conçu, au départ, de façon à minimiser les coûts liés à l'énergie consommée durant la phase d'utilisation, cela augmentant l'importance relative de l'embodied energy.

Il est ressorti de l'étude que l'embodied energy du bâtiment prend part pour 60 % de l'énergie consommée sur toute la durée de vie du bâtiment. L'utilisation des matériaux alternatifs analysés dans l'article permet de diminuer l'embodied energy de 30 – 40 % et ainsi de réduire l'énergie totale consommée sur une période de 50 ans d'environ 20 %.

Dans un autre registre, Citherlet et Defaux [25] analysent et comparent 3 variantes d'une même maison familiale, chacune étant conçue pour répondre à 1 label énergétique différent. La première variante correspond au label énergétique standard en vigueur en Suisse. La seconde alternative est telle qu'elle répond aux exigences pour le label maison basse consommation d'énergie Minergie. La troisième, quant à elle, est un bâtiment à très basse consommation d'énergie. Les 3 variantes ont donc le même aspect architectural mais différentes épaisseurs et types d'isolation, différents systèmes de production d'énergie, renouvelables ou non.

Le bâtiment a une surface de plancher chauffé de  $266 \text{ m}^2$ , et est situé à Lausanne.

D'une variante à l'autre, il y a une diminution claire de la demande en énergie. Par rapport au cas de référence qu'est la première alternative, le bâtiment Minergie a une demande en énergie 20 % inférieure tandis que la diminution atteint les 50 % dans le cas de la maison très basse consommation.

Cette étude a confirmé le fait qu'améliorer l'isolation et utiliser des sources renouvelables d'énergie donnent une diminution importante de la demande en énergie et donc diminuent significativement les impacts environnementaux de la phase d'utilisation ; et que dans le même temps, ça augmente la part des impacts liés à l'embodied energy dans les valeurs d'impacts totaux. Pour l'impact NRE (Non Renewable Energy), l'embodied energy représente 1/5 de l'impact total pour le cas de référence, cette contribution augmentant à 1/3 pour la maison Minergie et à 1/2 pour la maison basse consommation. Pour le GWP, les fractions d'embodied energy dans le résultat total sont de 1/4, 3/4 et 4/5 respectivement pour les variantes 1, 2 et 3 ; tout cela menant à une réduction de 63 % des impacts totaux.

Dans cette étude, une analyse de sensibilité sur l'origine de la production d'électricité (mix électrique) a également été réalisée. Les résultats ont été donnés pour le mix énergétique suisse et le UCTE mix (Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity). Il est ainsi apparu que les valeurs d'impacts totaux pour le mix énergétique suisse étaient toutes inférieures à celles relatives à l'autre mix et que donc le mix suisse était plus « favorable » du point de vue environnemental.

Peuportier [26], lui, a comparé les analyses de cycle de vie pour 3 maisons unifamiliales situées en France. Le but était d'évaluer l'impact environnemental depuis la fabrication des matériaux jusqu'à leur fin de vie.

Les 3 maisons étudiées sont les suivantes. Tout d'abord la maison traditionnelle en France (maçonnerie), qui est une maison unifamiliale de  $112 \text{ m}^2$  avec une consommation de chauffage de  $70 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ . La deuxième maison considérée est une maison de  $212 \text{ m}^2$  construite sur un seul niveau et dont la consommation de chauffage est de  $130 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ . Il y a cependant un système solaire qui contribue à produire l'énergie nécessaire au chauffage, et qui permet de réduire la consommation à  $90 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ . Finalement, la troisième maison est une maison à ossature bois de  $155 \text{ m}^2$  et dont la consommation de chauffage est égale à  $35 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ .

Pour permettre une comparaison efficace des résultats pour les 3 maisons, il vaut mieux choisir comme unité fonctionnelle  $1 \text{ m}^2$  de surface habitable plutôt que le bâtiment en entier. En effet, en considérant le bâtiment dans son entièreté, on trouve pour la maison 2 des impacts environnementaux bien supérieurs à ceux des 2 autres cas, ce qui est normal vu qu'elle est beaucoup plus grande que les autres.

En considérant  $1\text{ m}^2$  de surface habitable, on trouve tout d'abord que les impacts de la maison 3 sont la moitié de ceux de la maison 1. De plus, entre les maisons 1 et 2, on trouve qu'elles ont le même impact GWP, mais que du point de vue du CED, l'impact pour la maison 2 est de l'ordre de 25 % inférieur à celui de la maison 1.

De plus, une analyse de sensibilité a été menée dans cet article, sur le transport des matériaux. Ainsi, si le transport s'effectue par camion sur  $100\text{ km}$ , les émissions de  $\text{CO}_2$  relatives au transport représentent seulement 1,5 % du total. Par contre, si les matériaux sont transportés sur une plus grande distance ( $5000\text{ km}$  par bateau et  $500\text{ km}$  par camion), le pourcentage passe à 2,4 %, ce qui reste limité.

La plupart des analyses de cycle de vie de bâtiment étudié sont faites dans des pays développés ; très peu sont menées dans des pays en voie de développement.

Ortiz-Rodriguez et al. [27] a, lui, réalisé une comparaison de l'analyse de cycle de vie de 2 logements, le premier situé en Espagne (pays développé) et le second situé en Colombie (pays en voie de développement). L'objectif est d'étudier et de quantifier la différence des énergies consommées et des impacts environnementaux des 2 logements durant toute la durée de vie (construction, utilisation et fin de vie).

Les résultats montrent que la phase d'utilisation pour la maison en Colombie représente un plus petit pourcentage des impacts totaux que la maison en Espagne.

En Espagne, la phase d'utilisation contribue pour approximativement 89 – 98 % des impacts totaux tandis que pour la Colombie, cette contribution est de 64 – 92 % ; le reste des contributions pour la Colombie sont : la phase de construction intervient pour 7 – 28 % et la fin de vie pour plus ou moins 1 – 9 % de l'impact total du cycle de vie.

En changeant la base de données, les auteurs ont trouvé des différences de 17 % sur les résultats totaux.

En conclusion de l'article, il apparaît que les différences de consommation entre les 2 logements ne sont pas uniquement dues aux différences bioclimatiques, mais sont également dues aux habitudes de consommations dans chaque pays.

De plus, cet article fait transparaître le fait que la contribution majoritaire de la phase d'utilisation qui apparaît sans cesse dans les analyses de cycle de vie menées en Europe ou aux USA ne peut pas être simplement transférée aux pays en voie de développement, sans avoir fait un minimum de recherche et d'étude au préalable.

De tout ce qui a été énoncé plus haut, il apparaît qu'aucun article ne porte sur l'analyse d'un même bâtiment pour lequel on considère des peaux différentes. Cela ne veut pas dire qu'il n'en n'existe pas, mais qu'en tout cas, le sujet n'a pas encore été beaucoup traité.

C'est donc ce que nous allons faire dans ce travail. Lors de l'analyse des résultats obtenus, nous pourrons voir si les diverses observations relevées dans les différents articles précédents peuvent également être observées dans notre propre étude.

## II. DESCRIPTION DU BÂTIMENT DE RÉFÉRENCE ÉTUDIÉ

### II.1. Fonction et description générale du bâtiment étudié

Comme dit précédemment, le but de ce travail de fin d'études est de comparer les ACV de différents types d'enveloppes appliquées à un même bâtiment.

Le bâtiment que nous allons considérer tout au long de ce travail est une maison située dans la commune de Liège (à Chênée plus précisément). Celle-ci fait partie d'un projet de construction de 10 maisons sociales en structure acier qui seront construites dans les mois à venir.

La maison étudiée est une maison unifamiliale 4 façades à 1 étage, avec une toiture 2 versants, mais sans cave ni grenier. Le rez-de-chaussée comprend un hall d'entrée avec escalier donnant sur l'étage, une pièce de vie salon/salle à manger/cuisine ouverte, un wc, un débarras situé sous l'escalier ainsi qu'une chambre double avec douche. A l'étage se trouvent un hall de nuit avec mezzanine sur l'entrée, un dressing, une buanderie, une salle de bains avec douche et wc, et 2 chambres simples.

### II.2. Plans et dimensions de la maison

Les Figure 4, Figure 5 et Figure 6 fournissent les plans des 2 étages de l'habitation ainsi qu'une coupe.

Sur la Figure 4, nous pouvons voir une indication concernant l'orientation de la maison : la façade avant est orientée à l'E-NE.

En ce qui concerne la pente de la toiture, celle-ci est de 30°.

Si on prête attention aux plans de la maison, il apparaît que ses dimensions extérieures sont basées sur une trame spécifique de 65,4 cm :

- longueur de 10,464 m = 16 \* 0,654
- largeur de 6,54 m = 10 \* 0,654

Cela s'explique par le fait que la structure de la maison est en acier, et que la trame est en réalité l'entre-distance entre 2 éléments verticaux de la structure porteuse.

En ce qui concerne cette structure, celle-ci est composée d'éléments minces : la maison sera construite selon le système Styltech, information qui nous a été fournie par l'architecte de la maison.

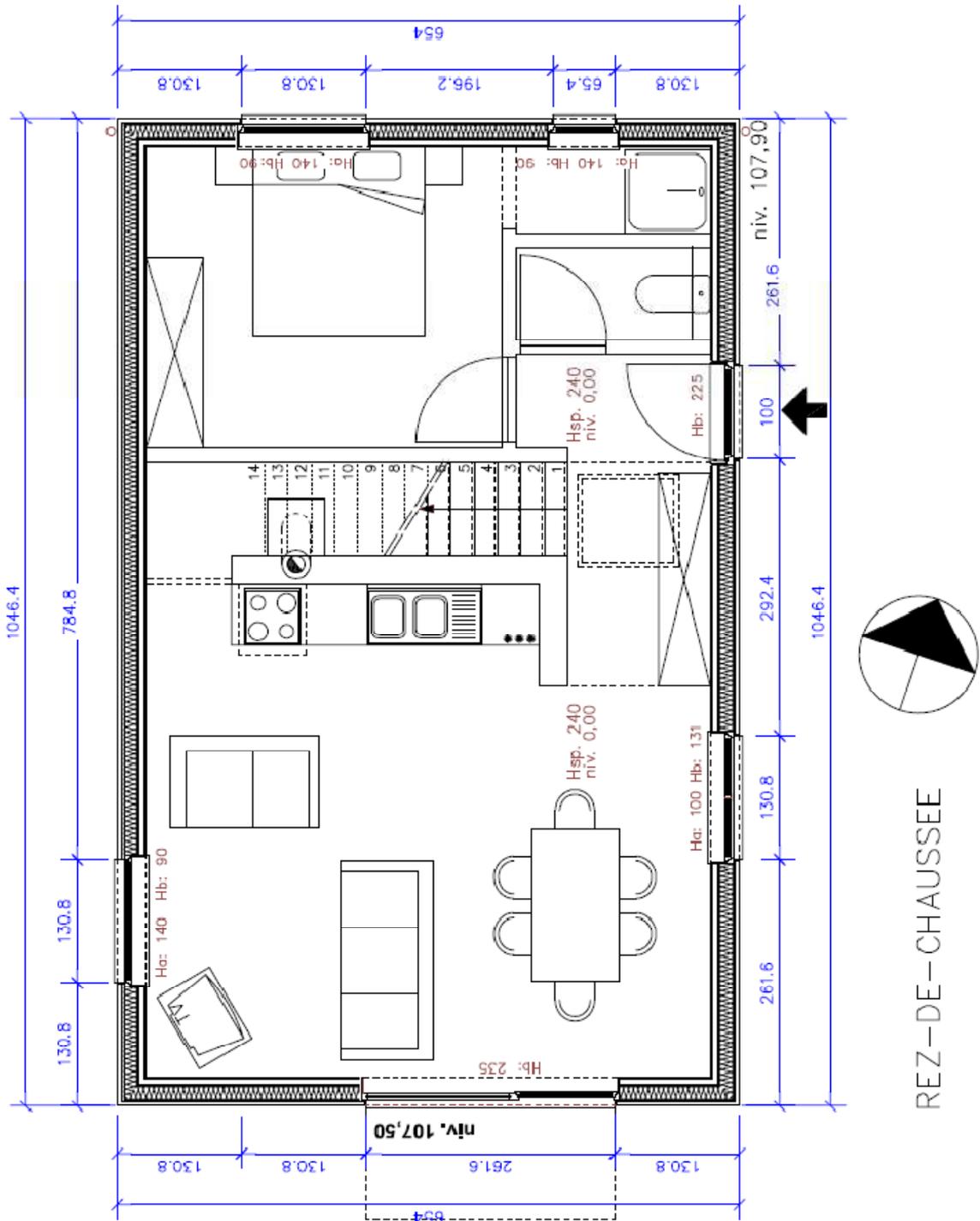
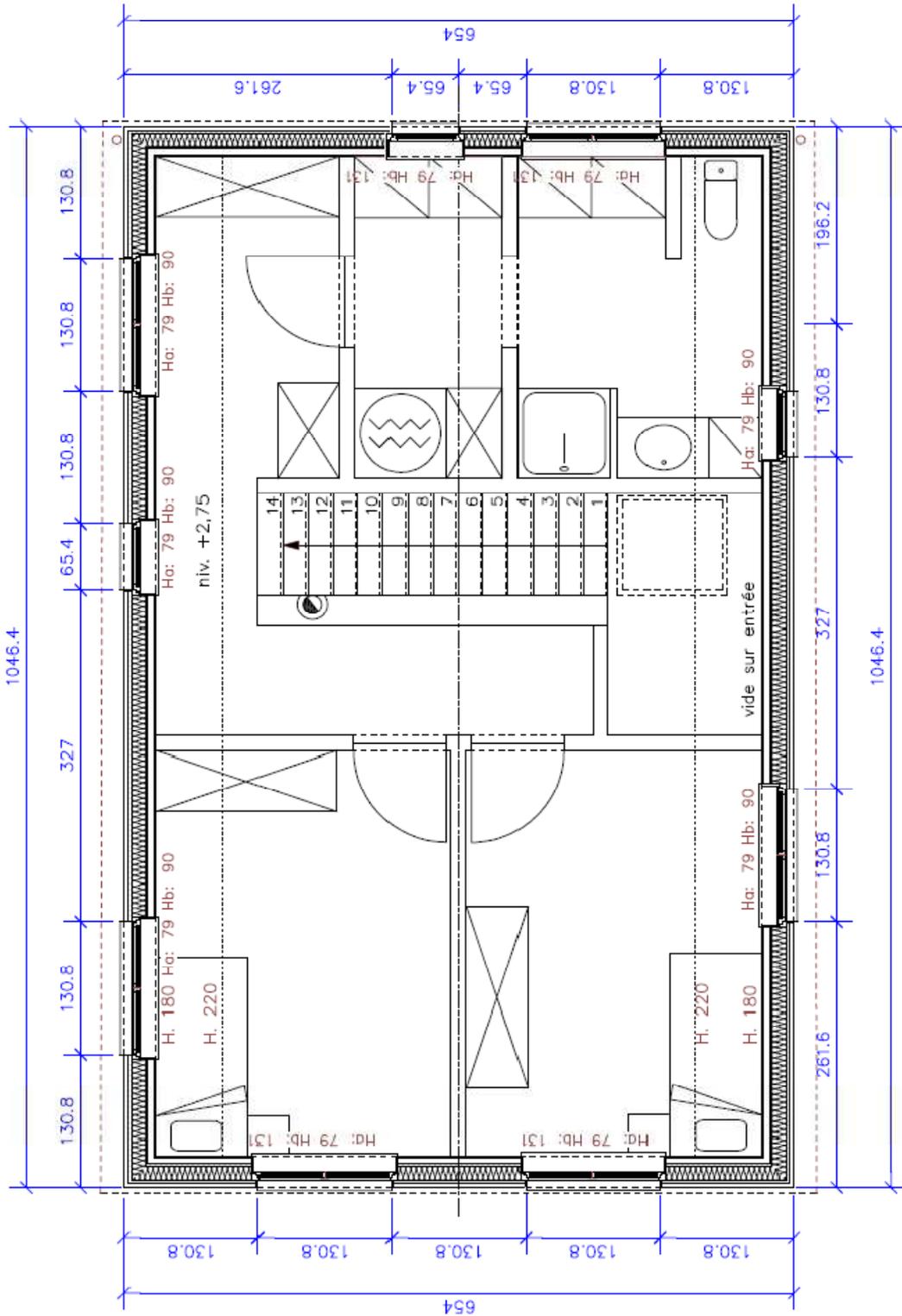


Figure 4 : Plan du rez-de-chaussée (longueurs en [cm])



ETAGE

Figure 5 : Plan de l'étage (longueurs en [cm])

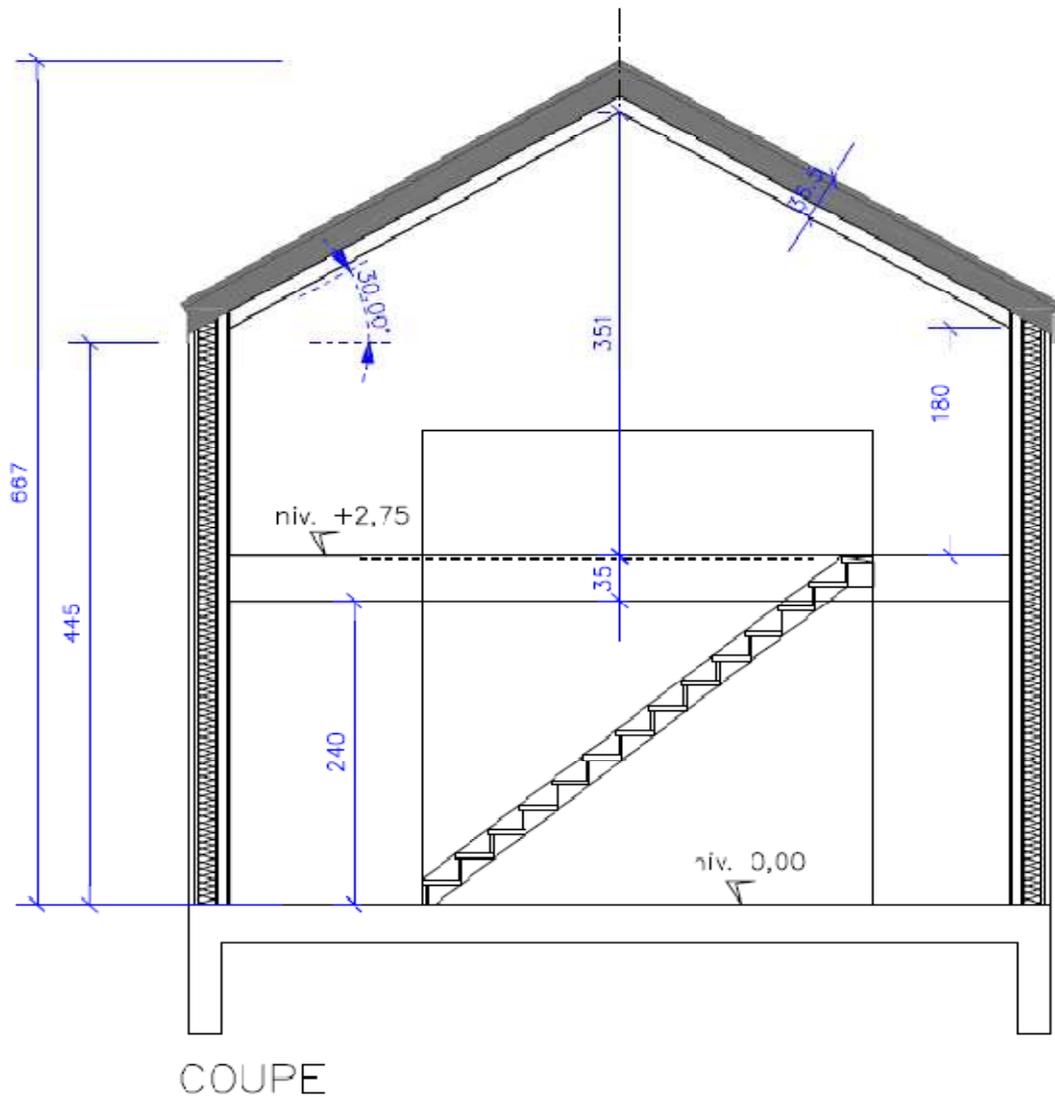


Figure 6 : Coupe (longueurs en [cm])

### II.3. Description de la structure portante de la maison

De la documentation sur le principe de construction Styltech ([28]), nous pouvons tirer les informations suivantes :

Styltech est un système constructif destiné à la réalisation de bâtiments résidentiels de hauteur maximum R+2. Le principe général de réalisation de l'ossature en acier consiste dans l'utilisation de profilés en acier plat plié à froid galvanisé assemblés par vis auto-perceuses. Ces profils sont assemblés et liaisonnés entre eux par les vis et accessoires pour former des composants structurels rigides (pans de mur, fermettes de toiture, planchers...) de l'ossature. Les composants de même type sont liés entre eux (par assemblage, contreventements ou autres...) pour reprendre des efforts dus aux actions sollicitantes sur la construction : neige, vent...

Le concept Styltech complète extérieurement la structure en profilés à froid par l'utilisation des techniques d'isolation thermique par l'extérieur utilisant tous types de parements (enduits plastiques, clins, vêtements en pierres naturelles ou briques de parement, bardages bois, acier ...) [28].

Le concept Styltech complète intérieurement la structure métallique en profilés à froid par l'utilisation de produits de doublage par plaques de plâtre cartonées. La solution de base est réalisée par fixation de ces plaques sur une ossature métallique secondaire horizontale fixée sur les montants de structure, ce qui réalise un vide technique permettant le passage des canalisations dissimulées [28].

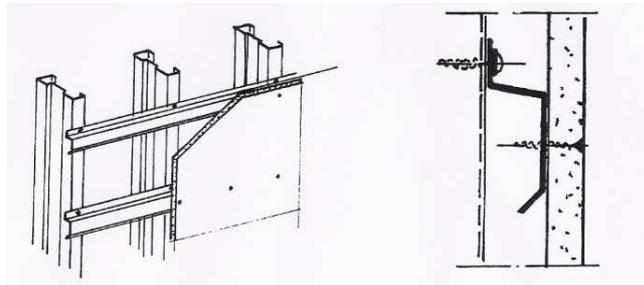


Figure 7 : Représentations du vide technique (source : [28])

Les profilés utilisés pour la structure sont en général de type (MULTI)BEAM :

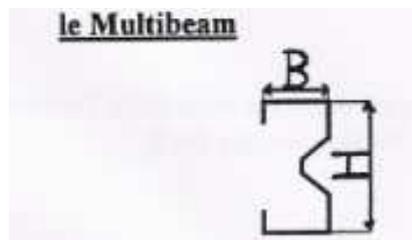


Figure 8 : Représentation 2D du profilé (MULTI)BEAM (source : [28])

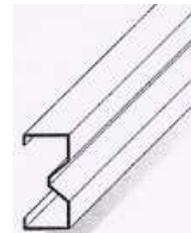


Figure 9 : Représentation 3D du profilé (MULTI)BEAM (source : [28])

Vous trouverez à l'Annexe A page 178 les caractéristiques techniques des profils (MULTI)BEAM.

Pour les montants verticaux des murs extérieurs, la valeur  $H$  des profilés (en se référant à la Figure 8) est généralement de  $14\text{ cm}$  (profilé type B140/150 de la Figure 109), tandis que pour les éléments de structure de la toiture, les profilés ont le plus souvent une largeur de  $20\text{ cm}$  (profilé type B200/160 de la Figure 109).

#### II.4. Modification des dimensions de la maison

Une remarque importante à faire est que, après lecture de la documentation concernant le procédé Styltech ([28]), il apparaît que l'entre-axe de base des montants verticaux de l'ossature peut être de  $60, 90, 120, 150$  ou  $180\text{ cm}$ . Or, comme nous l'avons mentionné précédemment, la trame que l'on retrouve sur les plans de la maison étudiée est de  $65,4\text{ cm}$ .

Par conséquent, nous avons décidé de modifier les dimensions extérieures de la maison – ainsi que les dimensions des ouvertures – pour se conformer à cet entre-axe de base, que nous allons prendre égal à 60 cm :

- longueur de 9,6 m = 16 \* 0,6
- largeur de 6 m = 10 \* 0,6

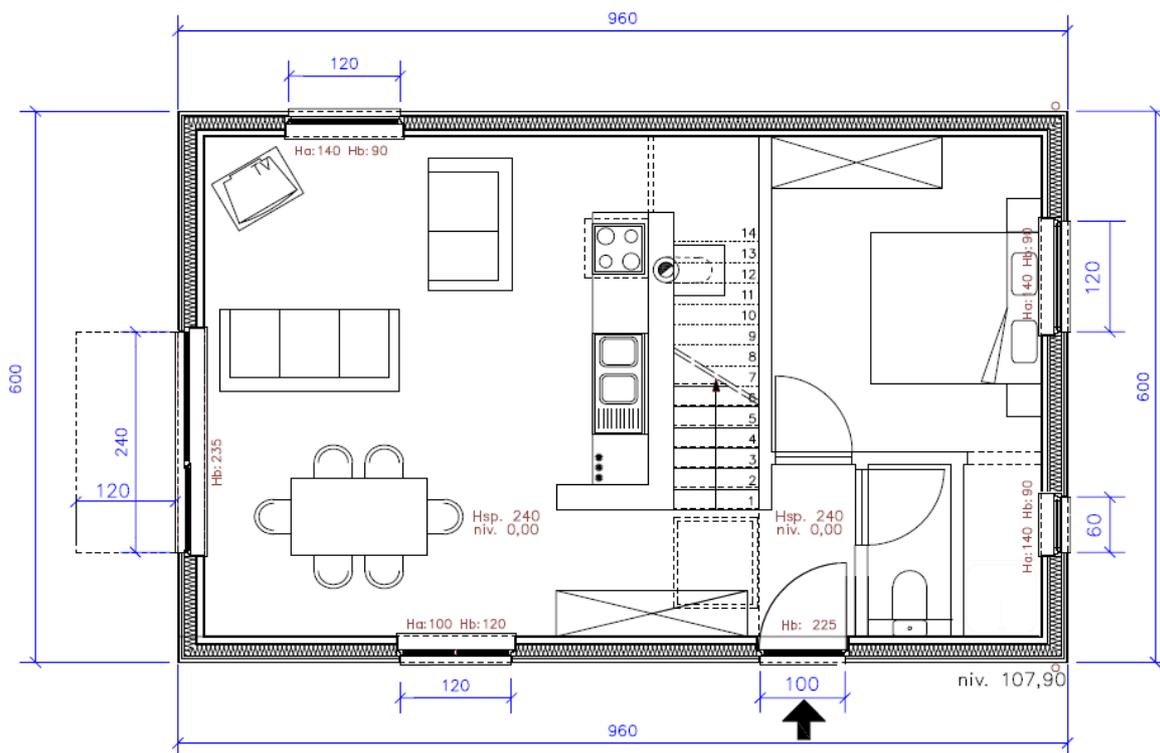
Toutes les pièces ont donc une superficie légèrement inférieure à celle qu’elles avaient au départ.

La maison aura donc une superficie de :

$$S = 2 * (9,6 * 6) = 115,2 m^2$$

Suite à ces changements de dimensions, la hauteur du bâtiment va également être modifiée. En effet, si on conserve une pente de toiture de 30°, la hauteur du faîte va diminuer légèrement (tout en gardant la hauteur sous plafond du rez-de-chaussée et la hauteur entre le plancher et la base de la toiture pour l’étage égales à ce qu’elles étaient à l’origine).

Les figures suivantes montrent les plans « définitifs » de la maison :



REZ-DE-CHAUSSEE



Figure 10 : Plan définitif du rez-de-chaussée (longueurs en [cm])

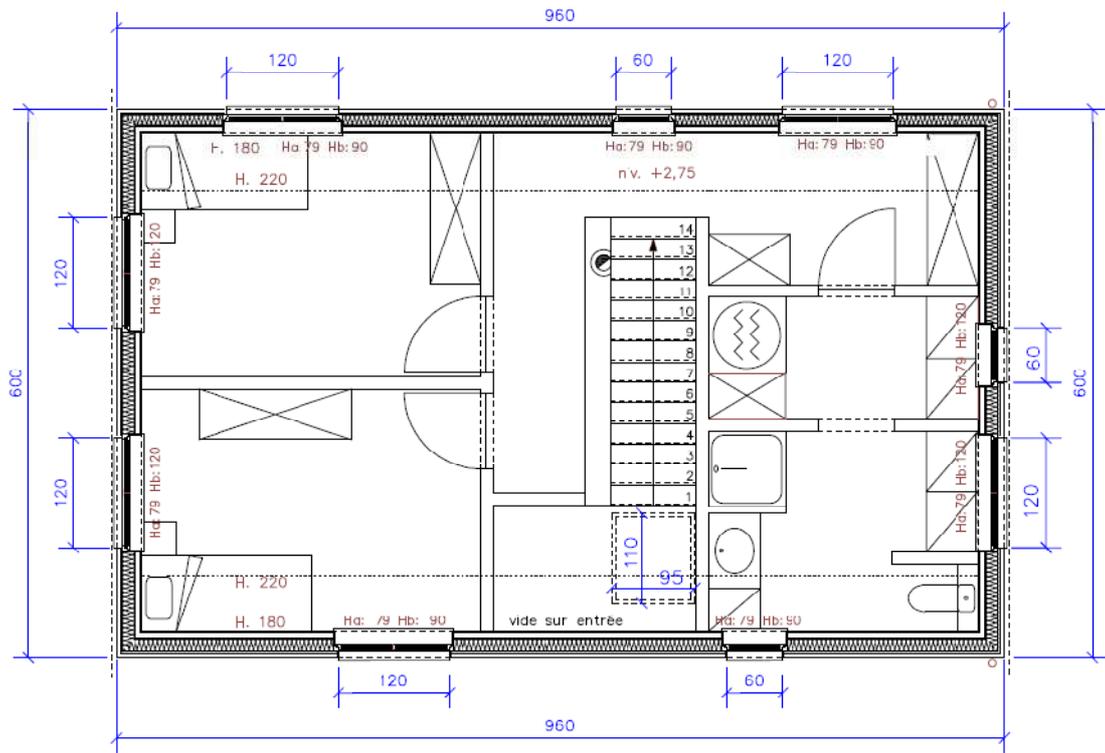


Figure 11 : Plan définitif de l'étage (longueurs en [cm])

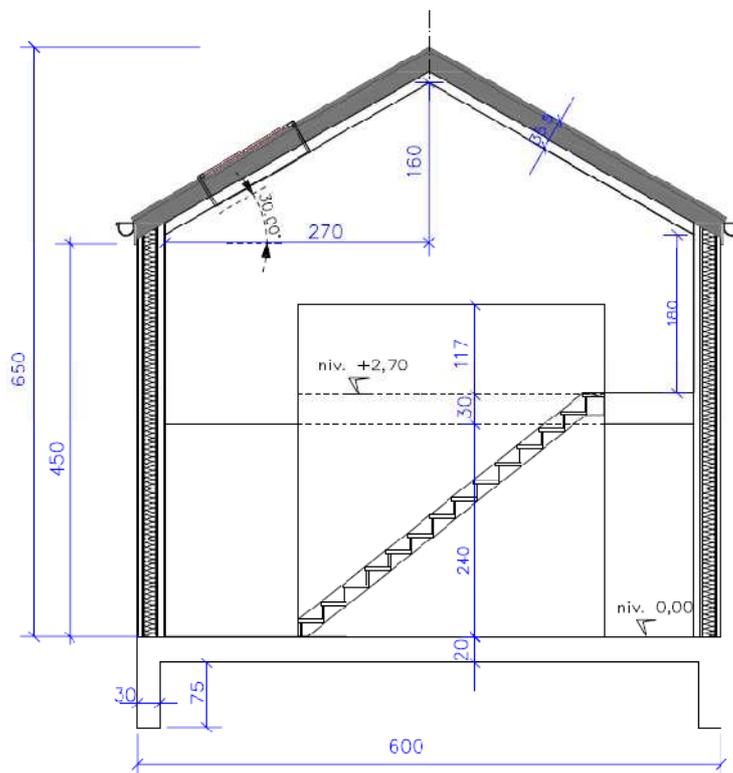


Figure 12 : Coupe définitive (longueurs en [cm])

### III. DESCRIPTION DES PAROIS DE LA MAISON

Dans le but de définir les différentes parois de la maison, voici les différentes informations que nous avons pu recueillir auprès de l'architecte :

- structure portante faite d'éléments minces – Styltech
- isolation des murs extérieurs et de la toiture par de la laine de bois mise en place entre les profilés acier
- pente de la toiture de 30° (cf. Figure 12)
- murs extérieurs avec bardage faits avec des panneaux Trespa
- finitions intérieures avec des plaques de plâtre
- cloisons intérieures non porteuses et non isolées, faites d'une structure métallique entre des plaques de plâtre
- pour les murs extérieurs, vide technique de 6 cm entre la structure portante et la plaque de finition en plâtre, et ce pour permettre le passage des tuyaux et autres canalisations
- chauffage central avec système d'émission par radiateurs
- plancher intermédiaire « sec » avec ossature métallique (solives), isolé acoustiquement avec laine de bois entre solives
- dalle de sol en béton armé, de 20 cm d'épaisseur, isolée et sur terre-plein
- fondations en béton armé d'une largeur de 30 cm et d'une épaisseur de 75 cm, sur tout le pourtour de la maison (poutre de ceinture)
- la cloison située derrière la cuisine n'est pas une cloison « normale » : il s'agit d'une cloison faite en bauge
- ventilation par le biais de grilles présentes au niveau des fenêtres

#### III.1. Détermination des cas d'étude

Comme dit précédemment, le but de ce TFE est de comparer les ACV relatives à un même bâtiment sur lequel sont appliquées différentes peaux tout en conservant la même structure portante.

Nous avons dès lors dû décider quelles peaux appliquer à ce bâtiment à ossature acier Styltech, en se mettant dans l'optique que ces peaux pourraient réellement être mises en œuvre dans un bâtiment construit actuellement.

La première peau que nous avons considérée est un bardage réalisé avec des panneaux Trespa. Nous avons fait ce choix car il s'agit de la « vraie » peau du bâtiment, c'est-à-dire celle qui sera réellement mise en place lors de la construction de l'habitation étudiée.

Pour plus d'informations concernant les panneaux Trespa, se référer à l'Annexe B, page 179.

Après le bardage en panneaux Trespa, les peaux suivantes que nous avons décidé d'étudier sont le bardage acier et le parement en briques, parce qu'il nous a semblé que ces types de parement étaient les plus couramment utilisés.

Pour ces 3 cas, les compositions du plancher intermédiaire, de la toiture, des cloisons intérieures ainsi que de la dalle de sol seront identiques. La différence viendra de la composition du mur extérieur.

Nous avons par la suite décidé de pousser l'analyse un peu plus loin. Pour cela, nous avons choisi d'étudier 3 cas supplémentaires.

Le premier est le cas d'une maison avec parement en briques, mais dont la structure portante des murs extérieurs n'est plus une structure acier mais bien des blocs de maçonnerie (parpaings). Ce cas, comparé au cas de la maison acier/brique, permettra non seulement de faire une comparaison, du point de vue ACV, des 2 types de structures portantes (entre les éléments acier et la maçonnerie), mais également de constater les différences éventuelles, du point de vue épaisseur d'isolant nécessaire. Notons que les autres parois de ce cas sont identiques à celles des 3 premiers cas.

Le cas suivant est le cas de la maison traditionnelle, c'est-à-dire comme elle est construite traditionnellement en Belgique, à savoir avec des murs extérieurs en maçonnerie, des planchers intermédiaires faits avec des hourdis et une toiture réalisée avec des fermes en bois. Ce cas nous semblait très intéressant à réaliser, cela dans le but de pouvoir quantifier les impacts liés à la construction de maisons dites traditionnelles, et de pouvoir comparer ces impacts à ceux relatifs à la construction de maisons à ossature acier. Les résultats de cette comparaison pourront être confrontés à ceux trouvés dans les articles traitant du même sujet.

Finalement, dans le but de pouvoir voir les effets d'une cloison en bauge sur les impacts liés à la construction de la maison (vu que nous avons effectivement une cloison réalisée en bauge dans l'habitation considérée), nous avons décidé d'étudier le cas de la maison à ossature acier, avec parement fait de panneaux Trespa (1<sup>er</sup> cas), mais en considérant toutes les cloisons intérieures de type « normale » (la définition de la cloison « normale » est faite en page 46).

Au final, nous avons donc 6 cas de maison à étudier.

Notons que l'objectif du TFE est désormais légèrement différent de ce qu'il était au départ. En effet, à l'origine, il n'était prévu que de changer la peau du bâtiment de référence. Or, en étudiant les 3 cas supplémentaires, nous modifions également la structure porteuse du bâtiment. L'objectif du TFE en est donc modifié.

### **III.2. Description des compositions des parois des 6 cas**

Les compositions des différentes parois des 6 cas sont décrites ci-après – les parois identiques ne seront présentées qu'une seule fois. Remarquons que nous n'allons pas ici mettre quelles épaisseurs d'isolant sont présentes dans ces parois ; cela sera fait ultérieurement dans ce travail lorsque nous aborderons quelles exigences thermiques sont requises pour les différentes parois (PEB).

Pour la détermination des compositions des parois, nous nous sommes tout d'abord basés sur les informations fournies par l'architecte. De plus, nous les avons créées de telle sorte qu'elles puissent réellement être mises en œuvre dans un bâtiment construit actuellement.

### III.2.1. 1<sup>er</sup> cas : Maison acier peau trespa

- Mur extérieur

Pour rappel, les informations fournies par l'architecte concernant la composition du mur extérieur sont que la structure portante est réalisée selon le système Styltech, que l'isolation est faite avec de la laine de bois mise en place entre les profilés verticaux, et pour finir qu'un vide technique de 6 cm est réalisé entre les profilés et la finition plaque de plâtre.

La structure portante du mur est faite de profilés minces. Pour les montants verticaux, nous allons considérer des profilés MULTIBEAM (cf. Figure 8 et Figure 9) d'une largeur de 14 cm (profilé type B140/150 de la Figure 109), et espacés de 60 cm, comme vu précédemment. De plus, ces montants seront emboîtés et fixés en haut et en bas sur des profilés en U :

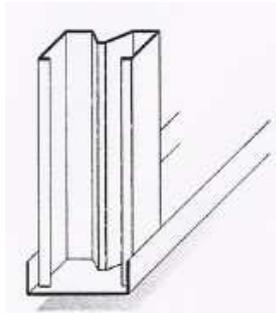


Figure 13 : Emboîtement des profilés (source : [28])

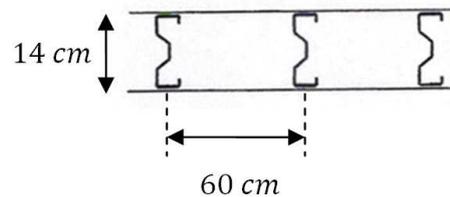


Figure 14 : Espacement des profilés pour le mur extérieur (source : [28])

Dans les spécifications de l'architecte, il n'est mentionné qu'une isolation « interne » du mur, c'est-à-dire située entre les montants verticaux de la structure portante en acier. Cependant, la structure portante étant ponctuelle, nous risquons, si nous ne considérons qu'une isolation interne, d'avoir des déperditions très importantes à cause des ponts thermiques, et ainsi de ne pas répondre aux exigences thermiques pour la paroi (cette remarque pourra être vérifiée ultérieurement – cf. point IV.2). Dans ce cas, nous devons donc peut-être considérer une double isolation : à la fois interne, réalisée avec de la laine de bois (comme précisé par l'architecte), mais également externe, faite dans ce cas avec des panneaux de polystyrène expansé, qui est un des isolants les plus couramment employés pour ce type d'utilisation. Notons que pour cet usage, l'isolant polyuréthane est également très souvent employé, celui-ci ayant de très bonnes propriétés isolantes (meilleures que celles du polystyrène expansé). Il a cependant l'inconvénient d'être beaucoup plus cher.<sup>9</sup>

<sup>9</sup> Voici des ordres de grandeur pour le prix des isolants (par ordre croissant):

- panneau polystyrène expansé 1 cm d'épaisseur : 1 €/m<sup>2</sup>
- panneau laine de bois 1 cm d'épaisseur : 2 €/m<sup>2</sup>
- panneau polyuréthane 1 cm d'épaisseur : 3 €/m<sup>2</sup>

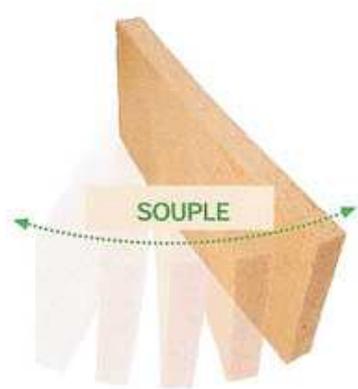


Figure 15 : Panneau de laine de bois 1 (source : <http://www.habitat-ecologique.be>)



Figure 16 : Panneau de laine de bois 2 (source : <http://www.isolation-et-chauffage.com>)



Figure 17 : Panneau de polystyrène expansé (source : <http://www.polydec.com>)

Remarquons que la fixation de l'isolation extérieure éventuelle se fera par l'intermédiaire d'un panneau OSB d'une épaisseur de 18 *mm*.



Figure 18 : Panneau OSB (source : <http://www.castorama.fr>)

La finition intérieure du mur extérieur – ainsi que des autres parois – est la plaque de plâtre. Celle-ci a une épaisseur de 12,5 *mm*.

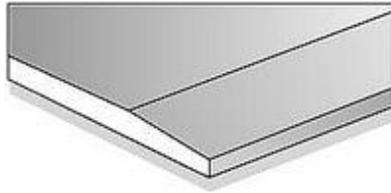


Figure 19 : Plaque de plâtre (source : <http://www.gyproc.be>)

La fixation des plaques de plâtre sur les montants verticaux de l'ossature se fait par l'intermédiaire d'une ossature secondaire, qui est réalisée par des profilés PS. Cela crée un vide technique tel qu'il l'a été spécifié par l'architecte. Cette configuration est représentée à la Figure 7.

La finition extérieure du mur est, comme dit précédemment, un bardage de panneaux Trespa. En ce qui concerne la fixation de ces panneaux sur l'ossature acier, le fabricant des panneaux propose plusieurs alternatives ([29]). Nous avons décidé d'opter pour une fixation visible avec des vis, sur une ossature sous-jacente en bois (quadrillage).

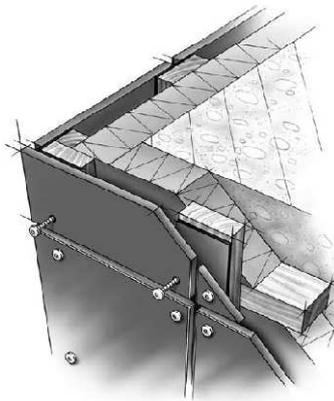


Figure 20 : Fixation des panneaux Trespa avec ossature secondaire bois (source : [29])

Les lisses et chevrons de l'ossature secondaire sont de dimensions  $40 * 75 \text{ mm}$  ([29]). Ils sont espacés, horizontalement et verticalement, de  $60 \text{ cm}$ .

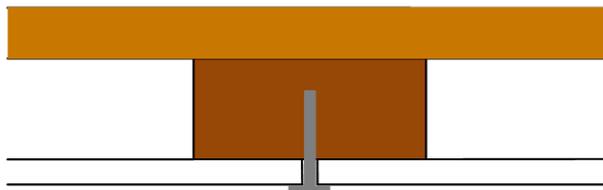


Figure 21 : Détail fixation des panneaux Trespa

Finalement, la composition du mur extérieur considérée pour la maison acier/trespa est la suivante :

Extérieur	Panneau Trespa	1 cm
	Fixation panneau – ossature bois	4 cm
	Isolant extérieur éventuel : polystyrène expansé	
	Panneau OSB	1,8 cm
	Remplissage isolant laine de bois	
	Montants verticaux ossature acier	14 cm
	Ossature secondaire	6 cm
Intérieur	Plaque de plâtre	1,25 cm

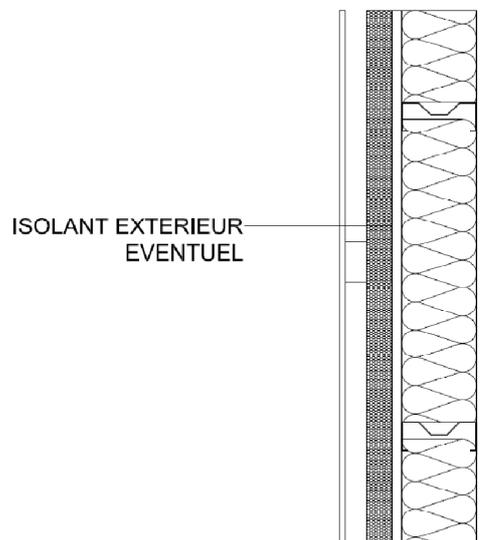


Figure 22 : Représentation mur extérieur maison acier/trespa

- Toiture

Pour rappel, la seule information fournie par l'architecte sur la composition de la toiture concerne son isolation : celle-ci est une isolation interne faite avec de la laine de bois.

Cependant, comme pour le mur extérieur, nous devons peut-être aussi tenir compte dans ce cas-ci d'une isolation externe supplémentaire avec du polystyrène expansé, pour répondre aux exigences thermiques ; cela devra bien sûr être vérifié ultérieurement.

En ce qui concerne la structure portante de la toiture, nous allons considérer une ferme en treillis dont les différents éléments qui la composent sont des profilés de type MULTIBEAM d'une largeur de 20 cm (profilé type B200/160 de la Figure 109). L'espacement que nous allons considérer entre 2 fermes est de 1,2 m.

La pente de la toiture est de  $30^\circ$ . Vu la configuration de l'étage de l'habitation, la ferme de la toiture devra avoir une forme bien spécifique, du style de celle qui est représentée à la figure suivante, et ce pour permettre de dégager l'espace sous la toiture (combles habitables) :

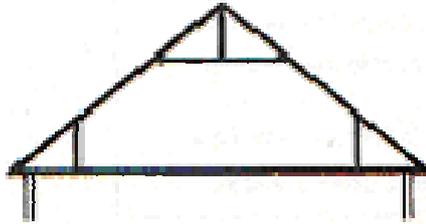


Figure 23 : Forme de la toiture (source : <http://philippe.berger2.free.fr/Bois/Cours/Charpentes>)

Le recouvrement de la toiture se fera avec des ardoises, de type Alterna de la société Eternit ([30]). Le format considéré pour celles-ci est :  $40\text{ cm} \times 27\text{ cm}$ , avec une épaisseur nominale de  $4\text{ mm}$ .



Figure 24 : Ardoise  $40\text{ cm} \times 27\text{ cm}$  (source : [30])

Le placement des ardoises se fera tel que représenté à la figure suivante ; il s'agit d'un recouvrement double :

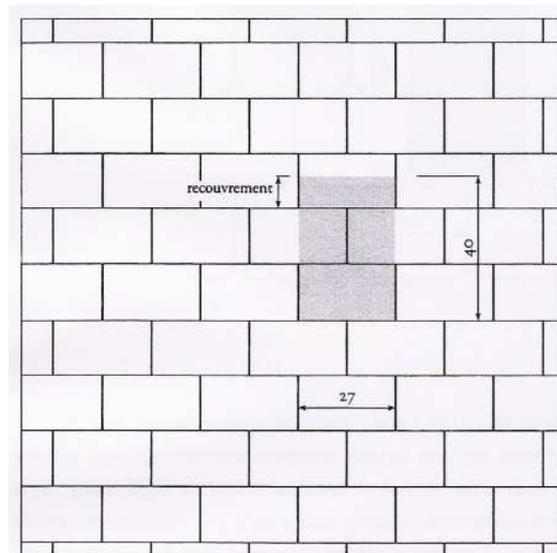


Figure 25 : Placement des ardoises  $40\text{ cm} \times 27\text{ cm}$  par recouvrement double (source : [30])

Ainsi, il y aura toujours au moins 2 épaisseurs d'ardoises superposées en n'importe quel endroit du revêtement ; l'épaisseur de la couche d'ardoise à considérer est donc de 2 fois l'épaisseur nominale.

Suivant les indications de la documentation fournie par le fabricant ([30]), le recouvrement des ardoises sera de 90 mm (pente de la toiture  $\geq 30^\circ$  et  $< 70^\circ$ ), et l'entre-axe des lattes supportant les ardoises sera de 155 mm.

Ce lattage sera constitué d'éléments en acier de forme W (Figure 26). Il reposera sur un contre-lattage fait d'éléments en bois de section 45 mm  $\times$  22 mm espacés tous les 60 cm.

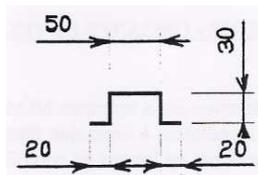


Figure 26 : Eléments acier de forme W (source : [28])

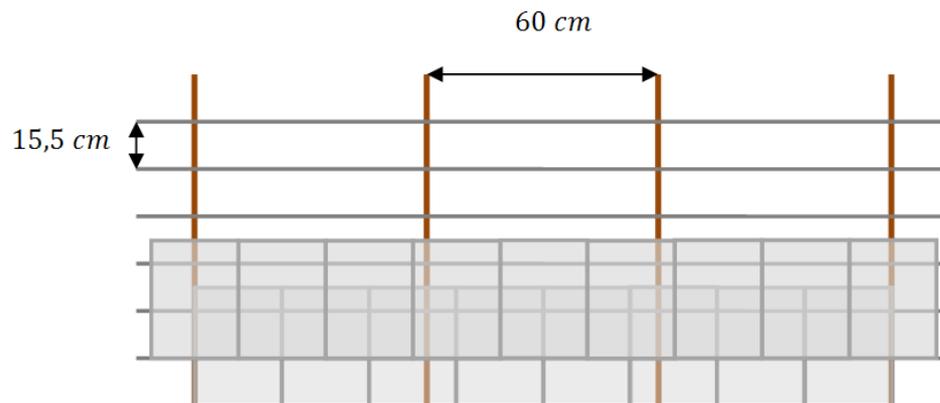


Figure 27 : Représentation du lattage et du contre-lattage

En ce qui concerne la fixation des plaques de plâtre sur la structure de toiture, celle-ci se fera grâce à des rails horizontaux en acier, de même section que les éléments du lattage (Figure 26), et espacés de 60 cm.

La composition de la toiture considérée pour la maison acier/trespa est la suivante :

Extérieur	Ardoises	0,8 cm
	Liteau acier	3 cm
	Contre-liteau bois	2,2 cm
	Isolant extérieur éventuel : polystyrène expansé	
	Panneau OSB	1,8 cm
	Panne acier	3 cm
	Remplissage isolant laine de bois	
	Elément de ferme acier	20 cm
	Rail horizontal acier	3 cm
	Intérieur	Plaque de plâtre

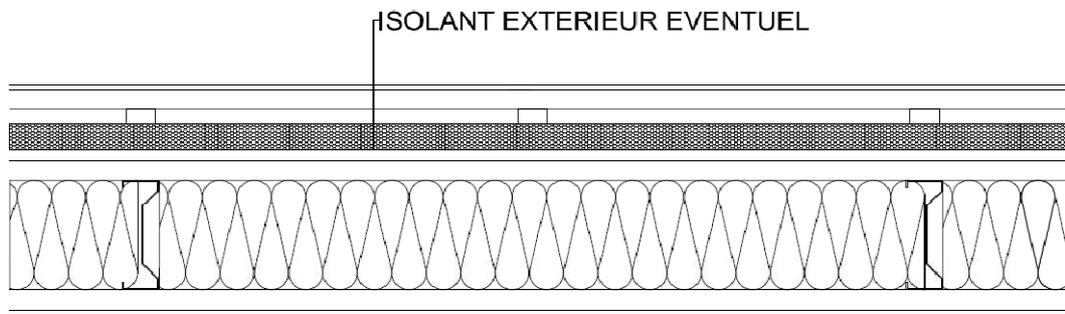


Figure 28 : Représentation toiture maison acier/trespa

- Plancher

Pour rappel, les informations fournies par l'architecte concernant la composition du plancher intermédiaire est qu'il s'agit d'une solution sèche : l'ossature porteuse du plancher est constituée d'un platelage supérieur assurant la répartition des charges sur les solives, qui sont faites de 2 profilés acier MULTIBEAM placés dos à dos. De plus, pour assurer l'isolation acoustique, l'espace entre les solives est comblé par de la laine de bois.

Nous considérons un entre-axe entre solives de 60 cm, et une hauteur de solive de 20 cm comme pour la toiture.

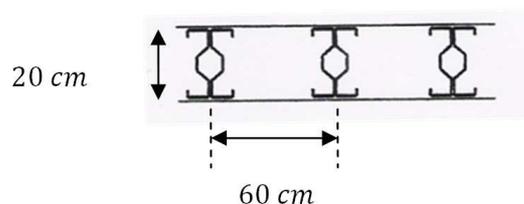


Figure 29 : Espacement des profilés pour le plancher intermédiaire (source : [28])

Notons que nous allons considérer 2 types de revêtement final pour le plancher. En effet, à l'étage se situent aussi bien des pièces d'eau que des chambres à coucher ; le revêtement dans ces 2 types de pièces ne peut pas être le même. Dans la salle de bains et dans la buanderie, nous allons placer une finition carrelage tandis que dans le reste des pièces de l'étage (hall de nuit, dressing et les 2 chambres), nous allons poser une finition parquet.

La fixation des plaques de plâtre se fera, comme pour la toiture, grâce à des rails horizontaux en acier (Figure 26) espacés de 60 cm.

– Plancher 1 – finition parquet

La composition du plancher intérieur 1 considérée pour la maison acier/trespa est la suivante :

Dessous	Plaque de plâtre	1,25 cm
	Rail horizontal acier	3 cm
	Solives acier	20 cm
	Remplissage isolant laine de bois	
	Panneau OSB	3,6 cm
Dessus	Parquet bois massif	2 cm

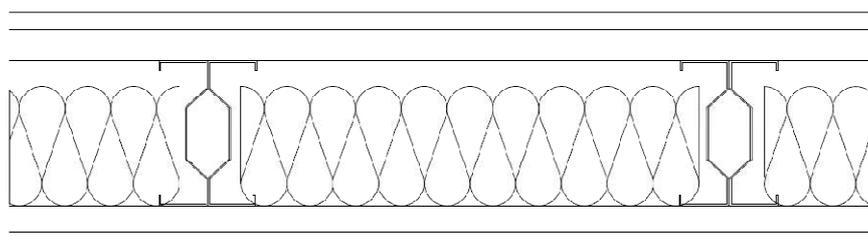


Figure 30 : Représentation plancher 1 maison acier/trespa

– Plancher 2 – finition carrelage

Notons que dans le cas de la finition carrelage, pour savoir mettre en œuvre la chape de mortier nécessaire pour la pose du carrelage, nous devons recourir à l'utilisation d'un bac métallique, qui va faire office de coffrage. Celui-ci a le profil suivant :

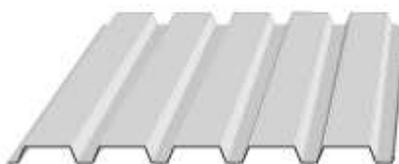


Figure 31 : Bac acier de coffrage (source : <http://www.arcelormittal.com>)

La composition du plancher intérieur 2 considérée pour la maison acier/trespa est donc la suivante :

Dessous	Plaque de plâtre	1,25 cm
	Rail horizontal acier	3 cm
	Solives acier	20 cm
	Remplissage isolant laine de bois	
	Bac métallique coffrage	0,5 cm
	Chape mortier	4 cm
Dessus	Carrelage	1 cm

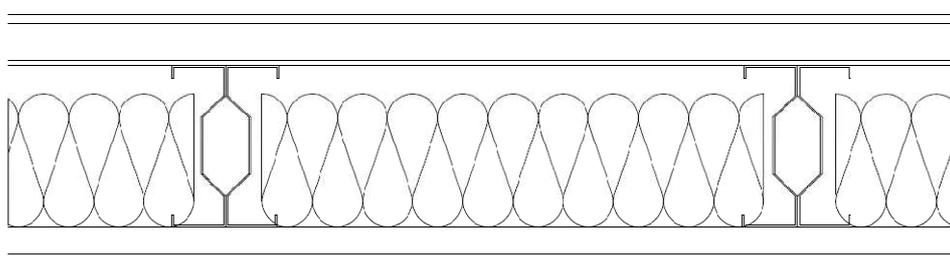


Figure 32 : Représentation plancher 2 maison acier/trespa

- Dalle de sol

Pour rappel, selon les informations fournies par l'architecte, la dalle de sol est en béton, elle est armée d'un treillis, elle a une épaisseur (sans finition) de 20 cm et est isolée.

Nous allons, comme pour le plancher intermédiaire, considérer 2 types de revêtement final pour la dalle. En effet, une des chambres à coucher de l'habitation se trouvant au rez-de-chaussée, il ne nous est pas paru très vraisemblable d'y mettre une finition carrelage, comme pour toutes les autres pièces du rez-de-chaussée (salon/salle à manger/cuisine, hall d'entrée, wc) ; nous avons donc décidé d'y mettre une finition parquet.

Notons que pour réaliser l'isolation de la dalle, nous ne pouvons pas considérer de la laine de bois. En effet, l'isolant que l'on doit placer dans le cas d'une dalle doit être de type « rigide », non seulement parce qu'il est destiné à être « écrasé » (vu que l'on va marcher dessus), mais également parce que ce type d'isolant permet de couler une chape de mortier sans l'utilisation d'un bac de coffrage. Or, la laine de bois, qui est l'isolant que nous avons utilisé jusqu'à présent, est un isolant de type souple. Nous devons donc choisir un autre isolant ; l'isolant qui est généralement placé dans le cas d'une dalle est le polyuréthane et c'est ce que nous allons mettre ici, malgré son coût élevé<sup>10</sup>. Son utilisation au lieu du polystyrène expansé (placé au niveau des murs extérieurs), permettra d'éviter d'avoir une épaisseur de dalle trop importante.

<sup>10</sup> A choisir entre placer le polyuréthane au niveau de la dalle de sol ou au niveau des mur extérieurs, il vaut mieux, pour une question de coût, le placer au niveau de la dalle, la superficie à couvrir étant environ 2 fois moins grande.



Figure 33 : Panneau de polyuréthane (source : <http://www.efisol.com>)

– Dalle 1 – finition parquet

La composition de la dalle de sol 1 considérée est la suivante :

Extérieur	Béton lourd	20 cm
	Armatures dans béton	
	Isolant polyuréthane	
	Panneau OSB	3,6 cm
Intérieur	Parquet bois massif	2 cm



Figure 34 : Représentation dalle 1 maison acier/trespa

En ce qui concerne la quantité d'armatures qui doit être mise en place dans le béton (treillis), pour une maison individuelle, la règle générale dit que la section minimale d'armatures équivaut à 0,4 % de la section de béton de la dalle, et ce dans les 2 directions.

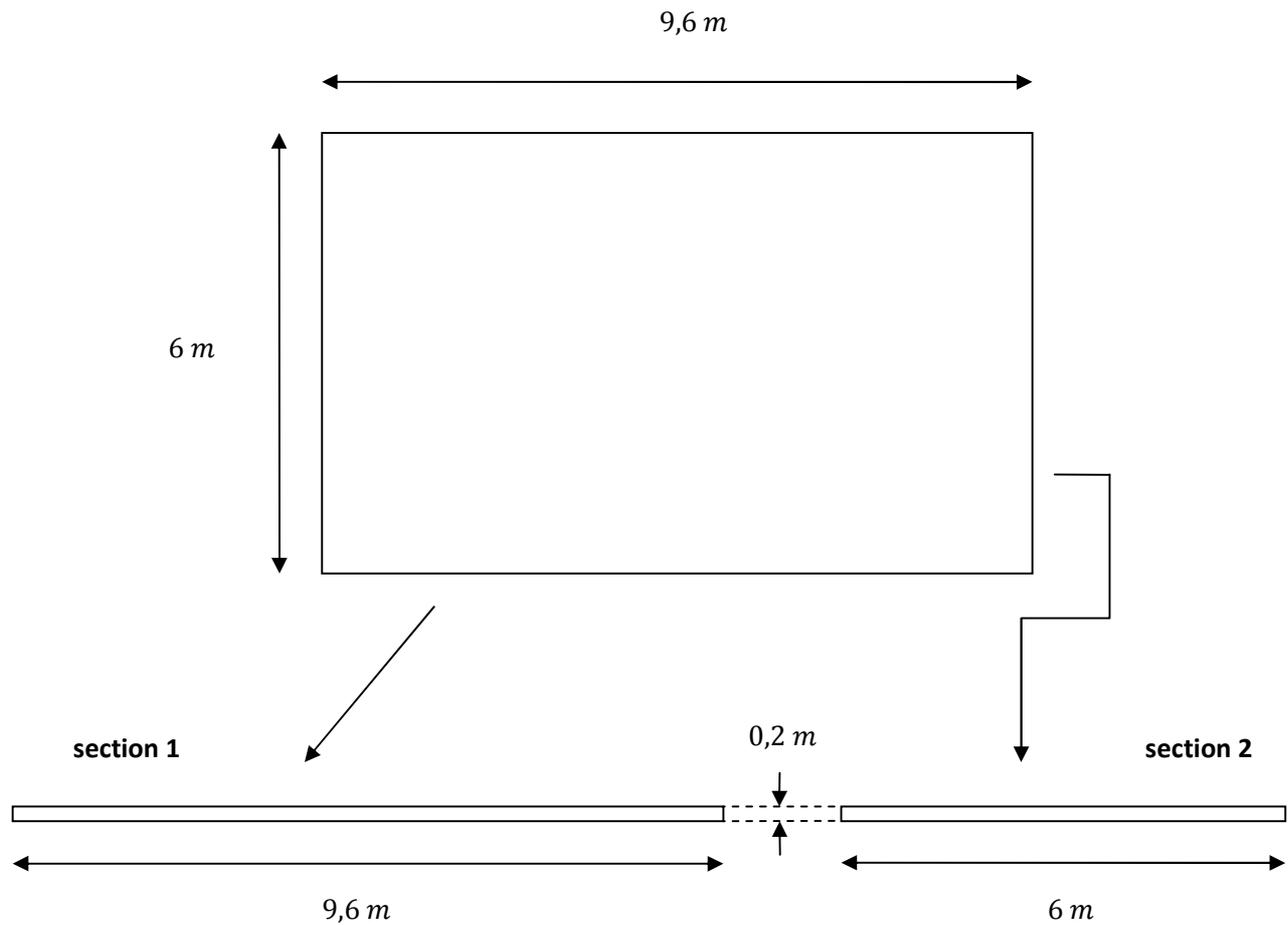


Figure 35 : Sections de béton de la dalle de sol dans les 2 directions

- section 1  
 section de béton =  $9,6 \text{ m} \times 0,2 \text{ m} = 1,92 \text{ m}^2$   
 section minimale d'armatures =  $0,4 \% \times 1,92 = 0,00768 \text{ m}^2$   
 longueur des armatures =  $6 \text{ m}$   
 volume d'armatures =  $0,00768 \times 6 = 0,046 \text{ m}^3$
- section 2  
 section de béton =  $6 \text{ m} \times 0,2 \text{ m} = 1,2 \text{ m}^2$   
 section minimale d'armatures =  $0,4 \% \times 1,2 = 0,0048 \text{ m}^2$   
 longueur des armatures =  $9,6 \text{ m}$   
 volume d'armatures =  $0,00768 \times 6 = 0,046 \text{ m}^3$

Le volume total d'armatures présent dans la dalle est donc de  $0,092 \text{ m}^3$ .

- Dalle 2 – finition carrelage

La seule différence entre la composition de la dalle 1 et celle de la dalle 2 est le revêtement.

La composition de la dalle de sol 2 considérée est la suivante :

Extérieur	Béton lourd	20 cm
	Armatures dans béton	
	Isolant polyuréthane	
	Chape mortier	4 cm
Intérieur	Carrelage	1 cm

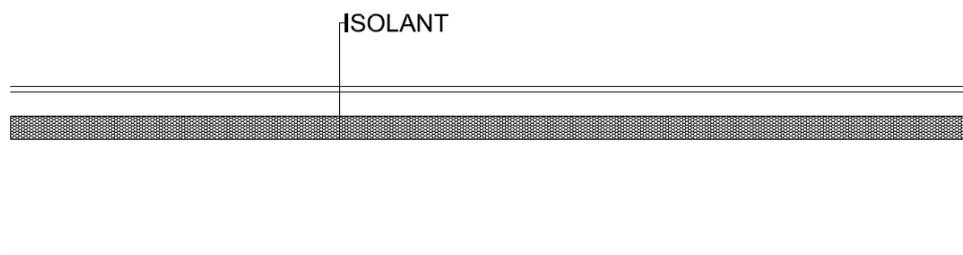


Figure 36 : Représentation dalle 2 maison acier/trespa

La quantité d'armatures mise en place est la même que dans le cas de la dalle 1.

- Cloison intérieure

Nous allons à présent décrire les compositions des cloisons intérieures de la maison.

- Cloison normale

Pour rappel, les informations fournies par l'architecte concernant les cloisons intérieures de type « normale » (c'est-à-dire autres que la cloison faite de bauge) sont que ces cloisons sont non porteuses et non isolées, et faites d'une structure métallique entre des plaques de plâtre. De plus, en se référant aux plans de l'habitation (Figure 10 et Figure 11), on remarque que ces cloisons ont une épaisseur totale de 15 cm.

Après quelques recherches, il s'avère que ce genre de produit est vendu par la société Gyproc – Saint-Gobain ([31]) :

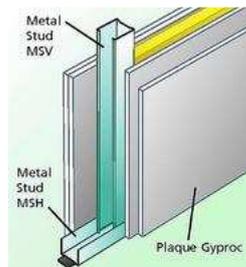


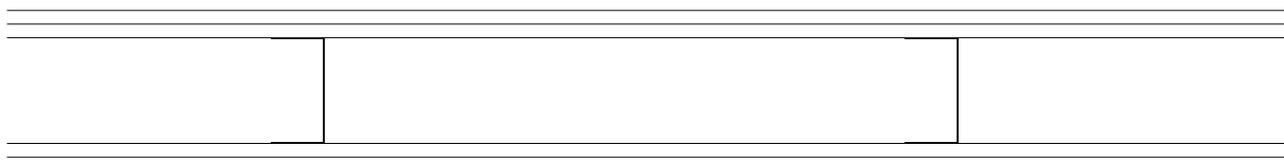
Figure 37 : Cloison avec ossature acier et finition en plaques de plâtre (source : <http://www.gyproc.be>)

L'ossature de la cloison se compose de montants et de rails en acier galvanisé, constitués de :

- profilés U Metal Stud *MSH 100* (40 mm × 100 mm × 40 mm × 0,6 mm) pour le sol et le plafond,
- profilés C Metal Stud *MSV 100* (6 mm × 51 mm × 98,8 mm × 48 mm × 6 mm × 0,6 mm) qui servent de montants et qui sont placés tous les 600 mm entre des profilés MSH.

Le parement quant à lui est réalisé au moyen de plaques de plâtre standard d'une épaisseur de 12,5 mm (comme celles mises en place au niveau des autres parois).

Plaque de plâtre	1,25 cm
Plaque de plâtre	1,25 cm
Profilé métallique	10 cm
Plaque de plâtre	1,25 cm
Plaque de plâtre	1,25 cm
Epaisseur totale	15 cm



**Figure 38 : Représentation cloison normale maison acier/trespa**

– Cloison bauge

Comme dit précédemment, il se fait que la cloison dans la maison qui est située derrière la cuisine n'est pas une cloison normale : il s'agit d'une cloison en bauge. Cela transparait sur les plans de la maison (Figure 10, Figure 11 et Figure 12) : en effet, l'épaisseur de cette cloison est beaucoup plus importante que celle des autres.

Pour plus d'informations concernant la bauge, se référer à l'Annexe C, page 180.

Nous allons détailler la composition de cette cloison faite en bauge. En effet, pour des questions esthétiques, nous avons décidé d'« entourer » le mur fait de blocs de bauge par des plaques de plâtres :

Plaque de plâtre	1,25 cm
Bloc de bauge	24 cm
Plaque de plâtre	1,25 cm
Epaisseur totale	26,5 cm

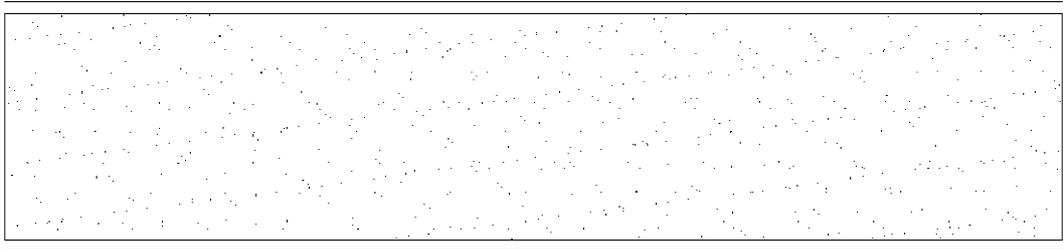


Figure 39 : Représentation cloison bauge maison acier/trespa

### III.2.2. 2<sup>ème</sup> cas : Maison acier peau acier

- Mur extérieur

La composition du mur extérieur dans le cas de la maison acier/acier est très semblable à celle du cas de la maison trespa.

La différence se situe bien entendu au niveau du bardage mis en place, mais également au niveau du moyen de fixation de ce bardage.

La finition extérieure acier que nous avons considérée dans ce cas est la lame de bardage HAIRPLAN 300 de la société Haironville – PAB ([32]).

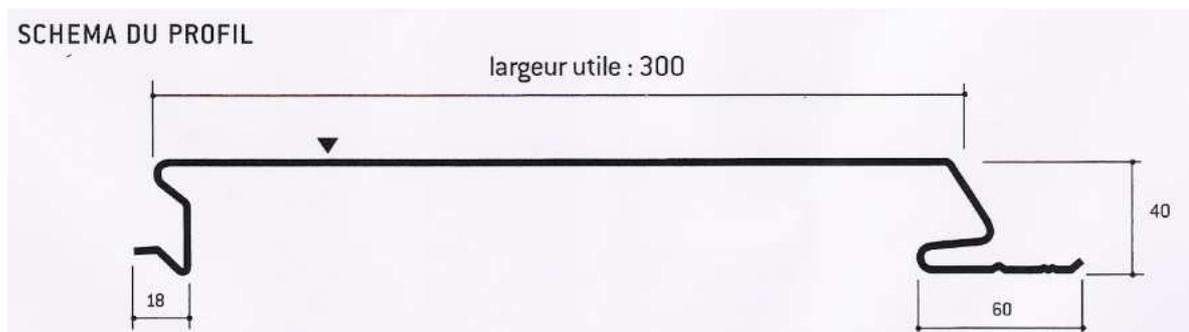


Figure 40 : Profil de la lame de bardage acier – dimensions en *mm* (source : [32])

L'épaisseur de la tôle est de 1,5 *mm*.

Nous décidons de poser le bardage de manière horizontale, sur des lisses verticales en acier en forme de Z de dimensions 30 \* 40 \* 30 *mm* ([32]), et espacées de 2 *m*.

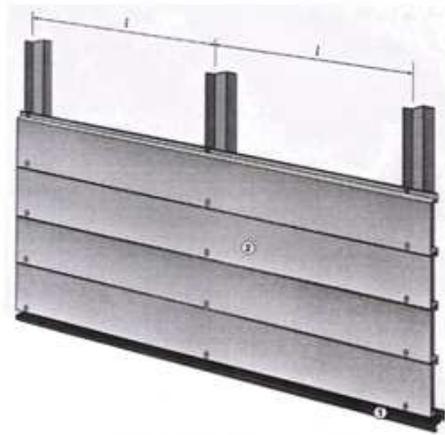


Figure 41 : Fixation des lames de bardage acier avec lisses acier (source : [32])

Finalement, la composition du mur extérieur considérée pour la maison acier/acier est la suivante :

Extérieur	Lame bardage acier	4 cm
	Fixation bardage – lisse acier	4 cm
	Isolant extérieur éventuel : polystyrène expansé	
	Panneau OSB	1,8 cm
	Remplissage isolant laine de bois	
	Montants verticaux ossature acier	14 cm
	Ossature secondaire	6 cm
Intérieur	Plaque de plâtre	1,25 cm

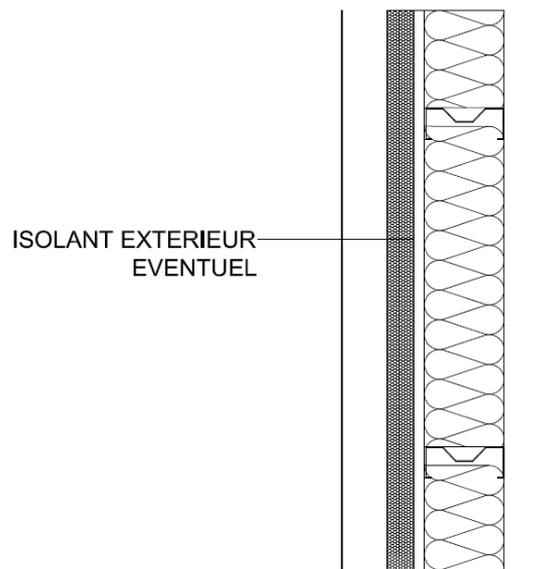


Figure 42 : Représentation mur extérieur maison acier/acier

### III.2.3. 3<sup>ème</sup> cas : Maison acier peau brique

- Mur extérieur

De nouveau, la différence par rapport aux 2 cas précédemment exposés se situe au niveau du bardage et de sa fixation.

Dans ce cas du bardage brique, le parement est attaché à la structure acier par des crochets. Cependant, ceux-ci étant placés de manière ponctuelle, nous n'en tiendrons pas compte, et nous considérerons que nous aurons uniquement un vide d'air entre le profilé acier et la brique de parement.

La composition du mur extérieur considérée pour la maison acier/brique est donc la suivante :

Extérieur	Brique pleine de terre cuite	5,5 cm
	Vide d'air	3 cm
	Isolant extérieur éventuel : polystyrène expansé	
	Panneau OSB	1,8 cm
	Remplissage isolant laine de bois	
	Montants verticaux ossature acier	14 cm
	Ossature secondaire	6 cm
Intérieur	Plaque de plâtre	1,25 cm

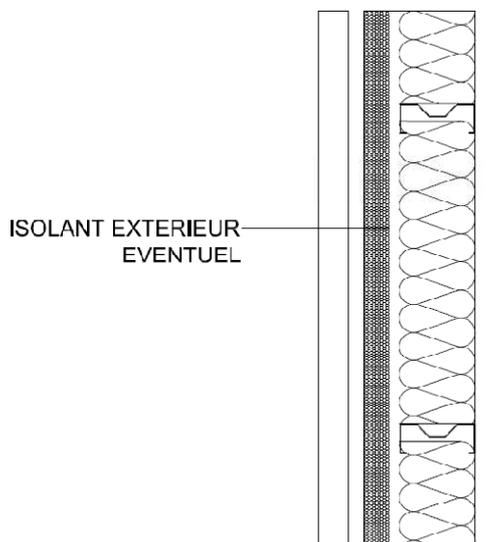


Figure 43 : Représentation mur extérieur maison acier/brique

### III.2.4. 4<sup>ème</sup> cas : Maison mixte acier/maçonnerie peau brique

Ce cas est le cas d'une maison avec parement en briques, avec des blocs de maçonnerie (parpaings) comme structure portante des murs extérieurs. Le reste de la structure portante est, quant à elle, fait de profilés minces en acier (Styltech), comme dans les cas précédents.



Figure 44 : Parpaing creux 20 × 20 × 50 cm (source : <http://www.sainthimat.com>)

Au niveau de l'isolation du mur, nous n'avons plus que de l'isolation externe. Comme mentionné précédemment, celle-ci est réalisée avec des panneaux de polystyrène expansé.

Nous ne détaillerons que la composition du mur extérieur, les autres parois étant identiques à celles du 1<sup>er</sup> cas.

- Mur extérieur

La composition du mur extérieur considérée pour la maison mixte/maçonnerie est la suivante :

Extérieur	Brique pleine de terre cuite	5,5 cm
	Vide d'air	3 cm
	Isolant polystyrène expansé	
	Parpaing	20 cm
Intérieur	Plaque de plâtre	1,25 cm
	Epaisseur totale	41,75 cm

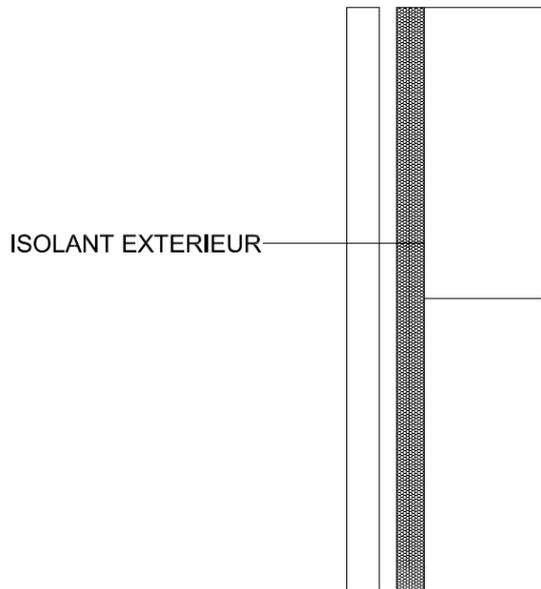


Figure 45 : Représentation mur extérieur maison mixte acier/maçonnerie

### III.2.5. 5<sup>ème</sup> cas : Maison traditionnelle

Considérons à présent le cas de la maison traditionnelle, c'est-à-dire avec des murs extérieurs en maçonnerie, des planchers intermédiaires faits avec des hourdis et une toiture réalisée avec des fermes en bois.

- Mur extérieur

La composition du mur extérieur dans le cas de la maison traditionnelle est la même que celle que nous avons considérée dans le cas maison mixte/maçonnerie.

- Toiture

Traditionnellement, la toiture des habitations en Belgique est réalisée avec des fermettes en bois industrielles.

La forme des fermettes sera la même que précédemment (Figure 23), et nous considérerons la même couverture en ardoises. Cependant, le lattage et le contre-lattage seront désormais tous les 2 réalisés avec des éléments en bois de section  $45\text{ mm} \times 22\text{ mm}$ , et espacés respectivement de  $15,5\text{ cm}$  et  $60\text{ cm}$  (comme pour la toiture acier). De plus, la fixation des plaques de plâtre se fera elle aussi avec des fourrures en bois de même section, espacées de  $60\text{ cm}$ .

En ce qui concerne l'entre-distance entre 2 fermes, celle-ci sera de  $0,6\text{ m}$ , et la section des arbalétriers des fermes sera de  $20\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ .

L'isolation dans ce cas-ci sera réalisée avec des panneaux de polystyrène expansé qui seront placés entre les fermes en bois.

Finalement, la composition de la toiture considérée pour la maison traditionnelle est la suivante :

Extérieur	Ardoises	0,8 cm
	Liteau bois	2,2 cm
	Contre-liteau bois	2,2 cm
	Isolant extérieur éventuel : polystyrène expansé	
	Remplissage isolant polystyrène expansé	
	Élément de ferme bois	20 cm
	Fourrure bois	2,2 cm
Intérieur	Plaque de plâtre	1,25 cm

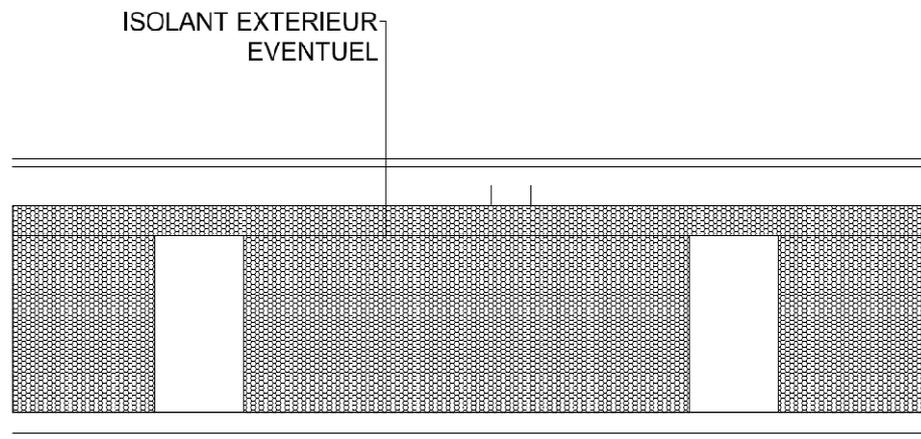


Figure 46 : Représentation toiture maison traditionnelle

- Plancher

Comme précédemment, nous allons considérer 2 types de finition pour les planchers : parquet et carrelage. Mais dans ce cas, la structure ne sera plus des solives métalliques mais bien des hourdis préfabriqués en béton. Sur ces hourdis sera coulée une chape de compression :



Figure 47 : Hourdis en béton avec chape de compression (source : <http://www.hellopro.fr>)

Contrairement aux cas des maisons où la structure du plancher était en acier, nous n'allons pas considérer d'isolant au niveau du plancher intermédiaire de la maison traditionnelle. En effet, l'isolant, dans le cas d'un plancher, n'est utilisé que comme isolation phonique (et non pas thermique). Or, dans ce cas-ci, l'isolation phonique est réalisée par la chape de compression et le hourdis en béton. Il n'est donc pas nécessaire de rajouter de l'isolant par-dessus.

– Plancher 1 – finition parquet

La fixation du parquet en bois massif sur la chape de compression se fera par l'intermédiaire de lambourdes en bois de section 60 mm × 40 mm et espacées de 50 cm.

La composition du plancher intérieur 1 considérée pour la maison traditionnelle est la suivante :

Dessous	Plaque de plâtre	1,25 cm
	Rail horizontal acier	3 cm
	Hourdis béton	12 cm
	Chape de compression	7 cm
	Lambourdes bois	4 cm
Dessus	Parquet bois massif	2 cm

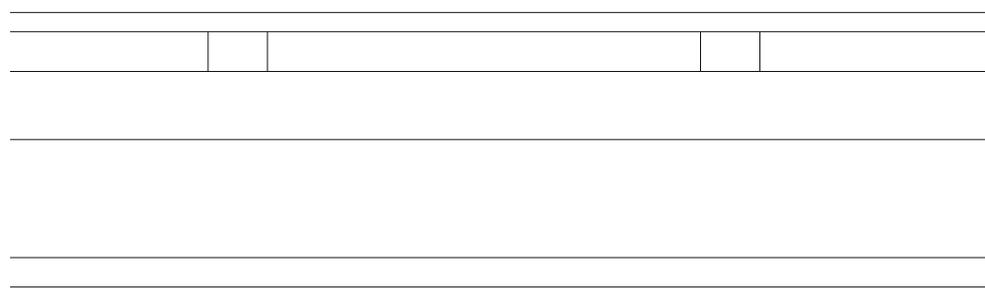


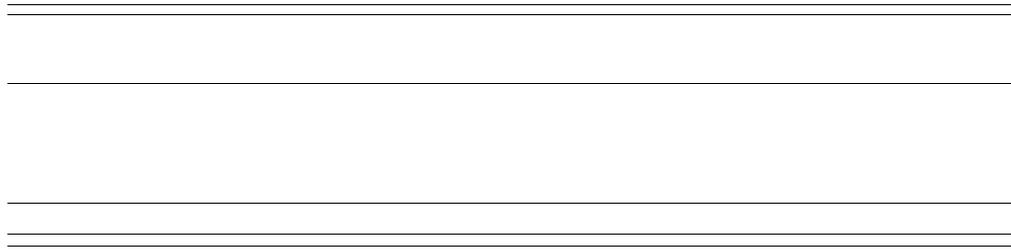
Figure 48 : Représentation plancher 1 maison traditionnelle

– Plancher 2 – finition carrelage

Notons que dans ce cas-ci, il n'y a plus besoin de bac métallique de coffrage ; la pose du carrelage se fait directement sur la chape de compression.

Ainsi, la composition du plancher intérieur 2 considérée pour la maison traditionnelle est la suivante :

Dessous	Plaque de plâtre	1,25 cm
	Rail horizontal acier	3 cm
	Hourdis béton	12 cm
	Chape de compression	7 cm
Dessus	Carrelage	1 cm



**Figure 49 : Représentation plancher 2 maison traditionnelle**

En ce qui concerne les cloisons intérieures et la dalle de sol, les compositions sont les mêmes que précédemment, en précisant toutefois que toutes les cloisons seront, dans ce cas-ci, de type « normale » vu qu'il n'est pas habituel d'avoir des cloisons réalisées en bauge dans les habitations belges.

### III.2.6. 6<sup>ème</sup> cas : Maison cas 1 sans bauge

Ce cas est identique au 1<sup>er</sup> cas (maison acier/trespa), sauf au niveau des cloisons intérieures, que nous considérons toutes de type « normale » ici, sans cloison en bauge.

Nous avons désormais décrit les compositions des parois des 6 cas étudiés. Cependant, pour aucune d'entre elles, nous n'avons précisé quelle épaisseur d'isolant était mise en place. En effet, cela est fonction des exigences thermiques requises par la réglementation de la Région wallonne concernant les performances d'un bâtiment. C'est ce point que nous allons à présent aborder.

## IV. RÉGLEMENTATION PEB

### IV.1. Définitions et exigences

En Région wallonne, la nouvelle réglementation sur la Performance Énergétique des Bâtiments (PEB) est entrée en vigueur depuis le 1<sup>er</sup> septembre 2008. Cette réglementation fait suite à la directive européenne : Directive 2002/91/EC (EPBD) [6].

Transposant cette directive, l'Arrêté du Gouvernement wallon et ses annexes – déterminant la méthode de calcul et les exigences, les agréments et les sanctions applicables en matière de performance énergétique et de climat intérieur des bâtiments [33] – ont été adoptés le 17 avril 2008 par le Gouvernement.

La réglementation PEB s'applique à l'ensemble des bâtiments pour tous les travaux de construction, de reconstruction et de transformation nécessitant l'obtention d'un permis d'urbanisme [33].

L'habitation que nous avons considérée dans ce travail allant seulement être construite dans les mois à venir, elle se doit de répondre à cette réglementation PEB.

L'objectif de la réglementation PEB est de consommer moins d'énergie primaire<sup>11</sup> pour garantir le confort intérieur du logement [34].

Le principe de la méthode est de calculer les consommations d'énergie pour le chauffage, l'eau chaude, les auxiliaires et le refroidissement éventuel, pour un usage standardisé du logement. Ce calcul est effectué sur base des caractéristiques techniques du bâtiment et de ses équipements, grâce au logiciel PEB ([35]) mis gratuitement à disposition des auteurs de projet [34].

Le résultat du calcul PEB d'un logement est exprimé par deux indicateurs : son niveau  $E_w$  et sa consommation spécifique  $E_{spec}$  [34].

$E_w$  est le niveau de performance énergétique globale du bâtiment. On le calcule en divisant le  $E$  du bâtiment par une valeur  $E$  de référence (pour plus de renseignements au niveau du calcul de  $E_w$ , se référer à l'annexe 1 de [33]). La valeur  $E$  représente la consommation d'énergie primaire caractéristique annuelle nécessaire pour le chauffage, le refroidissement, l'eau chaude sanitaire, les auxiliaires, la ventilation et éventuellement l'éclairage du bâtiment, déduction faite de l'énergie apportée par la cogénération ou les énergies renouvelables. Elle s'exprime en  $MJ/an$ . Pour ce qui est de la consommation spécifique  $E_{spec}$ , on la détermine en divisant  $E$  par le nombre de  $m^2$  de plancher chauffé de l'habitation. Elle s'exprime donc en  $MJ$  ou  $kWh/m^2/an$  [33].

---

<sup>11</sup> L'énergie primaire est l'énergie directement prélevée à la planète qui, après transformation, permet d'obtenir une énergie utilisable dans un bâtiment

D'autres indicateurs permettent d'évaluer certaines caractéristiques énergétiques du bâtiment : le niveau  $K^{12}$  et les valeurs  $U^{13}$  qui sont fonction de son degré d'isolation ainsi que le risque de surchauffe  $S$ . La réglementation impose une valeur maximale pour chacun de ces indicateurs. De plus, elle fixe des exigences de ventilation ( $V$ ) des locaux [34].

Remarque : en se référant à l'annexe 7 de [33], on trouve que le niveau  $K$  est déterminé par les caractéristiques d'isolation des éléments de construction et la compacité du bâtiment :

$$K = \begin{cases} 100 * U_{moy} & \text{si } c < 1 \\ \frac{300 * U_{moy}}{c + 2} & \text{si } 1 < c < 4.5 \\ 50 * U_{moy} & \text{si } c > 4.5 \end{cases}$$

où –  $c$  est la compacité du bâtiment, c'est-à-dire le rapport entre son volume total et la somme des aires des parois à travers lesquelles se fait la déperdition de chaleur : murs, vitres, toiture, dalle de sol ; son unité est [ $m$ ]

–  $U_{moy}$  est le coefficient de transfert thermique moyen pour l'ensemble du bâtiment ; son unité est [ $W/m^2/K$ ] :

$$U_{moy} = \frac{\sum_i A_i * U_i}{\sum_i A_i}$$

Les exigences sur ces différents indicateurs seront différentes selon la nature des travaux effectués [33]. Pour savoir lesquelles sont d'application, il faut se référer à l'arbre de décision suivant :

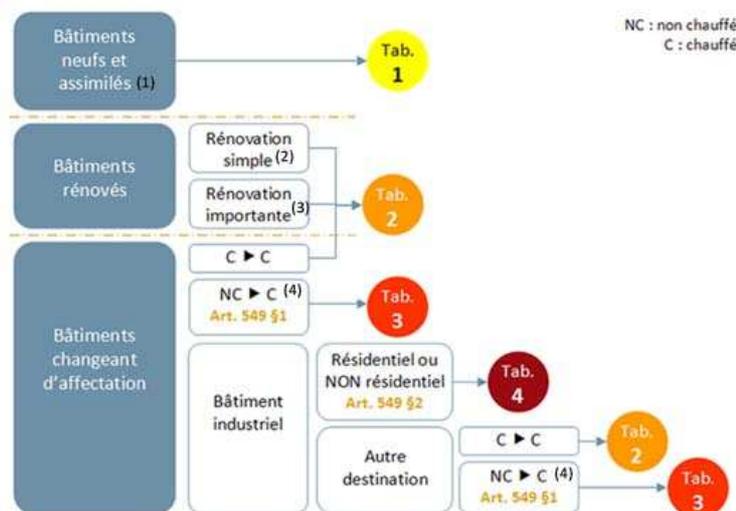


Figure 50 : Arbre de décision de la PEB (source : <http://energie.wallonie.be>)

<sup>12</sup> Le niveau  $K$  définit l'isolation thermique globale d'un bâtiment. Plus il est bas, meilleure est l'isolation.

<sup>13</sup> La valeur  $U$  est le coefficient de transmission thermique d'un élément de construction (brique, bloc, isolant, vitrage ...). Il exprime la capacité d'un élément à transmettre la chaleur. Son unité est le  $W/m^2/K$ . Plus  $U$  est faible, plus l'élément est isolant.

Dans le cas qui nous concerne, nous nous trouvons dans le cadre d'un bâtiment neuf. Le tableau d'exigences correspondant est donc, conformément à la figure précédente, le Tableau 1, présenté à la figure suivante :

**Tab. 1** **Tableau 1 : Bâtiments neufs et assimilés**

	Résidentiels habitations individuelles, immeubles à appartements	logements collectifs	NON Résidentiel Immeubles bureaux et services, destinés à l'enseignement	Autre destination hôpitaux, commerces, HORECA, installations sport..	Industriels Fabrique, entrepôt, ateliers...
<b>Isolation thermique</b>	<b><math>K45 + U_{max}</math></b>				<b><math>K55 + U_{max}</math></b>
<b>Ventilation</b>	Dispositif de ventilation (Annexe V)		Dispositif de ventilation (Annexe VI AGW 17 04 2008)		
<b>Niveau <math>E_v</math></b>	$\leq 100$		$\leq 100$		
<b>Conso <math>E_{spec}</math></b>	$< 170$ kWh/m <sup>2</sup> an				
<b>Surchauffe</b>	$< 17\ 500$ Kh/an				

Figure 51 : Exigences de la PEB pour bâtiments neufs (source : <http://energie.wallonie.be>)

Et donc, les exigences de la réglementation PEB pour notre bâtiment sont :

- Le niveau d'isolation thermique globale K doit être inférieur ou égal à 45.
- Les exigences de la figure suivante sur les valeurs de  $U$  doivent être respectées :

Perois de la surface de déperdition du bâtiment	$U_{max}$ [W/m <sup>2</sup> K]	$R_{min}$ [m <sup>2</sup> K/W]
<b>Fenêtres et autres parois translucides</b> - Valeur spécifique pour la partie centrale vitrée de chaque élément - Valeur globale pour l'élément	1.6 2.5	
<b>Portes et portes de garage</b>	2.9	
<b>Murs et parois opaques</b> - En contact avec tout environnement à l'exception d'un vide sanitaire d'une cave et du sol - Entre le volume protégé et un vide sanitaire ou une cave - Entre le volume protégé et le sol	0.4*	1* 1*
<b>Toitures et plafonds</b>	0.3	
<b>Planchers</b> - Entre le volume protégé et l'air extérieur ou les EANC (Espaces Adjacents Non Chauffés) - Entre le volume protégé et le sol, un vide sanitaire, une cave ...	0.6 0.4*	1*
<b>Parois mitoyennes (parois entre 2 volumes protégés ou 2 appartements)</b>	1	

Figure 52 : Exigences de la PEB pour valeurs  $U$  des parois (source : <http://energie.wallonie.be>)

- Le système de ventilation de la maison unifamiliale doit être conforme à la réglementation en vigueur, à savoir la norme NBN D50-001 (annexe 5 de [33]) :

		Débit de ventilation
Règle générale		3,6 m <sup>3</sup> /h par m <sup>2</sup> de surface au sol
Type de local	Living	minimum 75 m <sup>3</sup> /h maximum 150 m <sup>3</sup> /h
	Chambres, locaux d'étude et de jeux	minimum 25 m <sup>3</sup> /h maximum 36 m <sup>3</sup> /h par personne
	Cuisines fermées, SDB, buanderies	minimum 50 m <sup>3</sup> /h maximum 75 m <sup>3</sup> /h
	Cuisines ouvertes	minimum 75 m <sup>3</sup> /h
	WC	25 m <sup>3</sup> /h

Tableau 2 : Exigences de la PEB pour la ventilation

- Le niveau  $E_w$  doit être inférieur ou égal à 100.
- Le niveau  $E_{spec}$  doit être inférieur ou égal à 170 kWh/m<sup>2</sup>/an.
- Le risque de surchauffe S doit être inférieur ou égal à 17 500 kh/an.

Remarque : à partir du 1<sup>er</sup> septembre 2011, il y aura un renforcement des exigences :  $E_w$  devra être inférieur ou égal à 80 et  $E_{spec}$  devra être inférieur ou égal à 130 kWh/m<sup>2</sup>/an.

## IV.2. Vérification des exigences sur le $U$ des parois du bâtiment

La Figure 52 nous fournit les exigences sur le  $U$  que doivent respecter les parois du bâtiment analysé.

Connaissant les compositions de ces parois, il nous est tout à fait possible de déterminer leur  $U$  respectif et ainsi de pouvoir vérifier qu'elles respectent bien les exigences requises.

Le calcul de  $U$  se fait de la façon suivante :

$$U = \frac{1}{R_{tot}}$$

$$R_{tot} = \frac{1}{h_i} + \sum R_{mat} + \frac{1}{h_e}$$

$$R_{mat} = \lambda_{mat} * ep_{mat}$$

Formules 1 : Calcul de  $U$

Dans ces formules,

- le terme  $R_{tot}$  représente la résistance thermique globale de la paroi ; il est égal à la somme des résistances thermiques  $R_{mat}$  de chaque matériau composant la paroi, auxquelles on ajoute les termes  $\frac{1}{h_i}$  et  $\frac{1}{h_e}$
- la résistance thermique  $R_{mat}$  d'un matériau exprime sa capacité à résister au froid et au chaud ; plus sa valeur est élevée, plus il est isolant.  
 $R_{mat}$  s'exprime en  $m^2K/W$ , et se détermine en multipliant la conductivité thermique  $\lambda_{mat}$ <sup>14</sup> de ce matériau (exprimée en  $W/m/K$ ) par son épaisseur (exprimée en  $m$ ) dans la paroi considérée.

Remarque : la détermination  $R_{tot}$  d'une paroi doit se faire en tenant compte de la composition thermique de cette paroi. Cette remarque mérite de plus amples explications :

La somme des  $R_{mat}$  des matériaux composant la paroi doit se faire sur les matériaux qui sont les plus susceptibles d'être « rencontrés » si on traverse la paroi : si un élément de la paroi a une configuration ponctuelle – en forme de quadrillage par exemple, comme c'est le cas pour les ossatures secondaires de fixation – on rencontrera plus souvent le matériau englobant l'élément (l'air dans ce cas-là) que l'élément en lui-même.

Pour illustrer cette remarque, prenons l'exemple de la toiture à structure acier. Pour rappel, sa composition est la suivante :

Extérieur	Ardoises	0,8 cm
	Liteau acier	3 cm
	Contre-liteau bois	2,2 cm
	Isolant extérieur éventuel : polystyrène expansé	
	Panneau OSB	1,8 cm
	Panne acier	3 cm
	Remplissage isolant laine de bois	
	Élément de ferme acier	20 cm
	Rail horizontal acier	3 cm
Intérieur	Plaque de plâtre	1,25 cm

<sup>14</sup> La conductivité thermique  $\lambda_{mat}$  d'un matériau exprime la quantité de chaleur pouvant être transférée dans ce matériau. Plus la valeur est élevée, plus le matériau est isolant, à épaisseur égale.

D'un point de vue thermique, cette composition deviendra :

Extérieur	Ardoises	0,8 cm
	Vide d'air	3 + 2,2 = 5,2 cm
	Isolant extérieur éventuel : polystyrène expansé	
	Panneau OSB	1,8 cm
	Vide d'air	3 cm
	Vide d'air éventuel en fonction de l'épaisseur d'isolant interne	
	Remplissage isolant laine de bois	
	Vide d'air	3 cm
Intérieur	Plaque de plâtre	1,25 cm

Vous remarquerez que, en suivant le raisonnement précédemment expliqué, la structure ponctuelle en acier n'intervient plus dans la composition thermique de la paroi. Cela semble toutefois très peu vraisemblable, et nous expliquerons plus loin dans ce travail comment faire pour malgré tout tenir compte de cette structure, bien qu'elle soit ponctuelle.

- les coefficients  $h_i$  et  $h_e$  sont respectivement le coefficient d'échange thermique superficiel entre une paroi et une ambiance intérieure et entre une paroi et une ambiance extérieure. Leur unité est le  $W/m^2/K$ .

Ils permettent de quantifier le transfert de chaleur réalisé par convection et par rayonnement entre une ambiance intérieure/extérieure et la face intérieure/extérieure d'une paroi.

Les valeurs de ces deux coefficients sont données dans la norme ISO 6946:2007 (E) ([36]), sous forme de  $R_i$  et  $R_e$ <sup>15</sup> :

Surface resistance $m^2.K/W$	Direction of heat flow		
	Upwards	Horizontal	Downwards
$R_{si}$	0,10	0,13	0,17
$R_{se}$	0,04	0,04	0,04

Figure 53 : Valeurs des coefficients  $R_i$  et  $R_e$  en  $m^2K/W$  (source : [36])<sup>16</sup>

<sup>15</sup>  $R_i = 1/h_i$  et  $R_e = 1/h_e$

<sup>16</sup> Flux montant : il fait plus chaud en bas qu'en haut ; flux descendant : il fait plus chaud en haut qu'en bas

Nous allons à présent expliquer comment tenir compte d'une structure portante ponctuelle (comme c'est le cas pour l'ossature acier considérée dans ce travail) dans le calcul du  $U$  d'une paroi.

En effet, les Formules 1 écrites précédemment ne permettent pas d'en tenir compte dans la mesure où elles « négligent » la présence de cette structure. Or, il y a de fortes chances pour que des ponts thermiques apparaissent au niveau des éléments de cette structure (dans le cas où cette paroi est en contact avec l'extérieur), engendrant ainsi une augmentation plus ou moins grande du facteur  $U$  de la paroi.

Le problème est donc : comment faire pour prendre en compte cette structure ponctuelle dans le calcul du  $U$  de la paroi, pour que la valeur trouvée soit correcte ? La réponse à ce problème a été d'utiliser le programme Therm ([37]).

Ce programme détermine le  $U$  global de n'importe quelle paroi, du moment que l'on fournit les informations suivantes :

- géométrie de la paroi : épaisseurs des différentes couches, géométrie des éléments ponctuels éventuels
- propriétés des matériaux composant la paroi : le programme contient à l'origine une base de données de matériaux ; mais on peut sans aucune difficulté ajouter des matériaux supplémentaires, dès lors que l'on connaît la conductivité thermique  $\lambda$  du matériau
- conditions limites thermiques de la paroi : on doit attribuer à chaque côté de la géométrie dessinée une condition limite thermiquement parlant ; de nouveau, il y a une base de données préexistante dans le programme, mais on peut sans difficulté créer une nouvelle condition si on connaît la température de l'air ambiant ainsi que le coefficient d'échange thermique  $h$  avec l'environnement.

Remarque : au niveau des températures de l'air ambiant de part et d'autre des parois étudiées avec Therm, nous allons à chaque fois considérer une température intérieure de  $20^{\circ}\text{C}$  et une température extérieure de  $-10^{\circ}\text{C}$  (pour se placer dans le cas le plus défavorable).

Ainsi, nous allons pouvoir déterminer le coefficient  $U$  de toutes les parois composant notre bâtiment, que ce soit au moyen des Formules 1 énoncées précédemment pour les « simples » parois, ou grâce au programme Therm pour les parois présentant une structure ponctuelle.

Ayant obtenu ces valeurs de  $U$ , nous pourrions alors vérifier que toutes les parois respectent bien les exigences de la PEB concernant leur coefficient de transmission thermique.

Remarque : nous n'allons pas mettre ici le détail des compositions thermiques des différentes parois ; celles-ci se trouvent à l'Annexe D, pages 183 et suivantes. Pour chaque matériau des différentes compositions, on fournit son épaisseur (sauf pour les isolants) ainsi que sa valeur de conductivité thermique  $\lambda$ .

Les valeurs des conductivités thermiques  $\lambda$  – de chaque matériau intervenant dans les compositions des parois de l’habitation – proviennent pour la plupart de la librairie du programme Pleiades ([38]). Nous parlerons ultérieurement dans ce travail de cette librairie et de ce programme. Pour les matériaux ne figurant pas dans cette librairie, à savoir le panneau Trespa, la bauge et les vides d’air, il a fallu que nous précisions nous-mêmes quelle était leur valeur de  $\lambda$  respective. Pour le panneau Trespa et la bauge, vous trouverez leur valeur aux Annexes B et C. Et pour celle des vides d’air, nous nous sommes basés sur le tableau suivant pour les déterminer :

Epaisseur de la lame d’air	$R$ [ $m^2K/W$ ]
< 0,7 cm	0,11
0,7 à 0,9 cm	0,13
0,9 à 1,1 cm	0,14
1,1 à 1,3 cm	0,15
> 1,3 cm	0,16

Tableau 3 : Valeurs de  $R$  des lames d’air en fonction de l’épaisseur (source : [http://herve.silve.pagesperso-orange.fr/deperditions/deperd\\_rt2000.htm](http://herve.silve.pagesperso-orange.fr/deperditions/deperd_rt2000.htm))

#### IV.2.1. Mur extérieur

Pour le mur extérieur, les coefficients  $R_i$  et  $R_e$  valent respectivement 0,13 et 0,04  $m^2K/W$ .

- Maison acier/trespa (avec et sans bauge)

Pour déterminer le coefficient de transmission thermique  $U$  de cette paroi, nous devons utiliser le programme Therm.

Dans un premier temps, en ne considérant qu’une isolation interne de 14 cm, voici le résultat obtenu :

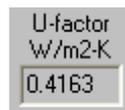


Figure 54 :  $U$  pour mur extérieur, avec structure acier, maison acier/trespa, donné par Therm

Or, la valeur maximale admissible par la réglementation PEB pour le  $U$  d’un mur extérieur est, en se référant à la Figure 52 :

$$U_{max} = 0,4 \text{ W}/m^2/K$$

Nous savons donc que nous aurons obligatoirement une isolation externe pour ce mur.

Quant à l’épaisseur de cette isolation, cela dépendra des autres parois du bâtiment. Nous ferons en sorte qu’elle soit minimale, tout en ayant le respect de la PEB pour le bâtiment.

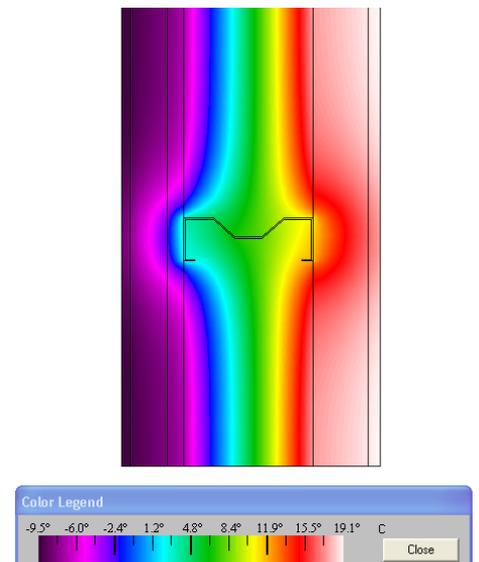


Figure 55 : Therm pour mur extérieur maison acier/trespa

Nous pouvons comparer le résultat obtenu avec le programme Therm avec celui que nous aurions obtenu en négligeant la structure en acier (Formules 1) :

$$U = 0,2479 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

En tenant compte de la structure acier, on obtient donc une valeur de  $U$  significativement supérieure :  $\cong +68 \%$  !!

Notons que le résultat obtenu grâce aux Formules 1 peut être vérifié avec le programme Therm. Voici ce que l'on obtient dans ce cas :

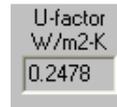


Figure 56 :  $U$  pour mur extérieur, sans structure acier, maison acier/trespa, donné par Therm

Les résultats obtenus selon les 2 procédés sont très proches l'un de l'autre. Nous pouvons donc considérer qu'ils sont corrects.

- Maison acier/acier

Dans ce cas-ci aussi, on utilise Therm pour déterminer le  $U$ .

Le résultat obtenu, en ne considérant qu'une isolation interne de 14 cm, est le suivant :

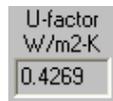


Figure 57 :  $U$  pour mur extérieur, avec structure acier, maison acier/acier, donné par Therm

Or, la valeur maximale admissible étant (Figure 52) :

$$U_{max} = 0,4 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

Nous aurons donc aussi dans ce cas une isolation externe pour ce mur.

Remarquons que par rapport au cas avec bardage Trespa, la valeur de  $U$  obtenue est légèrement supérieure. Cela est dû au fait que la résistance thermique du bardage acier est nettement inférieure à celle du bardage Trespa (0,00003 vs 0,033  $m^2K/W$ ).

De nouveau, nous pouvons comparer le résultat obtenu avec le programme Therm avec celui que nous aurions obtenu en négligeant la structure en acier (Formules 1) :

$$U = 0,25 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

Nous avons donc dans ce cas-ci une augmentation d'environ 71 % de la valeur de  $U$  en tenant compte de la structure acier.

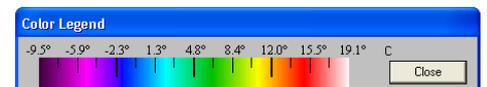
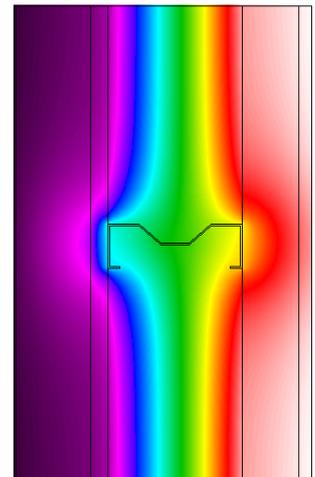


Figure 58 : Therm pour mur extérieur maison acier/acier

- Maison acier/brique

Le résultat obtenu avec le programme Therm, en ne considérant qu'une isolation interne de 14 cm, est le suivant :

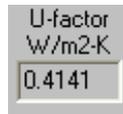


Figure 59 : U pour mur extérieur, avec structure acier, maison acier/brique, donné par Therm

Or, la valeur maximale admissible étant (Figure 52) :

$$U_{max} = 0,4 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

Nous aurons donc également dans ce cas une isolation externe pour ce mur.

Remarquons que des 3 bardages considérés, c'est celui-ci qui présente une valeur de  $U$  la plus petite. En effet, c'est le parement brique qui présente la résistance thermique la plus grande (0,00003 vs 0,033 vs 0,05  $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ).

Comparons le résultat obtenu avec le programme Therm et celui que nous aurions obtenu en négligeant la structure en acier (Formules 1), qui est de :

$$U = 0,2469 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

Nous avons donc dans ce cas-ci une augmentation d'environ 68 % de la valeur de  $U$  en tenant compte de la structure acier.

- Maisons mixte/maçonnerie et traditionnelle

Pour déterminer le coefficient de transmission thermique  $U$  du mur extérieur pour ces 2 cas, nous pouvons nous contenter des Formules 1 énoncées précédemment, vu que la structure portante est continue sur toute la longueur du mur.

Si on considère, dans un premier temps, une épaisseur d'isolation externe de 10 cm, le résultat obtenu est le suivant :

$$U = 0,3151 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

Vu les exigences de la PEB, on trouve donc que cette épaisseur d'isolant est suffisante pour respecter la valeur maximale autorisée de  $U$ . Attention, il ne s'agit ici que d'une exigence « locale » sur la paroi mur extérieur. Lorsque nous considérerons le bâtiment dans son entièreté, nous devons peut-être augmenter cette épaisseur d'isolant.

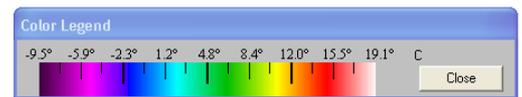
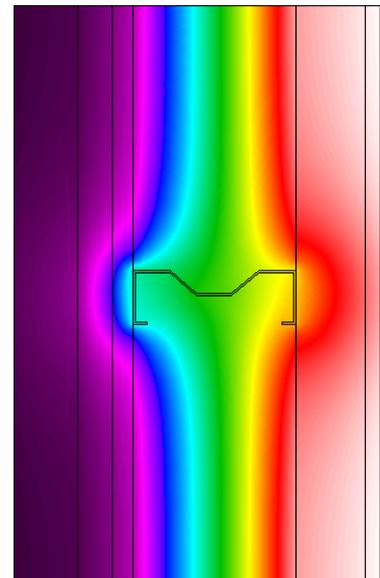


Figure 60 : Therm pour mur extérieur maison acier/brique

#### IV.2.2. Toiture

Pour la toiture, les coefficients  $R_i$  et  $R_e$  valent respectivement 0,1 et 0,04  $m^2K/W$ .

- Maisons acier/trespa, acier/acier, acier/brique, mixte/maçonnerie

Pour déterminer le coefficient de transmission thermique  $U$  de la toiture dans ces différents cas, nous devons utiliser le programme Therm.

Dans un premier temps, en ne considérant qu'une isolation interne de 20 cm, voici le résultat obtenu :

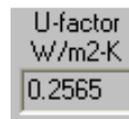


Figure 61 : U pour toiture, avec structure acier, maison acier/trespa acier/acier acier/brique mixte/maçonnerie, donné par Therm

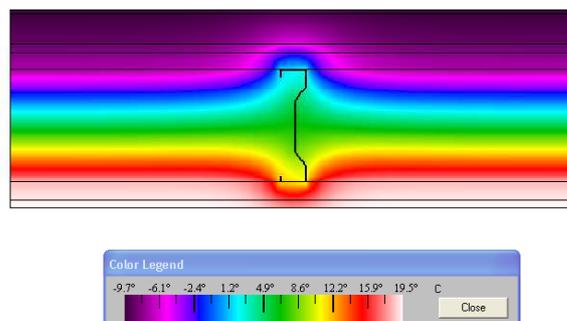


Figure 62 : Therm pour toiture maison acier/trespa acier/acier acier/brique et mixte/maçonnerie

Or, la valeur maximale admissible par la réglementation PEB pour le  $U$  d'une toiture est, en se référant à la Figure 52 :

$$U_{max} = 0,3 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

Vu les exigences de la PEB, on trouve donc qu'il est suffisant de ne considérer qu'une isolation interne de 20 cm pour respecter la valeur maximale autorisée de  $U$ . Mais de nouveau, ce n'est que lorsque nous considérerons le bâtiment global que nous pourrons affirmer définitivement que nous ne placerons pas d'isolation externe.

Nous pouvons comparer le résultat obtenu avec le programme Therm avec celui que nous aurions obtenu en négligeant la structure en acier (Formules 1) :

$$U = 0,1798 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

En tenant compte de la structure acier, on obtient donc une valeur de  $U$  significativement supérieure :  $\cong +43 \%$  !!

- Maison traditionnelle

Dans le cas de la maison traditionnelle, on doit également utiliser Therm pour déterminer le  $U$  de la toiture.

Dans un premier temps, en ne considérant qu'une isolation interne de 20 cm, voici le résultat obtenu :

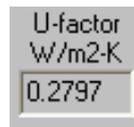


Figure 63 : U pour toiture, avec structure bois, maison traditionnelle, donné par Therm

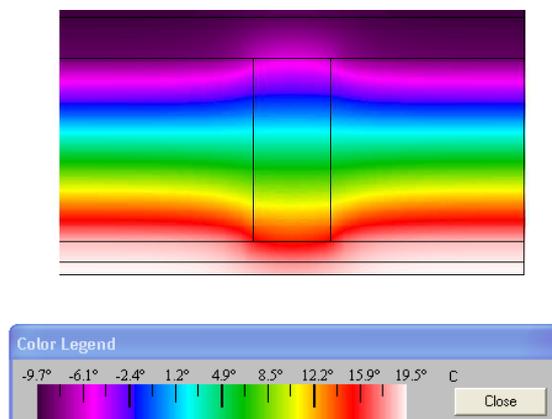


Figure 64 : Therm pour toiture maison traditionnelle

Or, la valeur maximale admissible par la réglementation PEB pour le  $U$  d'une toiture est, en se référant à la Figure 52 :

$$U_{max} = 0,3 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

De nouveau, on trouve qu'il est suffisant de ne considérer qu'une isolation interne de 20 cm pour respecter la valeur maximale autorisée de  $U$  exigée par la PEB, en sachant que ce ne sera peut-être plus le cas ultérieurement.

Remarquons que par rapport aux cas où la structure de la toiture est en acier, la valeur de  $U$  obtenue est légèrement supérieure.

Nous pouvons comparer le résultat obtenu avec le programme Therm avec celui que nous aurions obtenu en négligeant la structure (Formules 1) :

$$U = 0,1776 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

Nous avons donc une augmentation d'environ 58 % de la valeur de  $U$  en tenant compte de la structure.

#### IV.2.3. Plancher 1 – finition parquet

Pour le plancher intermédiaire, nous considérons 2 fois le coefficient  $R_i$  ayant la valeur de  $0,13 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ .

Le plancher n'étant pas en contact avec l'extérieur, nous pouvons nous contenter des Formules 1 pour déterminer sa valeur de  $U$ , que sa structure soit ponctuelle ou non.

- Maisons acier/trespa, acier/acier, acier/brique et mixte/maçonnerie

Grâce aux Formules 1, nous déterminons la valeur de  $U$  suivante, en considérant une épaisseur d'isolant interne de  $10 \text{ cm}$  (pour l'acoustique) :

$$U = 0,2972 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}$$

Aucune exigence n'est demandée par la réglementation PEB pour le  $U$  des planchers, ceux-ci n'étant pas en contact avec l'extérieur.

- Maison traditionnelle

Grâce aux Formules 1, nous déterminons la valeur de  $U$  suivante :

$$U = 1,1388 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}$$

Par rapport aux cas du plancher avec solives en acier, nous remarquons que la valeur est beaucoup plus élevée. Cela se comprend aisément vu que dans ce cas-ci, nous n'avons pas d'isolant au niveau du plancher (pas besoin d'isolant pour faire l'isolation phonique).

#### IV.2.4. Plancher 2 – finition carrelage

De nouveau, pour le plancher intermédiaire, nous considérons 2 fois le coefficient  $R_i$  ayant la valeur de  $0,13 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ .

La différence entre les compositions des planchers 1 et 2 se situe au niveau de la finition.

- Maisons acier/trespa, acier/acier, acier/brique et mixte/maçonnerie

Grâce aux Formules 1, nous déterminons la valeur de  $U$  suivante, en considérant une épaisseur d'isolant interne de  $10 \text{ cm}$  (pour l'acoustique) :

$$U = 0,3287 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}$$

Par rapport au plancher 1, la valeur de  $U$  est supérieure. Cela est dû tout simplement au fait que les matériaux de finition dans le cas du plancher 1 (panneaux d'OSB sous parquet en bois massif) ont des valeurs de conductivité thermique  $\lambda$  nettement inférieures à celles des matériaux de finition dans le cas du plancher 2 (chape de mortier et carrelage).

- Maison traditionnelle

Grâce aux Formules 1, nous déterminons la valeur de  $U$  suivante :

$$U = 1,5698 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}$$

#### IV.2.5. Dalle de sol 1 – finition parquet

Pour la dalle de sol, nous considérons 1 seule fois le coefficient  $R_i$  ayant la valeur de  $0,17 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  (nous ne considérons pas de  $R_e$  car la partie inférieure de la dalle se trouve directement en contact avec le sol – dalle sur terre-plein).

La dalle de sol est la même pour tous les cas étudiés.

Pour déterminer le coefficient de transmission thermique  $U$  de cette paroi, les Formules 1 suffisent.

En considérant une isolation de  $5 \text{ cm}$  d'épaisseur, voici le résultat obtenu :

$$U = 0,432 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K} \quad \text{ou} \quad R = 2,3149 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$$

Au niveau des dalles de sol, la réglementation PEB exige une valeur minimale de résistance thermique :  $R_{min} = 1 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ . Ainsi, point de vue local, une épaisseur de  $5 \text{ cm}$  de polyuréthane est suffisante pour respecter la PEB. Il faudra voir si ça l'est toujours lorsqu'on passera au niveau global (entièreté du bâtiment).

#### IV.2.6. Dalle de sol 2 – finition carrelage

De nouveau, pour la dalle de sol, nous considérons 1 seule fois le coefficient  $R_i$  ayant la valeur de  $0,17 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ .

Pour déterminer le coefficient de transmission thermique  $U$  de cette paroi, les Formules 1 suffisent.

En considérant toujours une isolation de  $5 \text{ cm}$  d'épaisseur, voici le résultat obtenu :

$$U = 0,5021 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K} \quad \text{ou} \quad R = 1,9917 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$$

#### IV.2.7. Cloison intérieure normale

Pour la cloison intérieure, nous considérons 2 fois le coefficient  $R_i$  ayant la valeur de  $0,13 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ .

Les cloisons n'étant pas en contact avec l'extérieur, aucune exigence n'est demandée par la réglementation PEB.

Nous pouvons déterminer la valeur de  $U$  grâce aux Formules 1 :

$$U = 2,3669 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}$$

#### IV.2.8. Cloison intérieure en bauge

Ici aussi, nous considérons 2 fois le coefficient  $R_i$  ayant la valeur de  $0,13 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ .

Nous pouvons déterminer la valeur de  $U$  grâce aux Formules 1 :

$$U = 1,4075 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}$$

Nous remarquons que le  $U$  de la cloison en bauge est presque la moitié de celui de la cloison normale. Cela est dû entièrement à la présence du bloc de bauge, qui a une isolation thermique bien meilleure que celle de l'élément acier dans le cas de la cloison normale.

#### IV.2.9. Ouvertures extérieures

En plus des parois du bâtiment, nous devons également vérifier que les ouvertures (vitrages et portes) extérieures respectent bien les exigences de la PEB concernant les valeurs de  $U$  admissibles.

En se référant à la Figure 52, on trouve que les valeurs maximales admissibles par la réglementation PEB pour le  $U$  d'une fenêtre sont  $U_{max} = 1,6 \text{ W/m}^2/\text{K}$  pour la partie centrale vitrée de l'élément et  $U_{max} = 2,5 \text{ W/m}^2/\text{K}$  pour l'élément dans sa globalité.

En ce qui concerne les portes (donnant sur l'extérieur), on trouve que la valeur maximale autorisée pour le  $U$  est :  $U_{max} = 2,9 \text{ W/m}^2/\text{K}$ .

Ainsi, pour répondre à ces exigences, nous décidons de placer comme fenêtres et portes (provenance : librairie de Pleiades ([38])) :

- Fen bat bois DV CLIMAPLUS N 6.12.6 de la société Saint-Gobain Glass : il s'agit d'une fenêtre à double vitrage avec cadre en bois ; l'épaisseur des 2 vitrages est de 6 mm tandis que l'espace les séparant fait 12 mm de large et est rempli d'air.

Les caractéristiques de cette fenêtre sont :

- pourcentage de vitrage : 66 %
- facteur solaire<sup>17</sup> vitrage : 0,6
- coefficient  $U$  vitrage :  $1,6 \text{ W/m}^2/\text{K}$
- coefficient  $U$  cadre opaque :  $2,4 \text{ W/m}^2/\text{K}$

Et donc :

- facteur solaire moyen :  $0,66 * 0,6 = 0,4$
- coefficient  $U$  moyen :  $0,66 * 1,6 + 0,34 * 2,4 = 1,87 \text{ W/m}^2/\text{K}$

- porte de bois isolante performante

Les caractéristiques de cette porte sont :

- pourcentage de vitrage : 0 %
- coefficient  $U$  cadre opaque :  $0,8 \text{ W/m}^2/\text{K}$

Et donc :

- facteur solaire moyen : 0
- coefficient  $U$  moyen :  $0,8 \text{ W/m}^2/\text{K}$

---

<sup>17</sup> Le facteur solaire d'une fenêtre est la proportion de l'énergie solaire qui entre à l'intérieur d'un bâtiment comparé avec l'énergie reçue à l'extérieur de la paroi vitrée; idéalement, il doit être élevé en hiver pour que le bâtiment puisse bénéficier des apports solaires et bas en été pour éviter les surchauffes.

### IV.3. Analyse PEB complète du bâtiment

Nous allons à présent procéder à l'analyse PEB complète du bâtiment étudié, ce qui nous permettra de définir pour de bon les compositions des différentes parois. Pour cela, nous allons, comme dit précédemment, utiliser le logiciel PEB mis au point par la Région wallonne ([35]).

#### IV.3.1. Création d'un nouveau projet

La première chose à faire lorsque l'on crée un nouveau projet PEB est de définir la Région dans laquelle le projet va être mis en œuvre : Wallonie ou Région Bruxelles-Capitale. Le logiciel PEB adaptera automatiquement la réglementation en fonction de la Région considérée. Dans notre cas, la Région choisie est bien entendu la Wallonie, la maison étant construite dans la commune de Liège.

Nous devons également préciser quelle est la nature des travaux effectués dans le bâtiment, quelle est la surface utile totale, et quelle est la destination du bâtiment étudié. Tout cela se fait par choix dans des listes déroulantes prédéfinies. La figure suivante montre les choix que nous avons réalisés dans notre cas :

The screenshot shows the 'Créer un projet' dialog box with the following settings:

- Projet**
  - Nom : maison
  - Région : Wallonie
- Bâtiment**
  - Nom : maison
  - Nature des travaux : ?
  - Superficie utile totale (critère) : ? m<sup>2</sup>
- Unité PEB**
  - Nom : maChangement d'affectation (Art 549)
  - Destination de l'unité PEB : ?

An open dropdown menu for 'Nature des travaux' shows the following options: '?', 'Bâtiment neuf et assimilé', 'Travaux de rénovation importants', and 'Travaux de rénovation simple'. The option 'Bâtiment neuf et assimilé' is highlighted in red.

The screenshot shows the 'Créer un projet' dialog box with the following settings:

- Projet**
  - Nom : maison
  - Région : Wallonie
- Bâtiment**
  - Nom : maison
  - Nature des travaux : Bâtiment neuf et assimilé
  - Superficie utile totale (critère) : ? m<sup>2</sup>
- Unité PEB**
  - Nom : ma... > 1.000 m<sup>2</sup>
  - Destination de l'unité PEB : ?

An open dropdown menu for 'Superficie utile totale (critère)' shows the following options: '?', 'S ≤ 1.000 m<sup>2</sup>', and 'S > 1.000 m<sup>2</sup>'. The option 'S > 1.000 m<sup>2</sup>' is highlighted in red.

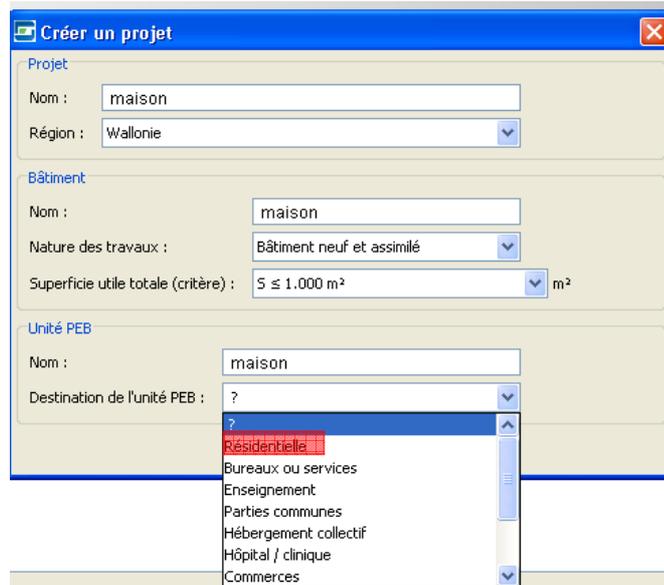


Figure 65 : Création d'un projet PEB (source : [35])

Nous devons ensuite définir précisément les éléments suivants :

- superficie utile totale : somme des surfaces des différents niveaux du bâtiment calculées entre les murs ou parois extérieurs ; l'épaisseur de ces murs ou parois n'est pas prise en compte dans cette somme ; les vides ne sont pas pris en compte non plus [35]. Sa valeur est, dans notre cas :

$$\text{Superficie utile totale} = 89,33 \text{ m}^2$$

- surface totale de plancher chauffée ou climatisée  $A_{ch}$  : somme des surfaces de planchers de chaque niveau de la construction situés dans le volume protégé, mesurées entre les faces externes des murs extérieurs. Sont comptabilisées les surfaces présentant une hauteur sous plafond minimale de 1,50 m, pour autant que l'espace considéré présente au moins en un point une hauteur minimale de 2,20 m. Attention : ce paramètre est très sensible, son influence sur les  $E_w$  et  $E_{spec}$  est très importante. Cette surface doit donc être évaluée avec précision [35]. Dans notre cas, elle vaut :

$$A_{ch} = 2 * (9,6 * 6) = 115,2 \text{ m}^2$$

C'est également à ce moment que nous devons préciser quelle est la mesure du débit de fuite présente dans la maison, à 50 Pa et par unité de surface. Cette mesure est le reflet de l'étanchéité à l'air de la maison : malgré une très bonne isolation, si l'enveloppe de la maison n'est pas hermétique, il y aura des flux d'air entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment : l'air froid extérieur pénétrera dans la maison et l'air chaud intérieur s'en échappera. Au plus la valeur du débit de fuite sera basse, au mieux la maison sera « étanche ». Pour obtenir une bonne étanchéité à l'air, il faut non seulement que les détails d'exécution soient bien conçus, mais aussi que les intervenants soient très rigoureux lors de la mise en œuvre.

Au stade du projet de construction de la maison, aucune mesure n'a encore pu être effectuée concernant ce débit de fuite ; la mesure ne peut se faire qu'une fois le bâtiment construit. Nous devons donc laisser la valeur par défaut du logiciel, à savoir  $12 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$  pour le chauffage.

#### IV.3.2. Calcul des déperditions par ventilation

Tout d'abord nous définissons le volume de l'habitation. Dans notre cas, celui-ci est de :

$$\text{Volume} = 316,8 \text{ m}^3$$

Ensuite, concernant les coefficients de déperditions par ventilation, nous décidons de les encoder manuellement ; les valeurs demandées sont des valeurs mensuelles. La formule pour déterminer ces coefficients est la suivante :

$$D_V = n * V * [\rho c_p]_{\text{air}} * (t_{\text{in}} - t_{\text{ext}}) \quad [W/K]$$

**Formule 2 : Calcul du coefficient de déperdition par ventilation**

Dans cette formule :

- $n$  est le taux de ventilation ; on le prend égal à 0,5
- $V$  est le volume de la maison, et vaut donc  $316,8 \text{ m}^3$
- $\rho]_{\text{air}}$  est la densité de l'air, qui est de  $1,2 \text{ kg/m}^3$
- $c_p]_{\text{air}}$  est la chaleur spécifique de l'air, qui est de  $1000 \text{ J/kg/K}$
- $t_{\text{in}}$  est la température intérieure, que l'on prend égale à  $20^\circ\text{C}$
- $t_{\text{ext}}$  est la température extérieure

En ce qui concerne la température extérieure, nous devons utiliser des valeurs mensuelles. Pour cela, nous nous basons sur les données fournies par l'IRM à Uccle pour l'année 2010, qui sont visibles sur le graphe suivant :

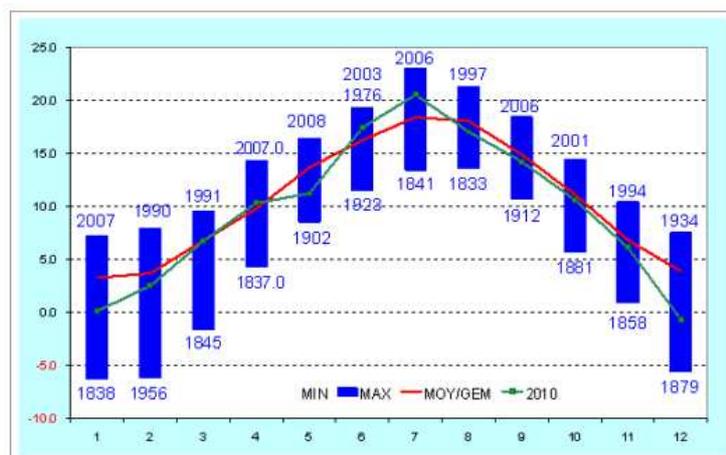


Figure 66 : Températures moyennes mensuelles à Uccle en °C (source : <http://www.meteo.be>)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
t° moyenne [°C]	0	2	7	10	12	17	20	16	14	11	7	-1
déperdition par ventilation [W/K]	1000	900	650	500	400	150	0	200	300	450	650	1050

Tableau 4 : Déperditions par ventilations mensuelles

#### IV.3.3. Encodage des parois

Nous allons ensuite procéder à l'encodage des parois de la maison (murs extérieurs et intérieurs, dalle de sol, planchers intermédiaires, toiture et ouvertures extérieures et intérieures). Nous allons le faire de manière simplifiée ; pour chaque paroi, nous fournissons :

- son type (mur, porte, fenêtre,...)
- sa surface
- son environnement (choix parmi une liste déroulante)
- sa valeur de  $U$  (ou de  $R$  dans le cas d'une dalle)

Dans le cas d'une fenêtre, les informations à fournir sont plus nombreuses :

- sa surface
- son inclinaison : détermination en se basant sur la figure suivante :

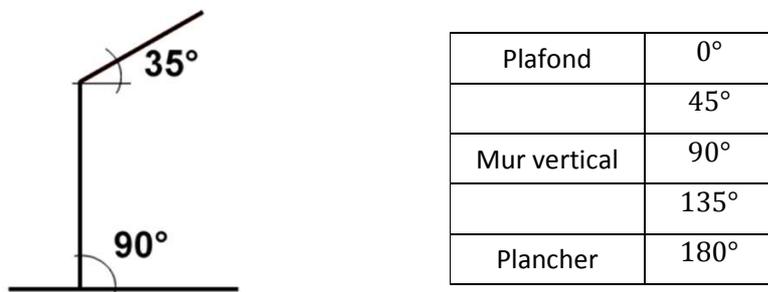


Figure 67 : Détermination de l'inclinaison des parois (source : [35])

Dans notre cas, toutes les fenêtres de l'habitation ont une inclinaison de 90°, sauf le velux présent dans le toit qui lui a une inclinaison de 30° (pente de la toiture)

- son orientation : détermination en se basant sur la figure suivante :

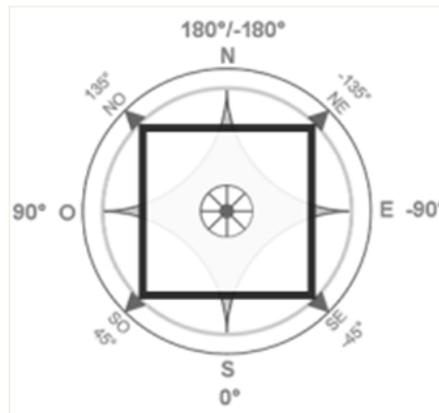


Figure 68 : Détermination de l'orientation des parois (source : [35])

Dans notre cas, l'orientation des différentes fenêtres de la maison est (en se référant à l'orientation générale de la maison visible sur la Figure 10) :

- fenêtres façade avant :  $-110^\circ$
  - fenêtres façade arrière :  $+70^\circ$
  - fenêtres pignon gauche :  $-20^\circ$
  - fenêtres pignon droit :  $+160^\circ$
- son environnement (choix parmi une liste déroulante)
  - sa valeur de  $U$  (méthode simplifiée) : valeur  $U$  moyen, valeur facteur solaire moyen, aire vue du vitrage, valeur  $U$  du vitrage ; cf. IV.2.9
  - sa protection solaire éventuelle : protection fixe ou mobile, commande manuelle ou automatique, position intérieure ou extérieure de la protection ; dans notre cas, nous plaçons pour chaque fenêtre une protection mobile intérieure, à commande manuelle (type persiennes) – sauf pour la porte-fenêtre du salon qui a une protection fixe extérieure
  - son ombrage : nous considérons la valeur par défaut

De même, pour la toiture, nous devons également préciser quelle est son inclinaison.

Concernant maintenant les valeurs de  $U$  ou  $R$  que nous allons encoder pour les différentes parois, nous allons procéder comme suit :

- pour les planchers, les murs intérieurs, la dalle de sol ainsi que pour les ouvertures extérieures et intérieures, nous allons encoder leur valeur de  $U$  (ou  $R$ ) déterminée au point IV.2 ; nous allons considérer ces valeurs comme fixées : nous ne modifierons pas les épaisseurs d'isolation précédemment déterminées pour ces différentes parois

- pour la toiture et le mur extérieur, nous déterminerons leur valeur de  $U$  définitive à la fin de l'analyse PEB : nous allons terminer de compléter le logiciel, et nous verrons ensuite quelles valeurs de  $U$  nous devons attribuer à la toiture et au mur extérieur pour que toutes les exigences de la réglementation soient respectées, en essayant de faire une optimisation sur les épaisseurs d'isolation à mettre en place ; les valeurs définitives du  $U$  de ces parois seront données au point VII de ce travail, avec les épaisseurs d'isolant correspondantes.

#### IV.3.4. Inertie de la maison

Nous allons à présent déterminer quelle est la classe de masse thermique de la maison étudiée dans le projet. Pour cela, nous nous basons sur le schéma de la figure suivante :

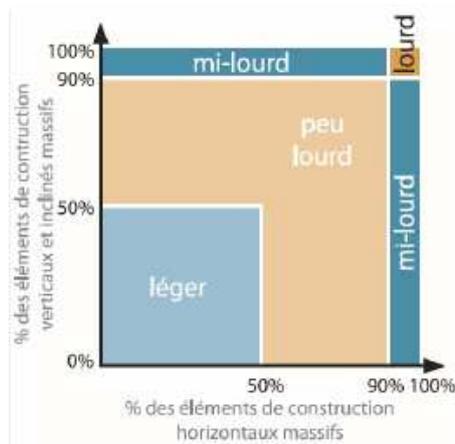


Figure 69 : Détermination de la classe de masse thermique (source : [35])

Il y a donc 4 classes possibles : léger, peu-lourd, mi-lourd et lourd.

Nous devons déterminer le pourcentage des éléments horizontaux et verticaux/inclinés de la maison qui sont massifs. Ce pourcentage sera différent en fonction du cas de maison étudié :

		maisons acier/trespa, acier/acier, acier/brique	maison mixte/maçonnerie	maison traditionnelle
<b>Éléments horizontaux :</b>	Dalle de sol	lourd	lourd	lourd
	Planchers intermédiaires	léger	léger	lourd
<b>Éléments verticaux/inclinés :</b>	Mur extérieur	léger	lourd	lourd
	Toiture	léger	léger	léger
	Mur intérieur « normal »	léger	léger	léger
	Mur intérieur bauge	lourd	lourd	/
	Fenêtres et portes	léger	léger	léger

Tableau 5 : Massivité des parois du bâtiment pour les différents cas

En fonction des surfaces de ces différentes parois, nous pourrions ainsi déterminer la classe de masse thermique de la maison, pour les différents cas. Cela sera fait au point VII de ce travail. Notons toutefois dès à présent que la dalle de sol étant dans tous les cas de type lourd, la classe de masse thermique de tous les cas sera au minimum « peu-lourd ».

#### IV.3.5. Chauffage

Nous allons à présent parler du système de chauffage de la maison. De par les informations fournies par l'architecte, on sait qu'il s'agit d'un chauffage central avec système d'émission par radiateurs.

Au niveau du logiciel PEB, on commence par définir le système de production de chaleur. Le type de générateur peut être choisi parmi une liste prédéfinie. Dans notre cas, il s'agit d'une chaudière à eau chaude à condensation.

Concernant le vecteur énergétique, la maison étant construite à Liège, nous avons tout naturellement choisi le gaz naturel. La figure suivante présente les réseaux de distribution du gaz naturel en Belgique.

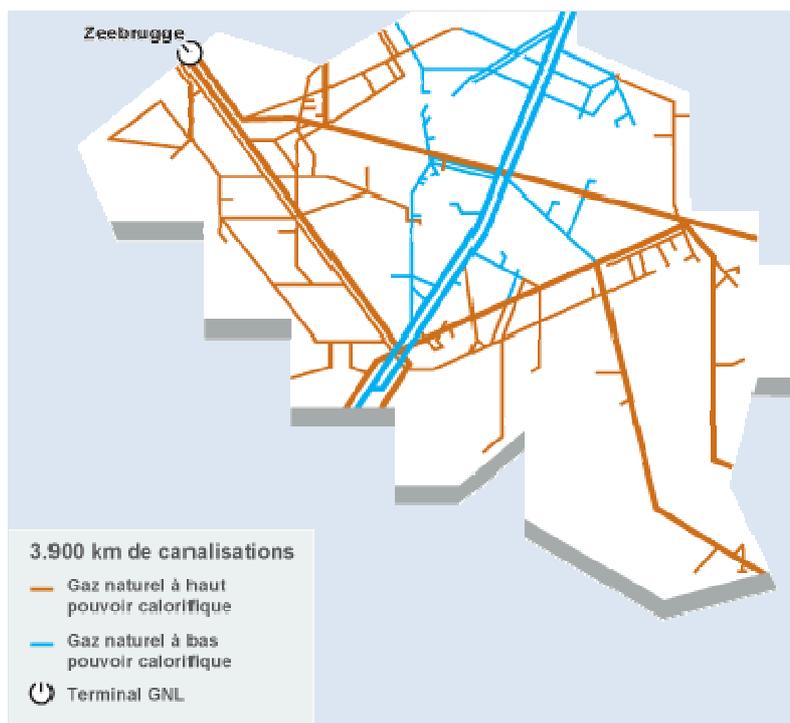


Figure 70 : Réseaux de gaz naturel en Belgique (source : <http://www.fluxys.com>)

Pour la chaudière considérée, nous devons introduire plusieurs données caractéristiques : la température de retour à 30 % de charge, le rendement à 30 % de charge et la température de retour de conception.

Ces différentes informations sont fournies par les fabricants, pour chaque chaudière. Pour pouvoir les compléter, nous avons donc dû choisir une chaudière bien particulière. Ainsi, nous avons décidé de placer une chaudière de la marque Vaillant : ecoTEC pro VC 136, dont la puissance de chauffage est de 13 kW. Elle a un rendement de 108 % à 40/30°C (températures de départ et de retour de l'eau), et sa température de retour à 30 % de charge est de 30°C. De plus, ce type de chaudière n'est ni équipé d'une veilleuse, ni d'un ventilateur intégré ni d'une régulation électronique.

La chaudière sera située dans le volume protégé de la maison : nous considérons qu'elle se situera au niveau du vide sous l'escalier, derrière la cuisine.

Concernant le système d'émission, nous décidons de faire un calcul détaillé. Comme dit précédemment, l'émission du chauffage se fait au moyen de radiateurs. Ceux-ci seront au nombre de 8 : 2 dans le salon, 1 dans chaque chambre, 1 dans le hall d'entrée, 1 au niveau du dressing et 1 dernier dans la salle de bains.

Ils sont de type 21S (2 panneaux, 1 rangée d'ailettes) et ils ont tous une superficie de 0,45 m<sup>2</sup> (= 0,5 \* 0,9) avec une vanne de réglage manuelle (vanne thermostatique). De plus, pour chacun d'eux, nous devons préciser la paroi extérieure associée.

Concernant le système de distribution, le fluide caloporteur sera l'eau. Pour chaque radiateur, nous avons estimé la distance le séparant de la chaudière. Les tuyaux de distribution seront de section circulaire, de 22 mm de diamètre, et entourés d'une coquille isolante en laine de verre de  $\lambda = 0,036 \text{ W/m/K}$  – le diamètre extérieur de la conduite avec isolation sera de 72 mm (25 mm d'épaisseur d'isolant).



Figure 71 : Coquille isolante de tuyaux (source : <http://www.isover.fr>)

#### IV.3.6. Ventilation

Le type de ventilation est le type A : Alimentation naturelle, évacuation naturelle.

Pour chaque pièce, nous devons fournir sa surface d'utilisation, c'est-à-dire la surface, mesurée au niveau du sol, délimitée par les parois verticales qui enveloppent l'espace.

Sur base de cette surface, le logiciel calcule le débit de ventilation nécessaire, cela en se référant au Tableau 2.

Ensuite, on implémente les grilles de ventilation dans le logiciel, vu qu'on sait, par l'architecte, que la ventilation se fait par le biais de grilles présentes au niveau des fenêtres. Nous allons considérer des grilles de ventilation de la société Aralco ([39]).

Pour chaque grille mise en place, on doit fournir sa classe de réglage<sup>18</sup> (classe P2 dans notre cas), son débit à 2 Pa par mètre courant (= 54 m<sup>3</sup>/hm) et sa longueur. Concernant les 2 premières données, il s'agit de valeurs fournies par le fabricant ([39]) ; la troisième donnée, quant à elle, correspond à la largeur de la fenêtre dans la pièce considérée.

#### IV.3.7. Eau chaude sanitaire

Comme pour le chauffage, on commence par définir le système de production de chaleur ; le type de générateur se choisit encore une fois dans une liste prédéfinie. Dans notre cas, il s'agit d'une « fourniture de chaleur externe », dont le vecteur énergétique sera de nouveau le gaz naturel (boiler au gaz MAG 9/1 OZ premium de la marque Vaillant).

Il suffit ensuite de préciser quel est le rendement de la fourniture (60 % dans notre cas), et si le générateur est équipé d'une veilleuse, ce qui n'est pas le cas pour nous ; ces informations sont fournies par le fabricant.

Ensuite, nous avons estimé la longueur de la boucle de circulation de l'eau chaude, en fonction de l'emplacement du boiler (près de la chaudière, sous l'escalier), et de l'emplacement des différents points de puisage, ceux-ci devant être également définis (dans la cuisine, dans la salle de bains de l'étage, dans la douche du RDC et dans la buanderie).

Les conduites de circulation considérées pour l'eau chaude sanitaire seront du même type que celles pour le chauffage : avec une coquille d'isolation extérieure en laine de verre.

Toutes les informations requises par le logiciel sont à présent complétées. Nous allons ainsi pouvoir déterminer les  $U$  du mur extérieur et de la toiture – et donc les épaisseurs d'isolant à mettre en place – pour que les exigences soient respectées (cf. point VII).

Une fois ces épaisseurs déterminées, nous allons pouvoir passer au point suivant de ce travail, qui est de réaliser l'analyse de cycle de vie du bâtiment étudié et de ses variantes. Comme dit au niveau de l'introduction de ce travail, nous allons utiliser l'outil Building Ecodesign Tool mis au point par ArcelorMittal pour réaliser cette ACV.

---

<sup>18</sup> Classes de réglage :

- P1 : auto régulation, peu
- P2 : auto régulation, moyen
- P3 : auto régulation, bon
- P4 : auto régulation, optimal

## V. BUILDING ECODESIGN TOOL

### V.1. Description rapide de « Building Ecodesign Tool »

Cette description rapide provient du guide d'utilisation de Building Ecodesign Tool ([40]).

Comme précisé dans l'introduction de ce travail, nous allons, pour réaliser les ACV des 6 cas étudiés, utiliser un outil qui a été mis au point en 2009 par ArcelorMittal, avec le concours du Centre de Recherche Public Henri Tudor (CRPHT) : Building Ecodesign Tool.

L'idée derrière cet outil était de coupler une analyse thermique et une évaluation environnementale (ACV) d'un bâtiment.

Pour réaliser l'analyse thermique, c'est le programme Capsol ([41]) qui a été choisi, cela parce qu'il s'agit du programme le plus largement reconnu en Europe. En ce qui concerne l'évaluation environnementale (ACV), il a été décidé que celle-ci se ferait grâce à une simple feuille Excel incluant les éléments de base d'une ACV ; un template de fichier Excel a donc été développé et intégré à Building Ecodesign Tool.

De plus, pour simplifier l'utilisation du programme Capsol, l'entrée des données concernant le projet étudié se fait par l'intermédiaire des programmes Alcyone ([42]) (pour la géométrie), et Pleiades ([38]) (pour la composition des parois, les scénarios,...), qui interagissent l'un avec l'autre.

La figure suivante illustre comment Building Ecodesign Tool opère :

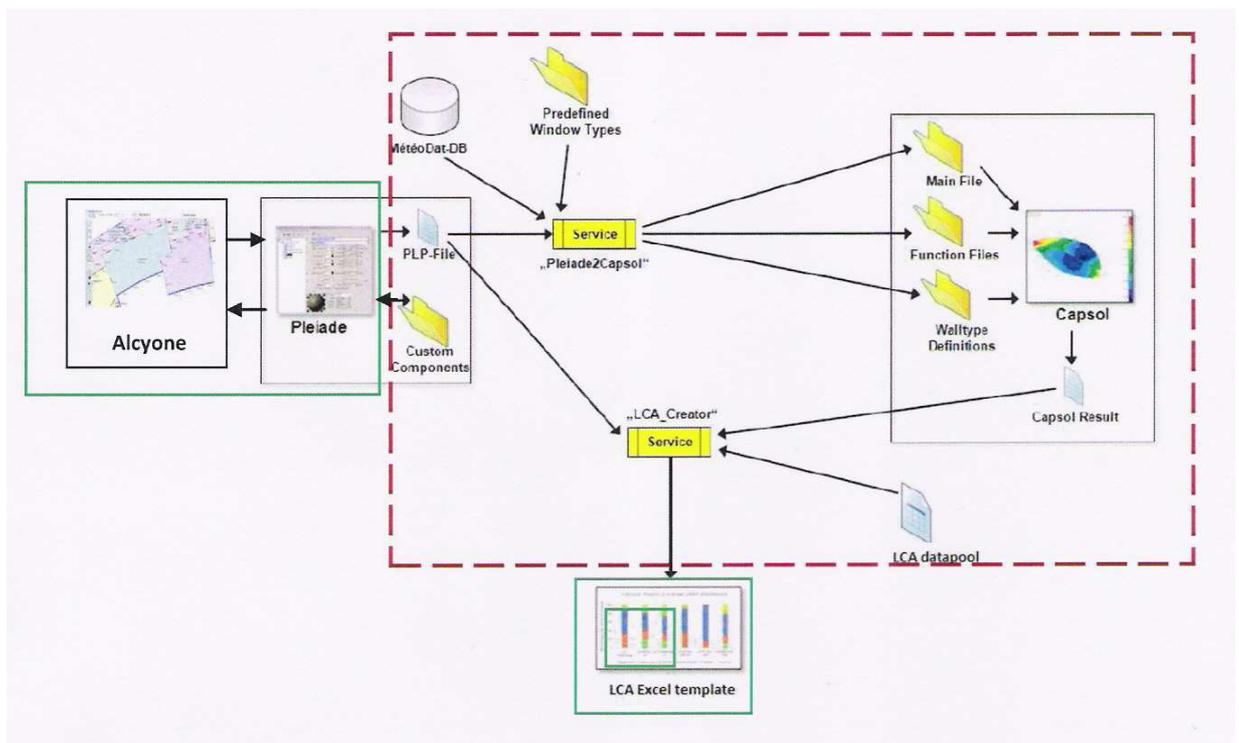


Figure 72 : Fonctionnement de Building Ecodesign Tool (source : [40])

Ce qui est encadré en vert sur cette figure est l'interface visible par l'utilisateur tandis que tout ce qui est encadré en rouge pointillé est l'interface de calcul, qui n'est pas accessible à l'utilisateur.

Dans un premier temps, l'utilisateur doit dessiner le bâtiment étudié avec Alcyone, et ce au départ d'un plan importé. Une fois cela fait, il définit dans Pleiades les compositions des parois du bâtiment ainsi que les scénarios de la vie du bâtiment. Suite à l'interaction entre les 2 programmes Alcyone et Pleiades, une fois les compositions créées dans Pleiades, elles sont disponibles dans Alcyone, et l'utilisateur peut les attribuer à chaque mur du bâtiment. Une fois cela fait, il ne reste plus qu'à exporter le projet d'Alcyone vers Pleiades. Le fichier PLP relatif au projet est automatiquement créé dans Pleiades, où l'utilisateur n'a plus qu'à attribuer les scénarios précédemment créés. Le fichier Pleiades ainsi créé est le fichier final.

L'utilisateur termine en lançant Building Ecodesign Tool → Capsol se met en route : il calcule et fournit les résultats de l'analyse thermique → les impacts liés à l'ACV sont calculés.

Finalement, les résultats sont automatiquement transférés au template de fichier Excel.

## **V.2. Description détaillée de Building Ecodesign Tool**

Nous allons à présent revoir toutes ces étapes, en les détaillant.

### **V.2.1. Alcyone – 1**

L'interface graphique Alcyone permet d'importer des plans sous divers formats. Ainsi, pour dessiner le bâtiment étudié dans Alcyone, il suffit d'en importer les plans, et de suivre les contours. Cela doit être fait pour tous les étages du bâtiment, ce y compris la toiture. Nous aurons donc 3 étages dans notre cas : le rez-de-chaussée, le 1<sup>er</sup> étage et le toit. Notons qu'il faut préciser pour chaque étage quelle en est sa hauteur ; pour le toit, il suffit de préciser quelle est la hauteur du faîte.

La géométrie du bâtiment passe non seulement par le tracé des contours extérieurs de la maison, mais également par le dessin des murs intérieurs. Ce faisant, l'utilisateur définit les différentes pièces de l'habitation. Le nom de ces pièces sera automatiquement transféré dans Pleiades. Notons que pour définir une pièce, celle-ci doit être impérativement fermée (« 4 murs »). Or, dans la réalité, cela n'est pas toujours le cas. Pour remédier à ce problème, il existe dans Alcyone une option, propre à chaque paroi, que l'on peut « cocher » et ainsi, bien que l'utilisateur ait dessiné la paroi dans Alcyone, elle ne sera pas explicitement créée dans Pleiades. Cela est valable aussi bien pour une paroi verticale que pour une paroi horizontale : pour un escalier ou une mezzanine par exemple.

L'utilisateur doit également définir les ouvertures du bâtiment : les fenêtres et les portes (intérieures et extérieures). Ces ouvertures peuvent avoir n'importe quelles dimensions, et leur « composition » peut être choisie parmi une liste de menuiseries contenues dans la librairie de Pleiades (interaction entre les 2 programmes).

Enfin, l'utilisateur doit diviser le bâtiment en différentes zones thermiques, dépendant par exemple de la fonction des pièces dans la maison – ultérieurement dans Pleiades, l'utilisateur définira des scénarios d'utilisation pour ces différentes zones. Une zone peut englober plusieurs pièces du bâtiment. Notons que ces différentes zones thermiques seront automatiquement transférées dans Pleiades.

Les différentes zones thermiques que nous allons considérer dans notre cas sont :

- zone salon/salle à manger/cuisine : pièce de vie
- zone hall d'entrée, wc du RDC, escalier, hall de nuit, dressing : pièce de passage
- zone chambre double au RDC : pièce de nuit occupée par 2 personnes
- zone chambres simples étage : pièce de nuit occupée par 1 personne
- zone buanderie, salle de bains étage : pièce humide

Notons que l'utilisateur doit également préciser quelle est l'orientation du bâtiment.

Dans notre cas, les Figure 73, Figure 74 et Figure 75 présentent les plans que l'on obtient d'Alcyone quand toutes ces étapes ont été réalisées. Les différentes zones thermiques apparaissent clairement sur ces plans, chacune ayant une hachure différente.

Les fenêtres et les portes transparaissent par un trait gras, respectivement de couleur bleue et rouge.

De plus, les parois verticales qui apparaissent en pointillés correspondent aux parois que l'on a désignées « à ne pas créer dans Pleiades ».

Pour chaque pièce de la maison sont précisés sur les plans non seulement sa surface, mais également le nom attribué à chaque paroi la composant, informations qui seront transférées dans Pleiades.

Figure 73 : Plan Alcyone RDC

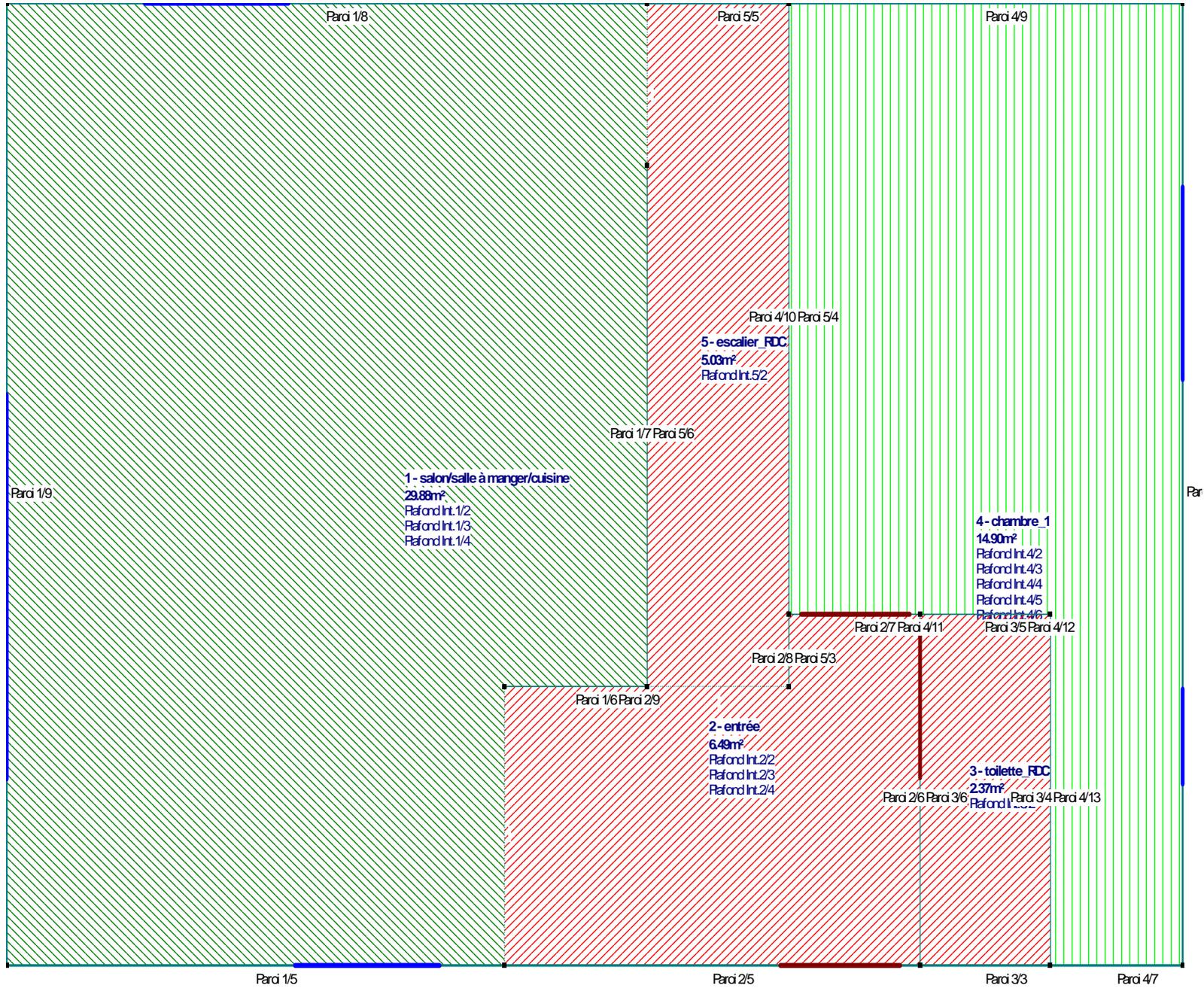


Figure 74 : Plan Aloyone 1<sup>er</sup> étage

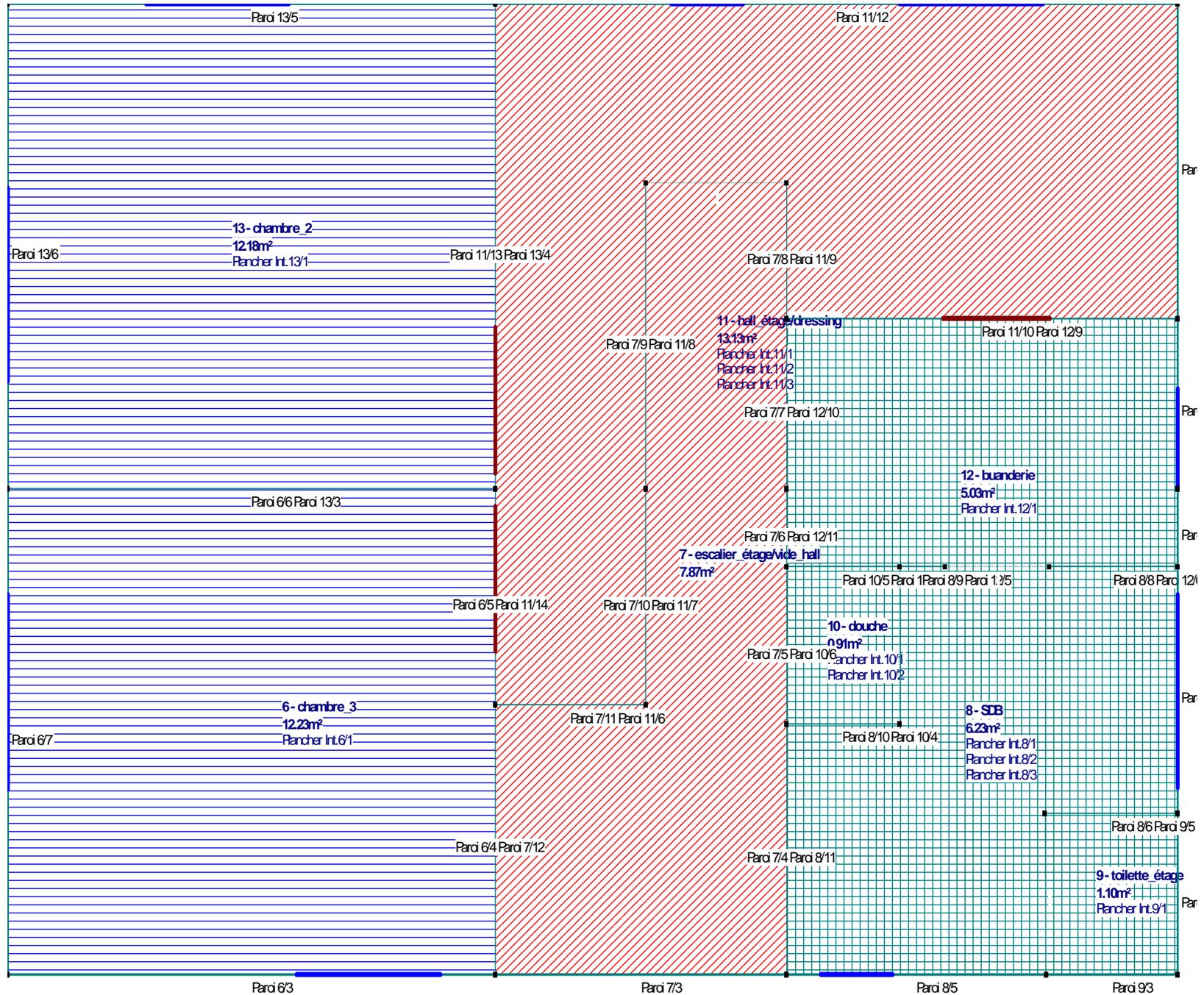




Figure 75 : Plan Alcyone toiture

Alcyone permet également une visualisation 3D du bâtiment étudié :

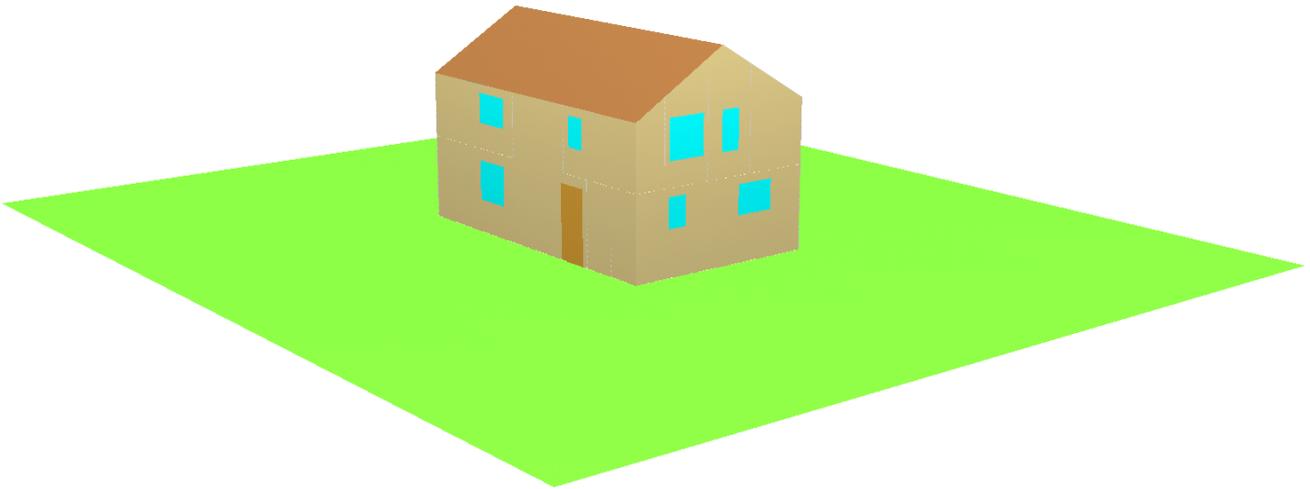


Figure 76 : Représentation 3D d'Alcyone de la maison étudiée

Voici un récapitulatif des différentes zones du bâtiment, avec pour chacune d'elle la surface et le volume correspondant :

Zone	Surface [ $m^2$ ]	Volume [ $m^3$ ]
Salon	29.88	76.18
Halls	26.99	91
Chambre double	14.9	38.01
Chambres simples	24.4	72.01
Salle de bains	13.3	39.86

Tableau 6 : Récapitulatif des surfaces et volumes des différentes zones

### V.2.2. Pleiades

Tandis qu'Alcyone permet de dessiner le bâtiment, Pleiades permet de créer les compositions des parois et les scénarios d'utilisation.

- Composition des parois

Pour nous aider dans la constitution des compositions des parois, une librairie de matériaux, d'éléments<sup>19</sup> et de menuiseries est disponible dans Pleiades (librairie que nous avons déjà mentionnée précédemment dans ce travail). Celle-ci fournit leurs propriétés physiques et thermiques (densité, épaisseur dans le cas d'éléments, conductivité thermique et chaleur spécifique). Il y a possibilité d'ajouter des matériaux à cette liste ; pour cela, il suffit de créer un nouveau matériau pour lequel on fournit les propriétés demandées par Pleiades.

<sup>19</sup> Matériaux dont l'épaisseur est fixée.

Dans notre cas, nous avons ajouté plusieurs matériaux :

- l'élément « panneaux trespa », dont les propriétés sont énoncées à l'Annexe B et pour lequel l'épaisseur fixe est de 1 cm
- le matériau « bauge », dont les propriétés sont énoncées à l'Annexe C
- les éléments « vide d'air », pour lesquels les valeurs de  $\lambda$ , fonction de l'épaisseur, se déterminent en se basant sur le Tableau 3, et dont la chaleur spécifique est celle de l'air, à savoir 1000 J/kg/K
- le matériau « Steel (Hot Dip Galvanised) interior », dont les propriétés sont les mêmes que celles du matériau « Steel (Hot Dip Galvanised) ». C'est ce matériau qui est utilisé pour représenter dans Pleiades les éléments minces en acier (comme ceux composant notre structure porteuse); les données correspondant à ce matériau sont relatives à un usage en extérieur. Or, dans notre cas, nous en faisons un usage « intérieur ». Les conditions d'environnement étant totalement différentes pour ce type d'usage (matériau protégé des conditions extérieures donc moins « agressé »), certaines de ses propriétés vont changer. Ce n'est toutefois pas le cas pour ses propriétés physiques à entrer dans Pleiades.

Le Tableau 52 à l'Annexe E fournit un récapitulatif de tous les matériaux utilisés dans les compositions des parois, avec leurs propriétés.

La définition des compositions des parois (murs, toit et planchers) se fait en 2 étapes :

- tout d'abord, assemblage de matériaux et d'éléments de la librairie, dans le but d'obtenir des « compositions » ; pour les matériaux, l'utilisateur doit préciser son épaisseur
- ensuite, assemblage des compositions créées dans le but d'obtenir des « multi-compositions »

Cela mérite de plus amples explications.

Pour tenir compte du fait qu'une partie d'une paroi peut être relative à la structure du bâtiment tandis qu'une autre de ses parties est relative à un autre composé du bâtiment (à la façade par exemple), nous allons créer pour chaque paroi plusieurs compositions, que nous allons ensuite assembler en une seule multi-composition, et ce en attribuant à chaque composition un certain pourcentage.

Les compositions pour chaque paroi sont au nombre de 3 : une composition thermique, une composition structurelle et une composition ACV.

- `composition_therm` : cette composition inclut tous les matériaux de la paroi qui jouent un rôle, thermiquement parlant. Cette composition est semblable à celle sur laquelle nous nous sommes basés précédemment pour déterminer le  $U$  des parois. Il faut cependant faire une légère modification pour les parois dont la structure est ponctuelle – et pour lesquelles nous avons utilisé le programme Therm pour déterminer leur  $U$ . En effet, si nous considérons la composition sans faire de modification, cela reviendra de nouveau à négliger la structure (ponts thermiques

non pris en compte), et à considérer une valeur de  $U$  plus faible que ce qu'elle n'est en réalité.

Pour remédier à ce problème, nous allons modifier l'épaisseur de la couche d'isolant interne, de telle sorte que le  $U$  de la paroi ainsi modifiée – et pour laquelle on néglige la structure – soit égal au  $U$  calculé par Therm (qui est la valeur réelle).

- `composition_struct` : cette composition inclut tous les matériaux de la paroi qui jouent un rôle, structurellement parlant. Dans le cas où la structure est continue (blocs de maçonnerie par exemple), il faut bien entendu considérer l'épaisseur réelle de matériau. Par contre, si la structure est ponctuelle (éléments minces en acier), l'épaisseur de matériau qu'il faut considérer est de  $0,1\text{ cm}$  ; ensuite, au niveau de la multi-composition, nous attribuerons à cette composition le pourcentage de structure présent dans la paroi.

- `composition_LCA` : cette composition inclut tous les matériaux de paroi excepté ceux faisant partie de la `composition_struct`.

Notons qu'en ce qui concerne la couche d'isolant interne, c'est bien son épaisseur réelle qu'il faut considérer, et non pas la modifiée dont on tient compte dans la `composition_therm`.

De plus, pour certains matériaux « non structurels » dont la configuration à l'intérieur de la paroi est ponctuelle (les éléments de fixation par exemple), il y a lieu de considérer pour eux une épaisseur équivalente à la place de leur épaisseur réelle. En effet, tenir compte de l'épaisseur réelle du matériau reviendrait à considérer qu'il est présent sur toute la superficie de la paroi avec cette épaisseur, ce qui ne reflèterait pas la réalité (matériau uniquement présent tous les  $XX\text{ cm}$  en réalité). Cette épaisseur équivalente se calcule comme ceci :

$$e_{\text{equivalente}} = \frac{\text{volume total du matériau dans la paroi} \quad [m^3]}{\text{aire totale de la paroi} \quad [m^2]} \quad [m]$$

Maintenant que les 3 compositions de chaque paroi sont créées, nous allons générer les multi-compositions.

Une multi-composition est automatiquement faite de 7 compositions ; l'utilisateur doit attribuer un pourcentage à chacune d'entre elles.

- ligne 1 : la première ligne doit être remplie avec la `composition_therm`
- ligne 2 : la deuxième ligne doit être remplie avec la `composition_struct`
- lignes 3 – 7 : les 5 dernières lignes doivent être remplies avec la `composition_LCA`. Chaque ligne est relative à une partie spécifique du bâtiment ; seule la ligne correspondant à la partie du bâtiment dont la paroi considérée fait partie aura un pourcentage non nul :

- ligne 3 : façade
- ligne 4 : toiture
- ligne 5 : plancher
- ligne 6 : portes
- ligne 7 : autres

Comment attribuer à chaque ligne son pourcentage ? La première chose à dire est que le pourcentage total pour la multi-composition doit être de 100 %. De plus, aucun pourcentage ne peut être égal à 0 : le pourcentage minimal que l'on peut attribuer est de 0,01 %.

Le pourcentage attribué à la composition\_therm sera toujours de 50 %. Cependant, pour tenir compte du fait qu'aucun pourcentage ne peut être inférieur à 0,01 %, le pourcentage de cette composition sera de :

$$\text{pourcentage composition\_therm} = 50 - (X * 0,01) \%$$

Généralement, le  $X$  de cette formule sera égal à 4 : les 4 parties du bâtiment dont la paroi considérée ne fait pas partie.

En ce qui concerne les pourcentages des composition\_struct et composition\_LCA, nous devons différencier le cas d'une structure continue du cas d'une structure ponctuelle.

Dans le cas où la structure est continue, on attribue à chacune des compositions structurelle et LCA le pourcentage de 25 %.

$$\text{pourcentage composition\_struct} = \text{pourcentage composition\_LCA} = 25 \%$$

Dans le cas où la structure est ponctuelle, on attribue à la composition\_struct le pourcentage de structure dans la paroi considérée. Celui-ci se calcule comme ceci :

$$\text{pourcentage composition\_struct} = \frac{\text{volume de structure dans la paroi, par m}^2 \text{ de paroi } [m^3/m^2]}{\text{volume total de paroi, par m}^2 \text{ de paroi } [m^3/m^2]} * 100 \quad [\%]$$

On attribue ensuite à la composition\_LCA le pourcentage :

$$\text{pourcentage composition\_LCA} = (50 - \text{pourcentage de structure}) \%$$

Remarque : dans le cas particulier où une paroi serait non porteuse, sa composition\_struct ne doit contenir aucun matériau (en pratique, ce n'est pas possible donc on remplit quand même une ligne de la composition, mais avec un matériau qui n'est utilisé nulle part ailleurs dans le projet), et son pourcentage est nul (égal à 0,01 % en pratique) ; dans ce cas, le pourcentage de la composition\_LCA est de 50 %.

Les compositions et multi-compositions des parois de notre bâtiment seront détaillées ultérieurement.

- Scénarios

Dans Pleiades, nous devons également définir différents scénarios, qui seront ensuite attribués aux zones thermiques définies dans Alcyone.

A chaque zone thermique, on doit attribuer :

- un scénario d'occupation
- un scénario de ventilation
- un scénario de puissance dissipée
- un scénario de chauffage de l'air
- un scénario de refroidissement de l'air

Notons dès à présent que nous ne considérerons pas de climatisation dans notre bâtiment. Il n'y aura donc pas de scénario de refroidissement de l'air.

Les scénarios que l'on attribue aux zones thermiques sont des scénarios annuels. Ceux-ci sont créés au départ de scénarios hebdomadaires.

- Scénarios d'occupation

Le scénario d'occupation hebdomadaire s'exprime en terme de pourcentage de l'occupation maximale possible.

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction de ce travail, nous allons considérer que la maison est occupée par une famille de 4 personnes : 1 couple et 2 enfants, ce qui correspond aux chambres disponibles dans la maison. L'occupation maximale possible est donc de 4 personnes.

Pour définir ce scénario d'occupation, nous allons nous baser sur le scénario d'occupation de la Réglementation Thermique 2005 ([43]). Celui-ci est visible aux Figure 117 et Figure 118 de l'Annexe F.

Le bâtiment étudié étant un logement, ses horaires d'occupation sont de type long, ce qui signifie :

Horaire d'occupation	Heures par jour	Jours par semaine
Longs	16 (de 0h à 10h et de 18h à 24h)	5 (lundi au vendredi)
	24h	Samedi et dimanche

Tableau 7 : Horaire hebdomadaire d'occupation (source : [43])

Sur base de cet horaire d'occupation hebdomadaire, nous allons attribuer à chaque zone de la maison un scénario d'occupation spécifique, dans le sens où le pourcentage d'occupation maximale affecté sera différent, fonction de l'occupation réelle de la zone en question.

En ne faisant pas cela et en considérant par exemple un pourcentage de 100 % pour toutes les zones, cela reviendrait à considérer que pendant les heures d'occupation, toutes les zones de la maison seraient occupées par 4 personnes, ce qui n'est pas du tout réaliste !!

Ainsi, voici les pourcentages et horaires que nous allons considérer pour les différentes zones :

Jours de la semaine	Heures par jour	Pourcentage des zones
lundi au vendredi	de 0h à 7h et de 22h à 24h	chambre double : 50 % (2 personnes) chambres simples : 25 % (2*1 personne)
	de 7h à 10h et de 18h à 22h	salon : 100 % (4 personnes)
samedi et dimanche	de 0h à 7h et de 22h à 24h	chambre double : 50 % (2 personnes) chambres simples : 25 % (2*1 personne)
	de 7h à 22h	salon : 100 % (4 personnes)

**Tableau 8 : Précisions pour les scénarios d'occupation hebdomadaire des différentes zones**

Remarquons qu'alors, nous considérons un pourcentage de 0 % pour les zones entrée et salle de bains. En effet, nous estimons qu'il ne s'agit que de lieux de passage, et non de vie dans la maison.

En ce qui concerne le scénario d'occupation annuel, toujours selon la RT 2005 (Figure 117, Figure 118, [43]), nous ne considérons pas de période de vacances. On applique donc le scénario d'occupation hebdomadaire propre à chaque zone à toutes les semaines de l'année.

Les représentations des différents scénarios d'occupation – hebdomadaires et annuel – dans Pleiades se trouvent à l'Annexe G ; ce sont les Figure 119 à Figure 123.

– Scénarios de ventilation

Le scénario de ventilation hebdomadaire s'exprime en terme de pourcentage du volume d'air contenu dans la zone qui va être renouvelé en 1 heure.

Plus précisément, on attribue à chaque zone un débit maximum en  $m^3/h$ , qui est la fraction maximale du volume d'air contenu dans la zone qui va être renouvelé en 1 heure. Ensuite, on associe un certain pourcentage à ce débit maximum.

Pour déterminer le débit maximum relatif à chaque zone, nous allons nous baser sur la norme NBN D50-001 (annexe 5 de [33]), qui est la réglementation en vigueur en Région wallonne en terme de ventilation (cf. Tableau 2). Les surfaces proviennent du Tableau 6.

- zone entrée :  
débit maximum :  $0 m^3/h$  car lieu de passage, de transition

- zone salon :  
surface :  $29,88 \text{ m}^2$   
débit maximum :  $3,6 * 29,88 = 107,6 \approx 110 \text{ m}^3/\text{h} > 75 \text{ et } < 150 \rightarrow \text{OK}$
- zone chambre double :  
surface :  $14,9 \text{ m}^2$   
débit maximum :  $3,6 * 14,9 = 53,64 \approx 55 \text{ m}^3/\text{h} > 25 \text{ et } < 72 \text{ (car 2 personnes)} \rightarrow \text{OK}$
- zone chambres simples :  
surface :  $24,4 \text{ m}^2$   
débit maximum :  $3,6 * 24,4 = 87,84 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow 72 \text{ m}^3/\text{h}$  pour respecter les exigences
- zone salle de bains :  
surface :  $13,3 \text{ m}^2$   
débit maximum :  $3,6 * 13,3 = 47,88 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow 50 \text{ m}^3/\text{h}$  pour respecter les exigences

Ainsi, nous avons déterminé les débits maximums pour chaque zone thermique de l'habitation. Pour que ceux-ci soient respectés (exigences PEB), il suffit de leur associer un pourcentage de 100 %.

Nous devons à présent définir le scénario de ventilation en lui-même, c'est-à-dire à quels moments du jour – et de la semaine – cette ventilation va s'opérer. Pour cela, nous allons, comme pour le scénario d'occupation, nous baser sur la RT 2005 (Figure 117, Figure 118, [43]) :

<b>Horaire d'occupation</b>	<b>Heures par jour</b>	<b>Jours par semaine</b>
Longs	permanent	7

**Tableau 9 : Horaire hebdomadaire de ventilation (source : [43])**

Nous avons ainsi déterminé les scénarios de ventilation hebdomadaires pour toutes les zones thermiques de la maison.

En ce qui concerne le scénario de ventilation annuel de chaque zone du bâtiment, comme pour l'occupation, nous ne considérons pas de période de vacances. On applique donc le scénario de ventilation hebdomadaire correspondant (du point de vue de la zone considérée) à toutes les semaines de l'année.

Les représentations des 2 scénarios de ventilation – hebdomadaire et annuel – dans Pleiades se trouvent à l'Annexe G ; ce sont les Figure 124 et Figure 125.

– Scénarios de puissance dissipée

Les scénarios de puissance dissipée hebdomadaires s'expriment soit en Watts, soit en Watts par  $m^2$  ( $W/m^2$ ).

La puissance dissipée, en  $W/m^2$ , est la puissance qui se dégage des éléments électriques par  $m^2$ . C'est donc la somme des gains internes dus aux équipements électriques et à l'éclairage. Ceux-ci valent :

- gains internes dus à l'éclairage : généralement, on considère pour l'éclairage que toute l'énergie électrique consommée se transforme intégralement en chaleur ; ainsi, nous allons considérer une valeur de  $4 W/m^2$  pour les gains internes dus à l'éclairage ([44]).
- gains internes dus aux équipements électriques :  $5 W/m^2$  selon la RT 2005 (Figure 117, Figure 118, [43])

Remarque : pour avoir les gains internes globaux, il faut ajouter à la puissance dissipée les gains dus aux occupants (cf. scénario d'occupation).

La puissance dissipée sera donc de  $9 W/m^2$ .

En ce qui concerne le scénario à proprement parler, nous allons nous baser sur le scénario d'utilisation de l'éclairage artificiel de la RT 2005 (Figure 117, Figure 118, [43]) :

Horaire d'occupation	Heures par jour	Jours par semaine
Longs	5 (de 7h à 9h et de 19h à 22h)	5 (lundi au vendredi)
	15 (de 7h à 22h )	Samedi et dimanche

**Tableau 10 : Horaire hebdomadaire de puissance dissipée (éclairage) (source : [43])**

Nous allons considérer ce scénario de puissance dissipée pour toutes les zones thermiques de la maison, sauf pour la zone salon/salle à manger/cuisine.

En effet, c'est dans cette zone que fonctionne le frigo, qui est le seul appareil de la maison (mis à part les réveils), à fonctionner en permanence. Nous devons donc faire un cas à part pour lui.

Si on considère que le frigo dissipe en permanence  $75 W$ , nous avons :

- surface :  $\pm 30 m^2$
- puissance dissipée quand l'éclairage et les autres équipements électriques sont éteints :  $75 W$
- puissance dissipée quand l'éclairage et les autres équipements électriques sont allumés :  $9 * 30 + 75 = 345 W$

Remarquons que le scénario dans la zone du salon est exprimé en  $W$ , tandis qu'il s'exprime en  $W/m^2$  dans toutes les autres zones de la maison.

En ce qui concerne le scénario de puissance dissipée annuel, on procède comme pour les scénarios précédents : on applique le scénario de puissance dissipée hebdomadaire à toutes les semaines de l'année.

Les représentations des scénarios de puissance dissipée – hebdomadaires et annuel – dans Pleiades se trouvent à l'Annexe G ; ce sont les Figure 126, Figure 127 et Figure 128.

#### – Scénarios de chauffage de l'air

Le scénario de chauffage de l'air hebdomadaire s'exprime en  $^{\circ}C$ . La température introduite est la température de consigne pour la mise en route du dispositif de chauffage.

Pour déterminer cette température de consigne, nous nous sommes de nouveau basés sur la RT 2005 (Figure 117, Figure 118, [43]) : le bâtiment étudié étant un logement, son niveau de température est moyen, ce qui correspond à une température de consigne de  $19^{\circ}C$ .

Cela signifie que si la température dans la zone devient inférieure à  $19^{\circ}C$ , le dispositif de chauffage se met en route.

Nous allons considérer cette température de consigne pour toutes les zones de la maison, et pour toutes les heures de la semaine.

En ce qui concerne le scénario de chauffage annuel, nous allons considérer que le dispositif de chauffage ne fonctionne que durant les mois « froids » : on chauffe toute l'année sauf du 16 avril au 16 septembre.

Les représentations des 2 scénarios de chauffage de l'air – hebdomadaire et annuel – dans Pleiades se trouvent à l'Annexe G ; ce sont les Figure 129 et Figure 130.

Nous avons ainsi fini de déterminer les compositions des parois et les scénarios dans Pleiades.

### V.2.3. Alcyone – 2

Une fois la création des compositions et multi-compositions dans Pleiades terminée, on retourne dans Alcyone. Suite à l'interaction entre les 2 programmes, les multi-compositions sont désormais disponibles dans Alcyone, et l'utilisateur n'a plus qu'à attribuer à chaque paroi du bâtiment sa multi-composition correspondante.

Une fois cela fait, il ne reste plus qu'à exporter le projet d'Alcyone vers Pleiades.

#### V.2.4. Pleiades – 2

Suite à l'exportation, le fichier PLP relatif au projet est automatiquement créé dans Pleiades. Les caractéristiques des différentes pièces/zones thermiques sont directement transférées d'Alcyone vers Pleiades : surface, volume, nom des parois.

A ce moment, il ne reste plus à l'utilisateur qu'à attribuer à chaque zone thermique du bâtiment ses scénarios respectifs précédemment créés.

C'est ce qui se passe en théorie, mais en pratique, quelques opérations doivent encore être effectuées.

Tout d'abord, nous devons définir de quelle station météorologique les informations sur le climat doivent être considérées (provenant de la base de données Meteonorm). Dans notre cas, la station en question est celle d'Uccle.

Ensuite, si des modifications sur des parois doivent être faites, c'est à ce moment-là qu'il faut les faire. Par exemple, dans notre cas, nous devons effectivement en faire. En effet, si on regarde précisément les plans de la maison (Figure 10, Figure 11 et Figure 12), il apparaît que la cloison du hall de nuit mitoyenne avec l'escalier ne va pas jusqu'au plafond, mais s'arrête à une hauteur de  $1,17\text{ m}$  – il s'agit plutôt d'une balustrade.

Or, lorsqu'on la crée dans Alcyone, sa hauteur est automatiquement définie comme allant jusqu'au plafond, et il n'y a pas moyen de remédier à cela dans le programme. C'est donc dans Pleiades qu'il faut modifier sa hauteur.

De plus, n'étant pas possible de créer des ouvertures dans le toit (velux) dans Alcyone, c'est également dans Pleiades qu'il faut le faire. Dans notre cas, nous avons bel et bien un velux, au niveau de la toiture avant de la maison, dont les dimensions sont :  $h = 1,1\text{ m}$  et  $l = 0,95\text{ m}$  (cf. Figure 11).

Cette remarque est également valable pour d'éventuelles protections solaires de fenêtres du bâtiment étudié. Pleiades permet de créer ces protections, et de les appliquer à n'importe quelle ouverture du bâtiment. Dans notre cas, nous avons une protection solaire fixe au niveau de la porte-fenêtre du salon (cf. Figure 10) ; elle couvre toute la fenêtre en longueur, soit  $2,4\text{ m}$ , a une largeur de  $1,2\text{ m}$ , et est située à  $2,45\text{ m}$  par rapport au sol, c'est-à-dire  $0,1\text{ m}$  au-dessus de la fenêtre.

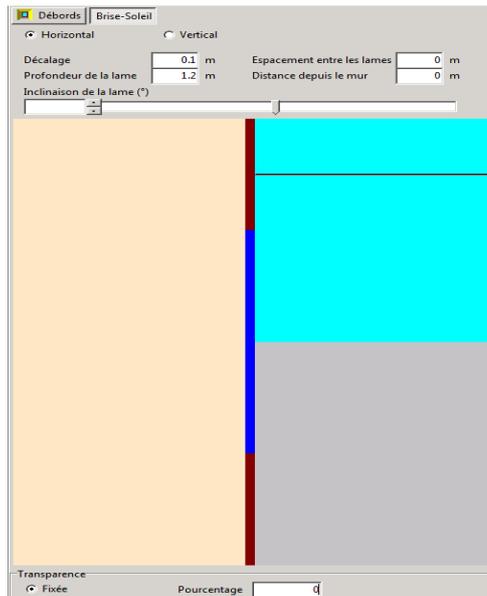


Figure 77 : Représentation du pare-soleil de la porte-fenêtre dans Pleiades

Finalement, il est bon de changer les puissances de chauffage de chaque zone thermique du bâtiment. En effet, ces puissances sont fixées automatiquement par Pleiades, mais elles sont très exagérées. Si on veut que les résultats obtenus soient réalistes, il vaut mieux modifier ces puissances pour qu'elles se rapprochent plus de la réalité. Pour déterminer les puissances de chauffage dans chaque zone, on se base sur la puissance totale de la chaudière, que l'on répartit dans chaque zone au prorata des volumes des différentes zones. Dans notre cas, voici donc les puissances que nous allons considérer dans chaque zone de la maison :

- comme précisé lors de l'analyse PEB complète du bâtiment, nous considérons que le chauffage de la maison est réalisé par l'intermédiaire d'une chaudière dont la puissance de chauffage est de 13 kW
- volume total de la maison : 317,06 m<sup>3</sup>

Zone	Volume [ m <sup>3</sup> ]	Puissance [ kW ]
Salon	76,18	3,1
Halls	91	3,7
Chambre double	38,01	1,6
Chambres simples	72,01	3
Salle de bains	39,86	1,6
<b>Total</b>	<b>317,06</b>	<b>13</b>

Tableau 11 : Puissance de chauffage dans chaque zone de la maison

Les volumes des différentes zones sont ceux fournis par Pleiades.

Une fois toutes ces modifications effectuées, le fichier Pleiades obtenu est terminé. Notons qu'à ce stade, Pleiades fournit un récapitulatif précis des différentes pièces et parois du bâtiment. Dans ce métré, on retrouve :

- le nom de la pièce
- le nom de la paroi
- l'environnement avec lequel la paroi est en contact (autre pièce, sol, extérieur)
- la surface de la paroi
- l'orientation de la paroi : détermination en se basant sur la Figure 68
- l'inclinaison de la paroi : détermination en se basant sur la Figure 67
- le nombre de fenêtres présentes dans la paroi
- la composition de la paroi

Ce récapitulatif se trouve à l'Annexe H.

Il ne reste plus à l'utilisateur qu'à lancer Building Ecodesign Tool. Capsol se met en route : il calcule et fournit les résultats de l'analyse thermique ; les impacts liés à l'ACV sont calculés. Le template de fichier Excel est alors créé, fournissant les résultats de l'ACV.

#### V.2.5. Template de fichier Excel

- Description des différentes feuilles du template

La première feuille du template, « Capsol Input », fournit les demandes énergétiques pour le chauffage et le refroidissement. Elles sont écrites automatiquement, les valeurs venant de Capsol. Les résultats sont donnés en *Wh/an*.

Rappelons que dans notre cas, nous ne considérons pas de climatisation. La valeur correspondante sera donc nulle.

La deuxième feuille du template, « Pleiades input + LCA calculation », fournit, sans tenir compte du remplacement, le GWP (exprimé en *kg CO<sub>2</sub> eq*) et le CED (exprimé en *MJ eq*) pour chaque matériau du bâtiment – comme dit dans l'introduction de ce travail, ce sont ces 2 impacts que nous allons évaluer au niveau de l'ACV.

Elle fournit également ces résultats en les organisant :

- par groupes : Pierres et bétons ; Mortiers et plâtres ; Acier ; Aluminium ; Isolants et plastiques ; Verres et métaux ; Fenêtres, portes et portes-fenêtres ; Portes ; Bois et végétaux
- par emplacement dans le bâtiment<sup>20</sup> (Structure, Façade, Toiture, Plancher, Portes, Autres).

De plus, c'est dans cette feuille que l'on doit fournir la consommation en électricité du bâtiment étudié, en *kWh/an*. Le calcul de cette consommation est fait ultérieurement dans ce travail.

---

<sup>20</sup> Ce sont les pourcentages attribués à chaque composition dans les multi-compositions qui servent à organiser les résultats par partie du bâtiment.

La troisième feuille du template, « User interface », est la feuille où l'utilisateur doit le plus intervenir.

Tout d'abord, c'est là qu'il précise la durée de vie qu'il a considérée pour le bâtiment. Dans notre cas, nous allons considérer, comme mentionné au début de ce travail lors de la détermination de l'unité fonctionnelle du projet, une durée de vie de 80 ans pour notre bâtiment, qui est la durée de vie moyenne des bâtiments en Belgique.

Ensuite, c'est là que l'utilisateur peut manuellement ajouter des matériaux qui n'ont pas été pris en compte dans le fichier Pleiades (typiquement, les fondations du bâtiment). Les seules informations que l'utilisateur doit fournir concernant ces matériaux sont :

- de quelle partie du bâtiment ils sont relatifs
- la quantité de matériau (exprimée en l'unité de référence propre au matériau -  $kg, m^2$  ou  $m^3$ )

Le GWP et le CED de ces matériaux seront ensuite calculés automatiquement.

Dans notre cas, nous devons ajouter les fondations du bâtiment. Celles-ci sont composées de béton lourd et d'armatures en acier. Ces 2 matériaux font partie de la structure du bâtiment étudié. Quant à leurs quantités, nous les avons calculées de la manière suivante :

De par l'architecte, on sait que les fondations (semelles filantes) ont une largeur de 30 cm, une épaisseur de 75 cm, et qu'elles font tout le pourtour de la maison (cf. Figure 12).

Nous avons donc un volume total de béton pour les fondations de :

$$\text{quantité béton fondation} = 0,3 * 0,75 * 2 * (9,6 + 6) = 7,02 \text{ m}^3$$

En ce qui concerne les armatures placées dans le béton, on en place ( $3\phi 10 + 10\%$ ) sur tout le pourtour (longitudinalement - les « + 10 % » permettent de tenir compte des armatures transversales), ce qui correspond à une section de :

$$1,1 * \left( 3 * \frac{\pi * \phi^2}{4} \right) = 1,1 * \left( 3 * \frac{\pi * 10^2}{4} \right) = 2,59 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

Et donc, le volume total d'armatures mis en place dans le béton des fondations est :

$$\text{volume armatures fondation} = 2,59 * 10^{-4} * 2 * (9,6 + 6) = 8,09 * 10^{-3} \text{ m}^3$$

L'unité de référence pour l'acier étant le  $kg$ , on a :

$$\text{quantité acier béton} = 8,09 * 10^{-3} * 7850 = 63,4 \text{ kg}$$

De plus, l'utilisateur doit choisir, parmi des listes déroulantes, le mix électrique<sup>21</sup>, ainsi que les technologies permettant le chauffage et le refroidissement ; en fonction de ces choix, les valeurs par unité de référence des impacts GWP et CED seront automatiquement adaptées.

---

<sup>21</sup> Le mix électrique est la proportion des différentes sources (énergie fossile, énergie nucléaire, énergies renouvelables) dans la production d'électricité. Il est propre à chaque pays. Dans le template, le choix se fait parmi le Luxembourg, la France, la Belgique et l'Allemagne.

Dans notre cas, le mix électrique que nous allons choisir est bien entendu celui de la Belgique. Concernant la technologie de chauffage, il s'agit, comme dit au niveau de l'analyse PEB complète, d'une chaudière gaz à condensation d'une puissance de 13 kW (et nous n'avons pas de climatisation).

Enfin, l'utilisateur a la possibilité de spécifier si l'électricité est fournie en partie par des panneaux photovoltaïques, tout en précisant quelle quantité de panneaux est installée, en  $m^2$ .

La quatrième feuille, « Results – Whole life-span », résume les résultats de GWP et de CED pour l'entièreté du bâtiment durant toute sa durée de vie. Les résultats sont fournis d'une part en ne tenant pas compte du remplacement au cours de la vie du bâtiment, et d'autre part en tenant compte. De plus, les résultats sont organisés soit par groupes de matériaux, soit par parties du bâtiment.

La cinquième feuille, « Link to the datapool », est une feuille très importante. En effet, elle contient le datapool de Building Ecodesign Tool. Une explication sur ce qu'est exactement le datapool est faite par la suite.

Finalement, les cinquième et sixième feuilles du template, « Mat replace. intermediary calc » et « Interm. calcul. mat added man », calculent les impacts liés au remplacement des matériaux.

- Explications du datapool

Qu'est-ce que le datapool exactement ?

Le datapool reprend tous les matériaux, éléments et menuiseries de la librairie contenue dans Pleiades, et pour chacun d'eux, il fournit la densité (valeur de Pleiades), l'unité de référence ainsi que le GWP et le CED par unité de référence, et la durée de vie. C'est sur les valeurs contenues dans ce datapool que repose tout le calcul des impacts GWP et CED, et donc l'ACV.

Une partie de ce datapool est reprise dans le Tableau 52 de l'Annexe E, celle correspondant aux matériaux utilisés dans les compositions des parois.

En ce qui concerne les valeurs de GWP et CED reprises dans le datapool, un fichier reprenant la provenance de chacune d'entre elles est disponible (Annexe I). On retrouve également dans ce fichier des informations concernant la provenance des GWP et CED relatifs aux « energy mix » ainsi qu'aux technologies de chauffage et refroidissement.

Pour la plupart d'entre elles, les valeurs proviennent de la base de données EcoInvent 2.0.

La base de données EcoInvent a été utilisée dans de nombreuses études d'ACV de bâtiments [9]. Il s'agit de la base de données la plus vaste et la plus complète à ce jour [45]. Elle contient les inventaires d'émissions et de ressources de plus de 4000 procédés industriels, services et produits [9]. De plus, elle est régulièrement mise à jour [45]. Enfin, ses données étant représentatives pour toute l'Europe occidentale ([45]) – incluant la Belgique pour notre cas – il semble tout à fait naturel que ce soit cette base de données qu'AM ait décidé d'utiliser pour son outil d'ACV.

Les valeurs de GWP et CED de la base de données EcoInvent prennent en compte les phases de production et de fin de vie du matériau.

La phase de production inclut les processus suivants :

- extraction des matières premières
- le transport du site d'extraction jusqu'à l'usine de fabrication des matériaux
- la fabrication des matériaux de construction
- le transport des matériaux de l'usine aux différents distributeurs

En se référant aux frontières du système (que nous avons établies lors de l'introduction de ce travail), tous les processus de la phase de production sont donc pris en compte dans les valeurs d'EcoInvent.

En ce qui concerne la phase de fin de vie, les données d'EcoInvent ne tiennent compte que du traitement des matériaux.

Or, si on se réfère aux frontières du système, nous devons également tenir compte, dans nos ACV, du transport des matériaux du site de construction jusqu'au centre relatif à la fin de vie du matériau.

Ainsi, nous allons devoir ajouter manuellement ce transport. La méthode relative à cet ajout sera présentée plus loin dans ce travail.

Concernant la fin de vie en elle-même, EcoInvent propose 3 types de scénarios :

- A : material to recycling (recyclage)
- B : material to sorting plant (centre de tri)
- C : material to final disposal (élimination finale): incineration (incinération) and landfill (mise en décharge)

Celui que l'on rencontre le plus pour les matériaux du datapool est le scénario C (cf. Annexe I).

Notons à ce sujet que le fait d'utiliser le scénario C de fin de vie pour presque tous les matériaux semble ne pas être très réaliste. En effet, d'une part, certains matériaux (autres que l'acier) résultant de la démolition de l'habitation sont recyclables (le verre par exemple). Et d'autre part, l'Arrêté du Gouvernement wallon adopté en 2004<sup>22</sup> ([46]) interdit la mise en centre d'enfouissement technique de certains déchets, et notamment des matériaux inertes dont fait partie le béton.

Nous n'allons pas dans ce travail modifier ces incohérences concernant les fins de vie des différents matériaux (nous allons considérer les valeurs telles qu'elles nous sont fournies par EcoInvent), mais cela pourrait faire l'objet d'un travail ultérieur.

Pour les matériaux acier, les valeurs du datapool ne proviennent pas d'EcoInvent, mais bien de WorldSteel Association, qui fournit des valeurs pour la production et la fin de vie.

---

<sup>22</sup> Cet arrêté transpose partiellement la directive 1999/31/CE du Conseil Européen du 26 avril 1999 concernant la mise en décharge des déchets.

Le scénario de fin de vie lié à l'acier est bien entendu le recyclage. Ainsi, lors de la production de l'acier, on remplace une partie des matières premières par de la ferraille, récupérée au niveau de la fin de vie de divers produits acier. L'utilisation de cette ferraille induit un avantage du point de vue environnemental, ce qui se marque au niveau de la valeur des indicateurs de l'inventaire du cycle de vie.

Cela n'étant pas l'objet de ce travail, nous n'expliquerons pas ici la méthode de détermination de ces indicateurs. Pour plus d'informations à ce sujet, se référer à WorldSteel Association.

La seule chose que nous mentionnerons concernant cette méthode est ses 2 grands principes :

- elle dépend du facteur *RR* (Recycling Rate) considéré : le *RR* de l'acier est le pourcentage d'acier que l'on retrouve à la fin de la vie du bâtiment. Dans notre cas, il est égal à 95 % pour tous les types d'acier (Steel Hot Dip Galvanised, Organic Coated) sauf pour l'acier des armatures (Rebars) pour lequel le *RR* est de 65 % et ce pour tenir compte du fait que les armatures sont coulées dans le béton et donc plus difficilement « récupérables ».
- ses données sont des moyennes mondiales ou européennes.

Ainsi, il n'y a pas réellement de valeurs de GWP et CED pour la fin de vie de l'acier : les « crédits » relatifs au recyclage sont directement inclus dans les valeurs liées à la phase de production.

Concernant le transport du site de construction jusqu'au centre de recyclage, nous allons faire l'hypothèse qu'il n'est pas pris en compte dans les valeurs fournies par WorldSteel. Ainsi, nous devons également l'ajouter manuellement.

Notons que dans le cas où l'utilisateur aurait ajouté de nouveaux matériaux à la librairie de Pleiades, il se doit également d'ajouter ces matériaux au datapool, en fournissant pour eux les diverses informations demandées (unité de référence, GWP et CED par unité de référence et durée de vie), en faisant bien attention aux frontières des valeurs qu'il insère.

Dans notre cas, les matériaux que nous avons ajoutés sont le panneau Trespa, la bauge, les différentes lames d'air ainsi que le « Steel (HDG) interior ». Pour chacun d'eux, nous devons donc fournir leur GWP et CED (relatifs aux phases de production et de fin de vie), ainsi que leur durée de vie.

Pour les lames d'air, il va sans dire que leurs GWP et CED valent 0.

Pour le panneau Trespa, nous avons utilisé le logiciel Bees ([47]) pour déterminer ses GWP et CED.

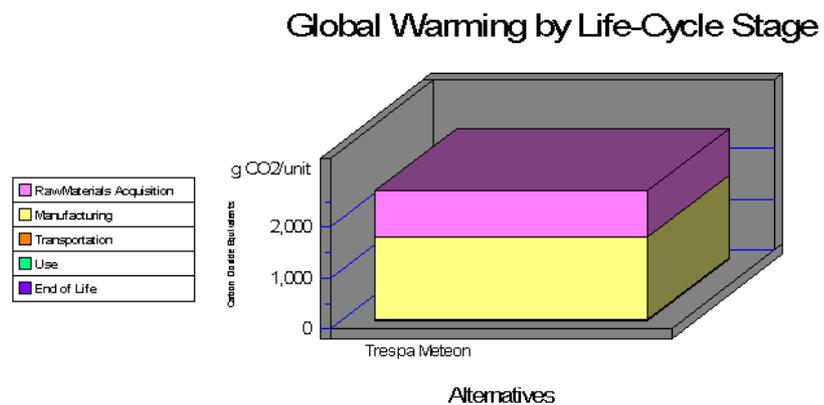
L'étude de Bees concernant les panneaux Trespa est relative à des panneaux de 10 mm d'épaisseur (comme ceux placés dans notre cas).

L'unité de référence de Bees concernant les panneaux Trespa est  $1 \text{ ft}^2 = 0,09 \text{ m}^2$ .

Les valeurs de GWP et CED de Bees sont données par processus :

- raw materials acquisition with transport of raw materials from the supplier to the manufacturer (data provided by Trespa)
- manufacturing
- transportation of Trespa panels by ship from the production facility in The Netherlands to a U.S. port (Bees est un logiciel américain)
- use : Trespa panels are assumed to have a lifetime of 50 years
- end of life : about 50 % of the waste is reused in other products, while the remaining 50 % is sent to a landfill

Voici les résultats concernant le GWP :



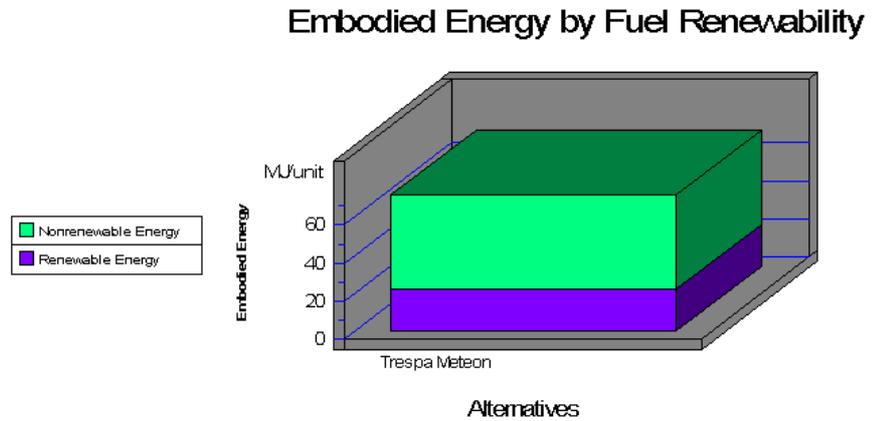
Note: Lower values are better

Category	Meteor
1. Raw Materials	909
2. Manufacturing	1623
3. Transportation	39
4. Use	0
5. End of Life	0
<b>Sum</b>	<b>2571</b>

Figure 78 : Résultats de Bees pour le GWP relatif au panneau Trespa (source : [47])

Dans notre cas, nous n'allons pas utiliser la valeur de « transportation », celle-ci ne correspondant pas du tout à ce que nous aurions en réalité (distance considérée jusqu'aux Etats-Unis et pas jusqu'en Belgique). De nouveau, nous ajouterons donc le transport manuellement.

Concernant le CED, voici les résultats fournis par Bees :



**Figure 79 : Résultats de Bees pour le CED relatif au panneau Trespa (source : [44])**

Finalement, voici les valeurs de GWP et CED que nous allons utiliser pour le panneau Trespa (en convertissant les valeurs obtenues par Bees pour se rapporter à la bonne unité de référence) :

- unité de référence :  $m^3$
- GWP :  $2813 \text{ kg } CO_2 \text{ eq}/m^3$
- CED :  $79556 \text{ MJ eq}/m^3$

Pour le matériau bauge, nous avons, comme pour ses propriétés physiques (cf. Annexe C), utilisé la base de données du logiciel COCON ([48]) pour déterminer ses GWP et CED :

- unité de référence :  $m^3$
- GWP :  $33 \text{ kg } CO_2 \text{ eq}/m^3$
- CED :  $110 \text{ kWh}/m^3 = 396 \text{ MJ eq}/m^3$

De plus, nous avons considéré une durée de vie de 100 ans pour la bauge, toujours selon COCON.

N'ayant pas d'information concernant le scénario de fin de vie associé à la bauge, nous avons fait l'hypothèse que celui-ci correspondait au scénario C de EcoInvent.

Il est à noter que les valeurs de GWP et CED fournies par COCON prennent en compte la production (extraction, fabrication et transport interne) et la fin de vie du matériau. Comme pour les autres bases de données, nous considérons que nous devons ajouter à ces valeurs celles relatives au transport du site de construction aux différents centres de fin de vie.

Enfin, pour le matériau « Steel (HDG) interior », ses valeurs de GWP et CED sont de nouveau les mêmes que celles correspondant à son usage en extérieur, mais au niveau de sa durée de vie, la valeur sera différente. En effet, le matériau étant nettement moins sollicité par son environnement, sa durée de vie va passer de 50 ans à 100 ans, évitant ainsi le remplacement du matériau au cours de la vie du bâtiment (pour rappel, durée de vie de 80 ans).

Notons à ce sujet qu'il aurait paru très invraisemblable de devoir remplacer tous les éléments faits dans ce matériau. En effet, cela concernant toute la structure portante de la maison, il aurait fallu la remplacer entièrement après 50 ans, ce qui semble tout à fait irréalisable, cela ne pouvant entraîner que la destruction pure et simple de l'habitation.

Une remarque supplémentaire est à apporter concernant la phase d'utilisation du bâtiment. En effet, aucune des bases de données utilisées ne semble prendre en compte cette phase. Cela n'est pas vrai. Elles en tiennent toutes compte implicitement, en fournissant une durée de vie aux différents matériaux. Par contre, le transport des différents distributeurs de matériaux au site de construction n'est jamais inclus !! Il faudra donc le rajouter manuellement lui aussi.

- Calcul de la consommation d'électricité

Grâce à un wattmètre, nous avons pu mesurer la puissance instantanée consommée (en  $W$ ) par tous les appareils électriques qui seront susceptibles d'être installés dans la maison étudiée. Ces mesures ont, bien entendu, été réalisées dans une habitation existante.

Notons cependant que pour certains appareils, il nous a été impossible d'en faire la mesure, ceux-ci étant encastrés dans le mobilier. Nous en avons cependant tenu compte dans nos calculs en considérant la valeur théorique donnée sur la fiche signalétique de ces appareils. Parmi ceux-ci, on retrouve : le frigo/congélateur, le micro ondes, le four, les taques électriques, la hotte et le lave-vaisselle. Plus loin dans ce travail se trouve la liste de tous les appareils mesurés avec leur puissance consommée respective.

Pour chacun de ces appareils, nous avons mesuré leur puissance instantanée consommée non seulement lorsqu'ils étaient en fonctionnement, mais également lorsqu'ils étaient à l'arrêt car, comme vous le verrez dans le tableau, certains appareils consomment de l'électricité même lorsqu'ils sont éteints. De plus, pour les appareils possédant la fonction, nous avons également fait la mesure lorsqu'ils étaient en mode « veille ».

Il est à noter que certains appareils n'ont pas une puissance instantanée consommée constante au cours de leur utilisation. Cela concerne pour la plupart les appareils requérant un chauffage ou un refroidissement d'eau, comme la machine à laver, la machine à café ou encore le frigo. Nous avons donc également considéré, pour ces appareils, des puissances consommées différentes en fonction des diverses phases de leur utilisation. Cependant, pour rappel, nous avons utilisé la valeur théorique donnée pour le frigo/congélateur, qui est une valeur unique. Nous avons donc considéré que cette valeur était une valeur de puissance instantanée moyenne.

Une remarque particulière est à apporter concernant la machine à laver. En effet, en plus de ses variations de puissance consommée durant ses différentes phases d'utilisation, nous observons également des variations en fonction de son utilisation elle-même ; comprenez par là ses divers programmes de lavage à différentes températures. A ce niveau, nous avons fait une simplification, et considéré (pour chaque phase de l'utilisation) une valeur moyenne de puissance instantanée pour tous les programmes.

Une fois les puissances instantanées consommées par les différents appareils obtenues par mesure, nous déterminons leur consommation (en *kWh*) en considérant pour chacun d'eux une durée d'utilisation, et ce sur toute l'année afin d'obtenir la consommation annuelle.

Pour déterminer la consommation annuelle d'un appareil, nous avons procédé comme suit :

$$\begin{aligned} & \textit{consommation annuelle de l'appareil X [kWh]} \\ & = \textit{puissance instantanée consommée par X} \\ & * \textit{temps d'utilisation en heures/jour de X} \\ & * \textit{nombre de jours/semaine d'utilisation de X} \\ & * \textit{nombre de semaines/an d'utilisation de X} \end{aligned}$$

Remarque : si l'appareil a une consommation non nulle lorsqu'il est éteint (ou en veille) et/ou une consommation qui varie en fonction de sa phase d'utilisation, cette formule est légèrement différente : on a alors une somme de consommations partielles relatives aux différentes phases et à l'état d'utilisation de l'appareil.

Le nombre de jours d'utilisation de l'appareil par semaine intervient dans le calcul pour tenir compte du fait que certains appareils (comme le fer à repasser par exemple) ne sont utilisés qu'une fois par semaine tandis que d'autres (comme le lave-vaisselle par exemple) sont utilisés 7j/7. De même, il intervient également pour prendre en compte l'utilisation différente de certains appareils (comme la télé) en fonction des jours de la semaine (week-end ou non).

De plus, certains appareils étant utilisés différemment en fonction des saisons (comme les lampes par exemple), le nombre de semaines d'utilisation de l'appareil par an intervient également dans le calcul.

En ce qui concerne les temps d'utilisation de chaque appareil, ceux-ci sont des estimations des temps d'utilisation réels. Elles vont donc elles aussi introduire des erreurs dans la valeur finale de consommation annuelle totale.

Le Tableau 55 de l'Annexe I (page 207) présente la liste de tous les appareils considérés dans la maison et leur consommation respective (avec les temps d'utilisation par jour, par semaine et par an).

Finalement, nous trouvons que la consommation électrique annuelle est de 4 722.35 *kWh*, soit un peu plus de 4 700 *kWh*. Ce résultat est tout à fait cohérent avec les consommations électriques annuelles que l'on préconise habituellement pour une famille de 4 personnes en Belgique, qui sont de l'ordre de 4 500 – 5 000 *kWh*.

## VI. TRANSPORT

Comme nous l'avons précisé lors de la détermination des frontières de l'ACV, nous allons tenir compte du transport dans l'analyse de cycle de vie des 6 cas de bâtiment.

Au cours du cycle de vie du bâtiment, plusieurs transports interviennent :

- le transport du site d'extraction jusqu'à l'usine de fabrication des matériaux
- le transport des matériaux de l'usine aux différents distributeurs
- le transport des différents distributeurs de matériaux jusqu'au site de construction
- le transport du site de construction jusqu'aux centres relatifs à la fin de vie des matériaux

Comme spécifié au point précédent, les 2 premiers transports sont pris en compte dans les valeurs de GWP et CED correspondant à la phase de production et fournies par le datapool (et donc par les différentes bases de données considérées – EcolInvent, WorldSteel, Bees et Cocon).

Les 2 derniers transports, par contre, ne sont jamais pris en compte dans les valeurs utilisées.

Ainsi, pour respecter les frontières du système, nous devons calculer manuellement ces transports, et ajouter les résultats obtenus à ceux fournis par Building Ecodesign Tool (dans la feuille « Results – Whole life-span » du template).

Nous devons donc déterminer les GWP et le CED relatifs à ces 2 transports. Pour cela, nous allons nous baser sur le tableau suivant, qui fournit le GWP et le CED relatifs au transport de 1 *tonne.km*, soit par camion, soit par bateau, soit par train. Ces données proviennent de EcolInvent.

	<b>Train</b>	<b>Ship</b>	<b>Road</b>
<b>GWP [<i>kg CO<sub>2</sub> eq</i>]</b>	0.0393	0.00562	0.154
<b>CED [<i>MJ eq</i>]</b>	0.75102	0.09029	2.6123

Tableau 12 : GWP et CED du transport de 1 *tonne.km*

Notons que pour les 2 transports que nous devons évaluer, nous allons faire l'hypothèse que cela se fait uniquement par camion.

Ainsi, nous devons déterminer à la fois sur quelle distance les matériaux vont être transportés, mais également le poids de ces matériaux.

Ce dernier peut être très facilement obtenu, vu que l'on connaît les quantités utilisées de chaque matériau – quantités que l'on retrouve dans le template de fichier Excel, exprimées en leur unité de référence.

Concernant la distance de transport, voici comment nous allons la déterminer :

- le transport des différents distributeurs de matériaux jusqu'au site de construction :  
Nous faisons l'hypothèse que tous les distributeurs de matériaux d'où proviennent ceux relatifs à la construction de notre maison se trouvent dans un rayon de *75 km* par rapport au site de construction.

- le transport du site de construction jusqu'aux centres relatifs à la fin de vie des matériaux :

Pour rappel, nous avons 2 scénarios de fin de vie : le recyclage pour l'acier, et l'élimination finale pour tous les autres matériaux ; l'élimination finale peut être soit l'incinération soit la mise en décharge. Nous avons donc 3 types de « centres de fin de vie » à considérer.

Pour chacun de ces types, nous devons déterminer le centre (en Belgique) qui se situe le plus près du site de construction de la maison, et déterminer la distance les séparant :

- centre de mise en décharge : le C.E.T.<sup>23</sup> le plus proche de Chênée (site de construction) est celui d'Hallembaye, dans la commune de Haccourt. Il se situe à *20 km* de distance de Chênée
- centre d'incinération : le plus proche se situe dans la commune de Herstal, à *10 km*  
→ la distance considérée pour le scénario d'élimination finale est une moyenne de ces 2 distances, à savoir *15 km*
- centre de recyclage de l'acier : l'acier arrivé en fin de vie sert de ferraille pour la fabrication de nouvel acier dans les aciéries ; l'aciérie la plus proche de Chênée est celle de Chertal (Herstal), à *11 km*

Connaissant les distances, il ne suffira plus qu'à déterminer quel est le poids total de matériaux – ainsi que la répartition de ce poids entre les 2 scénarios de fin de vie. Pour chaque alternative de la maison étudiée, cela est fait au point suivant.

---

<sup>23</sup> Centre d'Enfouissement Technique

## VII. RÉSULTATS GLOBAUX

La réglementation PEB permet de déterminer quelles épaisseurs d'isolant doivent être mises en place dans les différentes parois « extérieures » du bâtiment.

Comme dit précédemment, au niveau de la dalle de sol, nous avons « fixé » l'épaisseur d'isolant mise en place, et ce pour tous les cas de bâtiment étudiés. Cette isolation est réalisée avec 5 cm de polyuréthane.

Par contre, au niveau du mur extérieur et de la toiture, les épaisseurs d'isolant vont varier d'un cas à l'autre. Elles seront telles que les exigences de la réglementation PEB seront toutes vérifiées, et nous allons essayer de les optimiser : faire en sorte que la quantité totale d'isolant mise en place soit la plus petite possible, pour minimiser les coûts.

Une fois ces différentes épaisseurs définies pour les différents cas, nous pouvons à la fois obtenir les résultats finaux de Building Ecodesign Tool, et déterminer les impacts relatifs aux transports que nous devons calculer manuellement.

Dans cette partie, nous allons exposer tous ces résultats pour les différentes alternatives de bâtiments étudiées.

### VII.1. Maison acier peau trespa

#### VII.1.1. PEB

Dans ce cas-ci, la classe de masse thermique de la maison est « peu-lourd ». En effet, sur base du Tableau 5 et des surfaces des différentes parois – qui proviennent du métré fourni par Pleiades que l'on retrouve à l'Annexe H – on trouve que :

- 54 % des éléments horizontaux sont massiques
- 4 % des éléments verticaux/inclinés sont massiques

Ainsi, en se référant à la Figure 69, le bâtiment est peu-lourd.

Ayant déterminé cela, nous pouvons obtenir les épaisseurs d'isolant du mur extérieur et de la toiture. Nous trouvons :

- mur extérieur : 8 cm d'isolant externe en polystyrène expansé en plus des 14 cm d'isolant interne en laine de bois ; cela donne un coefficient de transmission thermique (déterminé avec le logiciel Therm) de :

$$U = 0,2134 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

- toiture : 6 cm d'isolant externe en polystyrène expansé en plus des 20 cm d'isolant interne en laine de bois ; cela donne un coefficient de transmission thermique (déterminé avec le logiciel Therm) de :

$$U = 0,1775 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

Remarque : mettre de l'isolation externe au niveau de la toiture nous permet d'éviter d'avoir une épaisseur trop importante au niveau du mur extérieur.

Ainsi, toutes les exigences de la PEB sont respectées, comme nous pouvons le constater grâce à la figure suivante :

Nature des travaux: Bâtiment neuf et assimilé  
 Volume protégé : 316,80 m<sup>3</sup>

**Volume "vk2"**

**Unité PEB "maison"**

Destination de l'unité PEB : Résidentielle  
 Surface utile totale : 89,33 m<sup>2</sup>  
 Surface totale de plancher chauffé (Ach) : 115,20 m<sup>2</sup>  
 Exigences à respecter au niveau de l'unité PEB :

U <sub>max</sub> / R <sub>min</sub>	Niveau K	Niveau E <sub>w</sub>	E <sub>spec</sub>	Ventilation	Surchauffe
✔	✔ 33.0	✔ 83.0	✔ 169.6	✔	✔

Figure 80 : Résumé des exigences pour le bâtiment étudié (source : [35])

Le logiciel PEB fournit les informations suivantes concernant les consommations :

- consommation d'énergie primaire pour le chauffage : 45 163,34 MJ pour obtenir la consommation en énergie finale, il suffit de diviser la consommation en énergie primaire par le facteur de conversion de l'électricité – en Belgique, celui-ci est de 2,5<sup>24</sup> :

$$\frac{45\,163,34}{2,5} * \frac{1}{3,6} = 5018,15 \text{ kWh} \rightarrow \frac{5018,15}{115,2} \approx 45 \text{ kWh/m}^2/\text{an pour le chauffage}$$

Sachant qu'un mètre cube de gaz en Wallonie équivaut environ à 11,5 kWh (entre 11,1 et 11,9 kWh) pour le gaz « H » (celui distribué à Liège, cf. Figure 70), le chauffage de toute la maison durant une année entière nécessitera une quantité de gaz naturel d'environ 440 m<sup>3</sup>.

- consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire (chauffage + eau chaude sanitaire + auxiliaires) : 70 371,23 MJ
- consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par mètre de plancher chauffé (Ach) :

$$\frac{70\,371,23}{115,2} = 610,86 \text{ MJ/m}^2 = 169,68 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$$

<sup>24</sup> En d'autres termes, cela signifie que pour fournir 1 kWh d'énergie électrique (finale), le secteur électrique consomme environ 2,5 kWh d'énergie primaire. Cette valeur de 2,5 a été tirée de la réglementation PEB – en réalité, il s'agit de la valeur fournie par défaut dans la directive 2006/32/CE.

### VII.1.2. Résultats ACV

Les compositions de parois étant finalement déterminées, nous pouvons les implémenter dans Building Ecodesign Tool, et faire tourner l'outil.

A l'annexe K, vous trouverez les 3 compositions ainsi que la multi-composition de toutes les parois.

Vous remarquerez dans ces compositions que nous avons bien, pour certains matériaux, une épaisseur équivalente au lieu de la valeur réelle (cf. V.2.2).

Avant de présenter les résultats obtenus, nous devons faire une remarque importante. Nous avons décidé, afin de tenir compte des pertes de matériaux qui pourraient éventuellement survenir lors du montage du bâtiment, de légèrement modifier les résultats obtenus : en considérant une perte de 5 %, nous allons multiplier tous les résultats par « 1,05 ».

Voici les résultats obtenus :

- Inventaire :

Le tableau suivant résume toutes les quantités de matériaux utilisés dans le bâtiment :

Nom du matériau	Density (kg/m3) or surface of glazing (m2)	Reference unit	Amount (unit)
Porte bois intérieure	1	m2	9.45
Porte bois isolante performante	1	m2	2.25
Fen bat bois DV CLIMAPLUS N 6.12.6	1	m2	20.185
Polystyrène expansé	25	kg	369.341424
Béton lourd	2300	m3	11.734
Bois lourd	650	m3	2.48110258
Polyuréthane	35	kg	102.6725
Ardoise	2700	kg	1498.5117
Carrelage	2300	kg	1196.92
Mortier	2000	kg	4163.2
Panneau OSB	650	m3	5.70374275
Laine de bois	140	kg	5253.44066
Steel (Hot Dip Galvanised)	7850	kg	367.172296
Bauge	1800	m3	3.6288
Steel (Rebars)	7850	kg	736.8952
Steel (Hot Dip Galvanised) interior	7850	kg	4035.19028
Placoplatre BA 13	850	kg	7262.53431
Panneaux trespa	1400	m3	1.32639056

Tableau 13 : Inventaire pour la maison acier/trespa

- Evaluation des impacts environnementaux :

Pour rappel, les 2 impacts que nous analysons sont le GWP et le CED.

- Phases de production et de fin de vie :

Pour rappel, la phase de production inclut l'extraction des matériaux, les procédés de fabrication, et le transport interne.

	<b>GWP [<i>kg CO<sub>2</sub> eq</i>]</b>	<b>CED [<i>MJ eq</i>]</b>
<b>Impacts pour la phase de production</b>	38 516,49	763 143,53
<b>Impacts pour la phase de fin de vie</b>	4 760,47	31 797,65
<b>Impacts pour les 2 phases</b>	43 276,96	794 941,18

**Tableau 14 : Impacts liés aux phases de production et de fin de vie pour la maison acier/trespa**

- Phase d'utilisation

Pour rappel, la phase d'utilisation inclut les consommations liées au chauffage et au fonctionnement des équipements électriques. Comme mentionné dans l'introduction de ce travail, nous allons considérer que ces consommations sont constantes sur toute la durée de vie du bâtiment.

Le résultat fourni par Capsol concernant la demande de chauffage de l'habitation est le suivant :

$$\text{consommation annuelle} = 74,35 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$$

Et donc :

	<b>GWP [<i>kg CO<sub>2</sub> eq</i>]</b>	<b>CED [<i>MJ eq</i>]</b>
<b>Impacts pour 1 an</b>	2 216,28	37 618,61
<b>Impacts pour 80 ans</b>	177 302,68	3 009 489,16

**Tableau 15 : Impacts liés au chauffage pour la maison acier/trespa**

Concernant la demande en électricité, nous l'avons calculée précédemment dans ce travail ; celle-ci vaut :

$$\text{consommation électrique} = 4722,35 \text{ kWh/an}$$

Et donc :

	<b>GWP [<i>kg CO<sub>2</sub> eq</i>]</b>	<b>CED [<i>MJ eq</i>]</b>
<b>Impacts pour 1 an</b>	1 730,32	58 982,12
<b>Impacts pour 80 ans</b>	138 425,60	4 718 569,92

**Tableau 16 : Impacts liés au fonctionnement des équipements électriques pour la maison acier/trespa**

– Transports

Voici les quantités de matériaux qui doivent être transportées, à la fois au moment de la construction de la maison et au moment de la démolition :

- poids total de matériaux à transporter (transport des distributeurs au site de construction) : 109 310,27 kg  $\approx$  110 tonnes
- partie du poids total correspondant aux matériaux dont la fin de vie est le scénario C (transport jusqu'au C.E.T ou jusqu'à l'incinérateur) : 103 822,13 kg
- partie du poids total correspondant aux matériaux dont la fin de vie est le recyclage (éléments acier, avec transport jusqu'à l'aciérie) : 5 488,14 kg

Ainsi, nous trouvons les impacts liés aux transports :

	<b>GWP [<i>kg CO<sub>2</sub> eq</i>]</b>	<b>CED [<i>MJ eq</i>]</b>
<b>Transport construction</b>	1 262,53	21 416,34
<b>Transport fin de vie</b>	254,46	4 316,33
<b>TOTAL</b>	1 516,99	25 732,67

Tableau 17 : Impacts liés aux transports pour la maison acier/trespa

Nous remarquons que les impacts liés au transport en fin de vie sont nettement plus petits que ceux liés au transport lors de la construction. C'est tout à fait normal, vu que la distance considérée est beaucoup plus petite (15 km vs 75 km).

Au total, nous avons donc :

	<b>GWP [<i>kg CO<sub>2</sub> eq</i>]</b>	<b>CED [<i>MJ eq</i>]</b>
<b>TOTAL (production+fin de vie+transport+utilisation)</b>	360 522,23	8 548 732,93

Tableau 18 : Impacts totaux pour la maison acier/trespa

## VII.2. Maison acier peau acier

### VII.2.1. PEB

Dans ce cas-ci, la classe de masse thermique de la maison est également « peu-lourd », les pourcentages d'éléments massiques horizontaux et verticaux/inclinés étant les mêmes que ceux de la maison acier/trespa (le fait de changer le revêtement de façade n'augmente pas la massivité du mur extérieur).

Les épaisseurs d'isolant du mur extérieur et de la toiture sont les mêmes que celles du cas précédent, à savoir :

- o mur extérieur : 8 cm d'isolant externe en polystyrène expansé en plus des 14 cm d'isolant interne en laine de bois ; cela donne un coefficient de transmission thermique pour la paroi (déterminé avec le logiciel Therm) de :

$$U = 0,2148 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

- o toiture : 6 cm d'isolant externe en polystyrène expansé en plus des 20 cm d'isolant interne en laine de bois ; cela donne un coefficient de transmission thermique (déterminé avec le logiciel Therm) de :

$$U = 0,1775 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

Concernant les consommations, celles-ci sont quasiment identiques à celles obtenues pour le cas maison acier/trespa. Cela est tout à fait normal vu que certaines des exigences de la PEB portent sur les valeurs des consommations. Nous n'allons donc pas les remettre ici.

#### VII.2.2. Résultats ACV

Dans le cas de la maison acier/acier, voici les résultats obtenus :

- Inventaire :

Le tableau suivant résume toutes les quantités de matériaux utilisés dans le bâtiment :

Nom du matériau	Density (kg/m3) or surface of glazing (m2)	Reference unit	Amount (unit)
Porte bois intérieure	1	m2	9.45
Porte bois isolante performante	1	m2	2.25
Fen bat bois DV CLIMAPLUS N 6.12.6	1	m2	20.185
Polystyrène expansé	25	kg	369.339901
Béton lourd	2300	m3	11.734
Bois lourd	650	m3	1.28735108
Polyuréthane	35	kg	102.6725
Ardoise	2700	kg	1498.5117
Carrelage	2300	kg	1196.92
Mortier	2000	kg	4163.2
Panneau OSB	650	m3	5.70372905
Laine de bois	140	kg	5253.42574
Steel (Hot Deep Galvanised)	7850	kg	367.185713
Bauge	1800	m3	3.6288
Steel (Organic coated)	7850	kg	2603.02653
Steel (Rebars)	7850	kg	736.8952
Steel (Hot Deep Galvanised) interior	7850	kg	4219.4737
Placoplatre BA 13	850	kg	7262.67699

Tableau 19 : Inventaire pour la maison acier/acier

- Evaluation des impacts environnementaux :

- Phases de production et de fin de vie :

	<b>GWP [<i>kg CO<sub>2</sub> eq</i>]</b>	<b>CED [<i>MJ eq</i>]</b>
<b>Impacts pour la phase de production</b>	35 242,91	642 516,33
<b>Impacts pour la phase de fin de vie</b>	4 355,86	26 771,51
<b>Impacts pour les 2 phases</b>	39 598,77	669 287,84

Tableau 20 : Impacts liés aux phases de production et de fin de vie pour la maison acier/acier

- Phase d'utilisation

Le résultat fourni par Capsol concernant la demande de chauffage de l'habitation est le suivant :

$$\text{consommation annuelle} = 74,72 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$$

Et donc :

	<b>GWP [<i>kg CO<sub>2</sub> eq</i>]</b>	<b>CED [<i>MJ eq</i>]</b>
<b>Impacts pour 1 an</b>	2 227,42	37 807,65
<b>Impacts pour 80 ans</b>	178 193,65	3 024 612,25

Tableau 21 : Impacts liés au chauffage pour la maison acier/acier

La demande en électricité est la même pour tous les cas, à savoir :

$$\text{consommation électrique} = 4722,35 \text{ kWh/an}$$

Et donc :

	<b>GWP [<i>kg CO<sub>2</sub> eq</i>]</b>	<b>CED [<i>MJ eq</i>]</b>
<b>Impacts pour 1 an</b>	1 730,32	58 982,12
<b>Impacts pour 80 ans</b>	138 425,60	4 718 569,92

Tableau 22 : Impacts liés au fonctionnement des équipements électriques pour la maison acier/acier

– Transports

Voici les quantités de matériaux qui doivent être transportées, à la fois au moment de la construction de la maison et au moment de la démolition :

- poids total de matériaux à transporter (transport des distributeurs au site de construction) : 110 111,25 kg  $\approx$  110 tonnes
- partie du poids total correspondant aux matériaux dont la fin de vie est le scénario C (transport jusqu'au C.E.T ou jusqu'à l'incinérateur) : 99 422 kg
- partie du poids total correspondant aux matériaux dont la fin de vie est le recyclage (éléments acier, avec transport jusqu'à l'aciérie) : 10 689,25 kg

Remarquons que la part des éléments recyclés est plus importante dans ce cas que dans le premier (5 % vs 10 %). C'est normal vu que ce qui change d'un cas à l'autre, c'est le revêtement de façade qui, dans ce cas-ci, est recyclable (acier) alors qu'il ne l'était pas dans le cas de la maison trespas (élimination finale).

Ainsi, nous trouvons les impacts liés aux transports :

	<b>GWP [kg CO<sub>2</sub> eq]</b>	<b>CED [MJ eq]</b>
<b>Transport construction</b>	1 271,78	21 573,27
<b>Transport fin de vie</b>	252,88	4 289,53
<b>TOTAL</b>	1 524,66	25 862,8

Tableau 23 : Impacts liés aux transports pour la maison acier/acier

Au total, nous avons donc :

	<b>GWP [kg CO<sub>2</sub> eq]</b>	<b>CED [MJ eq]</b>
<b>TOTAL (production+fin de vie+transport+utilisation)</b>	357 742,68	8 438 332,81

Tableau 24 : Impacts totaux pour la maison acier/acier

### VII.3. Maison acier peau brique

#### VII.3.1. PEB

Dans ce cas-ci, la classe de masse thermique de la maison est toujours « peu-lourd », et les épaisseurs d'isolant du mur extérieur et de la toiture sont :

- mur extérieur : 8 cm d'isolant externe en polystyrène expansé en plus des 14 cm d'isolant interne en laine de bois ; cela donne un coefficient de transmission thermique pour la paroi (déterminé avec le logiciel Therm) de :

$$U = 0,2128 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

- o toiture : 5 cm d'isolant externe en polystyrène expansé en plus des 20 cm d'isolant interne en laine de bois ; cela donne un coefficient de transmission thermique (déterminé avec le logiciel Therm) de :

$$U = 0,1865 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

Nous remarquons donc que dans ce cas, nous pouvons diminuer l'épaisseur d'isolant externe au niveau de la toiture de 1 cm par rapport aux autres cas précédemment étudiés. Cela s'explique par le fait que le  $U$  du mur extérieur avec parement brique est plus petit que celui des 2 autres parements (trespa et acier).

### VII.3.2. Résultats ACV

Dans le cas de la maison acier/brique, voici les résultats obtenus :

- Inventaire :

Le tableau suivant résume toutes les quantités de matériaux utilisés dans le bâtiment :

Nom du matériau	Density (kg/m3) or surface of glazing (m2)	Reference unit	Amount (unit)
Porte bois intérieure	1	m2	9.45
Porte bois isolante performante	1	m2	2.25
Fen bat bois DV CLIMAPLUS N 6.12.6	1	m2	20.185
Polystyrène expansé	25	kg	352.006545
Béton lourd	2300	m3	11.734
Bois lourd	650	m3	1.28735033
Polyuréthane	35	kg	102.6725
Ardoise	2700	kg	1498.50357
Carrelage	2300	kg	1196.92
Mortier	2000	kg	4163.2
Panneau OSB	650	m3	5.70382128
Laine de bois	140	kg	5253.523
Steel (Hot Deep Galvanised)	7850	kg	367.18375
Bauge	1800	m3	3.6288
Steel (Rebars)	7850	kg	736.8952
Steel (Hot Deep Galvanised) interior	7850	kg	4166.99841
Placoplatre BA 13	850	kg	7262.71151
Brique pleine de 5.5 cm	1700	kg	12402.1948

Tableau 25 : Inventaire pour la maison acier/brique

- Evaluation des impacts environnementaux :

- Phases de production et de fin de vie :

	<b>GWP [kg CO<sub>2</sub> eq]</b>	<b>CED [MJ eq]</b>
<b>Impacts pour la phase de production</b>	32 957,76	575 160,55
<b>Impacts pour la phase de fin de vie</b>	4 073,43	23 965,02
<b>Impacts pour les 2 phases</b>	37 031,19	599 125,57

Tableau 26 : Impacts liés aux phases de production et de fin de vie pour la maison acier/brique

- Phase d'utilisation

Le résultat fourni par Capsol concernant la demande de chauffage de l'habitation est le suivant :

$$\text{consommation annuelle} = 74,86 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$$

Et donc :

	<b>GWP [kg CO<sub>2</sub> eq]</b>	<b>CED [MJ eq]</b>
<b>Impacts pour 1 an</b>	2 231,5	37 876,9
<b>Impacts pour 80 ans</b>	178 520,04	3 030 152,22

Tableau 27 : Impacts liés au chauffage pour la maison acier/brique

La demande en électricité est la même pour tous les cas, à savoir :

$$\text{consommation électrique} = 4722,35 \text{ kWh/an}$$

Et donc :

	<b>GWP [kg CO<sub>2</sub> eq]</b>	<b>CED [MJ eq]</b>
<b>Impacts pour 1 an</b>	1 730,32	58 982,12
<b>Impacts pour 80 ans</b>	138 425,60	4 718 569,92

Tableau 28 : Impacts liés au fonctionnement des équipements électriques pour la maison acier/brique

– Transports

Voici les quantités de matériaux qui doivent être transportées, à la fois au moment de la construction de la maison et au moment de la démolition :

- poids total de matériaux à transporter (transport des distributeurs au site de construction) : 117 518,77 kg  $\approx$  120 tonnes  
Ce poids est plus important dans ce cas-ci que dans les cas précédemment étudiés ; cela s'explique par le fait que le revêtement de façade dans ce cas-ci est beaucoup plus lourd (brique vs trespas vs acier).
- partie du poids total correspondant aux matériaux dont la fin de vie est le scénario C (transport jusqu'au C.E.T ou jusqu'à l'incinérateur) : 112 030,63 kg
- partie du poids total correspondant aux matériaux dont la fin de vie est le recyclage (éléments acier, avec transport jusqu'à l'aciérie) : 5 488,14 kg

De nouveau dans ce cas-ci, la part des éléments recyclés est d'environ 5 %.

Ainsi, nous trouvons les impacts liés aux transports :

	<b>GWP [<i>kg CO<sub>2</sub> eq</i>]</b>	<b>CED [<i>MJ eq</i>]</b>
<b>Transport construction</b>	1 357,34	23 024,57
<b>Transport fin de vie</b>	273,84	4 645,12
<b>TOTAL</b>	1 631,18	27 669,69

Tableau 29 : Impacts liés aux transports pour la maison acier/brique

Comme attendu, le transport dans ce cas induit plus d'impacts que dans les cas précédents, le poids des matériaux transportés étant plus important.

Au total, nous avons donc :

	<b>GWP [<i>kg CO<sub>2</sub> eq</i>]</b>	<b>CED [<i>MJ eq</i>]</b>
<b>TOTAL (production+fin de vie+transport+utilisation)</b>	355 608,01	8 375 517,4

Tableau 30 : Impacts totaux pour la maison acier/brique

## VII.4. Maison mixte acier/maçonnerie peau brique

### VII.4.1. PEB

Dans ce cas-ci, la classe de masse thermique de la maison est toujours « peu-lourd », bien que les pourcentages d'éléments massiques horizontaux et verticaux/inclinés soient différents de ceux des cas précédents (le mur extérieur est « lourd » dans ce cas-ci alors qu'il était « léger » dans les cas précédents ; cf. Tableau 5) :

- 54 % des éléments horizontaux sont massiques
- 43 % des éléments verticaux/inclinés sont massiques

Les épaisseurs d'isolant du mur extérieur et de la toiture sont :

- mur extérieur : 16 cm d'isolant externe en polystyrène expansé ; cela donne un coefficient de transmission thermique pour la paroi de :

$$U = 0,212 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

- toiture : 5 cm d'isolant externe en polystyrène expansé en plus des 20 cm d'isolant interne en laine de bois ; cela donne un coefficient de transmission thermique (déterminé avec le logiciel Therm) de :

$$U = 0,1865 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

#### VII.4.2. Résultats ACV

Dans le cas de la maison mixte acier/maçonnerie, voici les résultats obtenus :

- Inventaire :

Le tableau suivant résume toutes les quantités de matériaux utilisés dans le bâtiment :

Nom du matériau	Density (kg/m3) or surface of glazing (m2)	Reference unit	Amount (unit)
Porte bois intérieure	1	m2	9.45
Porte bois isolante performante	1	m2	2.25
Fen bat bois DV CLIMAPLUS N 6.12.6	1	m2	20.185
Polystyrène expansé	25	kg	617.275649
Béton lourd	2300	m3	11.734
Bois lourd	650	m3	1.28735108
Polyuréthane	35	kg	102.6725
Ardoise	2700	kg	1498.5117
Carrelage	2300	kg	1196.92
Mortier	2000	kg	4163.2
Panneau OSB	650	m3	3.31623975
Laine de bois	140	kg	2653.71517
Steel (Hot Deep Galvanised)	7850	kg	367.172296
Bauge	1800	m3	3.6288
Steel (Rebars)	7850	kg	736.8952
Steel (Hot Deep Galvanised) interior	7850	kg	2055.34069
Parpaing de 20	1300	kg	34486.1544
Placoplatre BA 13	850	kg	7262.53431
Brique pleine de 5.5 cm	1700	kg	12401.7517

Tableau 31 : Inventaire pour la maison mixte acier/maçonnerie

- Evaluation des impacts environnementaux :

- Phases de production et de fin de vie :

	<b>GWP [<i>kg CO<sub>2</sub> eq</i>]</b>	<b>CED [<i>MJ eq</i>]</b>
<b>Impacts pour la phase de production</b>	35 839,24	609 469,98
<b>Impacts pour la phase de fin de vie</b>	4 429,57	25 394,58
<b>Impacts pour les 2 phases</b>	40 268,81	634 864,56

Tableau 32 : Impacts liés aux phases de production et de fin de vie pour la maison mixte acier/maçonnerie

- Phase d'utilisation

Le résultat fourni par Capsol concernant la demande de chauffage de l'habitation est le suivant :

$$\text{consommation annuelle} = 74,85 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$$

Et donc :

	<b>GWP [<i>kg CO<sub>2</sub> eq</i>]</b>	<b>CED [<i>MJ eq</i>]</b>
<b>Impacts pour 1 an</b>	2 231,1	37 870,25
<b>Impacts pour 80 ans</b>	178 488,66	3 029 619,62

Tableau 33 : Impacts liés au chauffage pour la maison mixte acier/maçonnerie

La demande en électricité est la même pour tous les cas, à savoir :

$$\text{consommation électrique} = 4722,35 \text{ kWh/an}$$

Et donc :

	<b>GWP [<i>kg CO<sub>2</sub> eq</i>]</b>	<b>CED [<i>MJ eq</i>]</b>
<b>Impacts pour 1 an</b>	1 730,32	58 982,12
<b>Impacts pour 80 ans</b>	138 425,60	4 718 569,92

Tableau 34 : Impacts liés au fonctionnement des équipements électriques pour la maison mixte acier/maçonnerie

– Transports

Voici les quantités de matériaux qui doivent être transportées, à la fois au moment de la construction de la maison et au moment de la démolition :

- poids total de matériaux à transporter (transport des distributeurs au site de construction) : 145 512,23 kg  $\approx$  145 tonnes  
Ce poids est plus important dans ce cas-ci que dans le cas de la maison acier/brique car le système porteur du mur extérieur n'est plus fait d'éléments minces en acier, mais bien de parpaings, ce qui est beaucoup plus lourd.
- partie du poids total correspondant aux matériaux dont la fin de vie est le scénario C (transport jusqu'au C.E.T ou jusqu'à l'incinérateur) : 141 403,09 kg
- partie du poids total correspondant aux matériaux dont la fin de vie est le recyclage (éléments acier, avec transport jusqu'à l'aciérie) : 4 109,14 kg

Dans ce cas-ci, la part des éléments recyclés est encore plus faible que précédemment, avoisinant les 3 %, ce qui est normal vu qu'on « perd » une partie de l'acier (celle de la structure portante du mur extérieur).

Ainsi, nous trouvons les impacts liés aux transports :

	<b>GWP [kg CO<sub>2</sub> eq]</b>	<b>CED [MJ eq]</b>
<b>Transport construction</b>	1 680,67	28 509,12
<b>Transport fin de vie</b>	340,86	5 782,02
<b>TOTAL</b>	2 021,53	34 291,14

Tableau 35 : Impacts liés aux transports pour la maison mixte acier/maçonnerie

Au total, nous avons donc :

	<b>GWP [kg CO<sub>2</sub> eq]</b>	<b>CED [MJ eq]</b>
<b>TOTAL (production+fin de vie+transport+utilisation)</b>	359 204,6	8 417 345,24

Tableau 36 : Impacts totaux pour la maison mixte acier/maçonnerie

## VII.5. Maison traditionnelle

### VII.5.1. PEB

Dans ce cas-ci, la classe de masse thermique de la maison est différente des autres cas : elle est « mi-lourd ». En effet, en plus des murs extérieurs qui sont « lourds », les planchers intermédiaires le sont également, et les pourcentages d'éléments massiques horizontaux et verticaux/inclinés sont :

- 100 % des éléments horizontaux sont massiques
- 38 % des éléments verticaux/inclinés sont massiques

Les épaisseurs d'isolant du mur extérieur et de la toiture sont :

- mur extérieur : 16 *cm* d'isolant externe en polystyrène expansé ; cela donne un coefficient de transmission thermique pour la paroi de :

$$U = 0,212 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

- toiture : 4 *cm* d'isolant externe en polystyrène expansé en plus des 20 *cm* d'isolant interne en polystyrène expansé (entre les fermes en bois) ; cela donne un coefficient de transmission thermique (déterminé avec le logiciel Therm) de :

$$U = 0,2070 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

### VII.5.2. Résultats ACV

Dans le cas de la maison traditionnelle, voici les résultats obtenus :

- Inventaire :

Le tableau suivant résume toutes les quantités de matériaux utilisés dans le bâtiment :

Nom du matériau	Density (kg/m3) or surface of glazing (m2)	Reference unit	Amount (unit)
Porte bois intérieure	1	m2	9.45
Porte bois isolante performante	1	m2	2.25
Fen bat bois DV CLIMAPLUS N 6.12.6	1	m2	20.185
Polystyrène expansé	25	kg	946.809473
Béton lourd	2300	m3	11.734
Bois lourd	650	m3	7.81997534
Polyuréthane	35	kg	102.6725
Ardoise	2700	kg	1498.5117
Carrelage	2300	kg	1196.92
Mortier	2000	kg	10211.2
Panneau OSB	650	m3	0.71748
Steel (Hot Deep Galvanised)	7850	kg	426.518296
Steel (Rebars)	7850	kg	736.8952
Parpaing de 20	1300	kg	34486.1544
Placoplatre BA 13	850	kg	7596.68631
Brique pleine de 5.5 cm	1700	kg	12401.7517
Hourdis de 12 en béton	1300	kg	7924.8

Tableau 37 : Inventaire pour la maison traditionnelle

- Evaluation des impacts environnementaux :

- Phases de production et de fin de vie :

	<b>GWP [<i>kg CO<sub>2</sub> eq</i>]</b>	<b>CED [<i>MJ eq</i>]</b>
<b>Impacts pour la phase de production</b>	46 579,52	719 054,71
<b>Impacts pour la phase de fin de vie</b>	5 757,02	29 969,61
<b>Impacts pour les 2 phases</b>	52 336,54	749 015,32

**Tableau 38 : Impacts liés aux phases de production et de fin de vie pour la maison traditionnelle**

- Phase d'utilisation

Le résultat fourni par Capsol concernant la demande de chauffage de l'habitation est le suivant :

$$\text{consommation annuelle} = 75,29 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$$

Et donc :

	<b>GWP [<i>kg CO<sub>2</sub> eq</i>]</b>	<b>CED [<i>MJ eq</i>]</b>
<b>Impacts pour 1 an</b>	2 244,16	38 091,85
<b>Impacts pour 80 ans</b>	179 533,13	3 047 348,23

**Tableau 39 : Impacts liés au chauffage pour la maison traditionnelle**

La demande en électricité est la même pour tous les cas, à savoir :

$$\text{consommation électrique} = 4722,35 \text{ kWh/an}$$

Et donc :

	<b>GWP [<i>kg CO<sub>2</sub> eq</i>]</b>	<b>CED [<i>MJ eq</i>]</b>
<b>Impacts pour 1 an</b>	1 730,32	58 982,12
<b>Impacts pour 80 ans</b>	138 425,60	4 718 569,92

**Tableau 40 : Impacts liés au fonctionnement des équipements électriques pour la maison traditionnelle**

– Transports

Voici les quantités de matériaux qui doivent être transportées, à la fois au moment de la construction de la maison et au moment de la démolition :

- poids total de matériaux à transporter (transport des distributeurs au site de construction) : 153 530,58 kg  $\approx$  155 tonnes  
Ce poids est plus important que tous ceux obtenus précédemment, ce qui est tout à fait logique vu le remplacement de toute la structure portante par des éléments beaucoup plus lourds (parpaings, fermes bois, hourdis).
- partie du poids total correspondant aux matériaux dont la fin de vie est le scénario C (transport jusqu'au C.E.T ou jusqu'à l'incinérateur) : 152 024,72 kg
- partie du poids total correspondant aux matériaux dont la fin de vie est le recyclage (éléments acier, avec transport jusqu'à l'aciérie) : 1 505,86 kg

Dans ce cas-ci, les éléments recyclés représentent à peine 1 % de tous les éléments de construction de la maison.

Ainsi, nous trouvons les impacts liés aux transports :

	<b>GWP [kg CO<sub>2</sub> eq]</b>	<b>CED [MJ eq]</b>
<b>Transport construction</b>	1 773,28	30 080,09
<b>Transport fin de vie</b>	361,53	6 132,66
<b>TOTAL</b>	2 134,81	36 212,75

Tableau 41 : Impacts liés aux transports pour la maison traditionnelle

Au total, nous avons donc :

	<b>GWP [kg CO<sub>2</sub> eq]</b>	<b>CED [MJ eq]</b>
<b>TOTAL (production+fin de vie+transport+utilisation)</b>	372 430,08	8 551 146,22

Tableau 42 : Impacts totaux pour la maison traditionnelle

## VII.6. Maison acier/trespa sans bauge

### VII.6.1. PEB

Dans ce cas-ci, la classe de masse thermique de la maison est, comme pour les 4 premiers cas, « peu-lourd », bien que les pourcentages d'éléments massiques horizontaux et verticaux/inclinés soient différents. En effet, n'ayant plus de cloison en bauge, plus aucune paroi verticale/inclinée n'est « lourde » :

- 54 % des éléments horizontaux sont massiques
- 0 % des éléments verticaux/inclinés sont massiques

Les épaisseurs d'isolant du mur extérieur et de la toiture sont donc les mêmes que celles du premier cas :

- o mur extérieur : 8 cm d'isolant externe en polystyrène expansé en plus des 14 cm d'isolant interne en laine de bois ; cela donne un coefficient de transmission thermique de :

$$U = 0,2134 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

- o toiture : 6 cm d'isolant externe en polystyrène expansé en plus des 20 cm d'isolant interne en laine de bois ; cela donne un coefficient de transmission thermique de :

$$U = 0,1775 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

### VII.6.2. Résultats ACV

Dans le cas de la maison acier/trespa sans bauge, voici les résultats obtenus :

- Inventaire :

Le tableau suivant résume toutes les quantités de matériaux utilisés dans le bâtiment :

Nom du matériau	Density (kg/m3) or surface of glazing (m2)	Reference unit	Amount (unit)
Porte bois intérieure	1	m2	9.45
Porte bois isolante performante	1	m2	2.25
Fen bat bois DV CLIMAPLUS N 6.12.6	1	m2	20.185
Polystyrène expansé	25	kg	369.339901
Béton lourd	2300	m3	11.734
Bois lourd	650	m3	2.48109573
Polyuréthane	35	kg	102.6725
Ardoise	2700	kg	1498.5117
Carrelage	2300	kg	1196.92
Mortier	2000	kg	4163.2
Panneau OSB	650	m3	5.70372905
Laine de bois	140	kg	5253.42574
Steel (Hot Deep Galvanised)	7850	kg	426.531713
Steel (Rebars)	7850	kg	736.8952
Steel (Hot Deep Galvanised) interior	7850	kg	4035.17942
Placoplatre BA 13	850	kg	7596.82899
Panneaux trespa	1400	m3	1.32638294

Tableau 43 : Inventaire pour la maison acier/trespa sans bauge

- Evaluation des impacts environnementaux :

- Phases de production et de fin de vie :

	<b>GWP [<i>kg CO<sub>2</sub> eq</i>]</b>	<b>CED [<i>MJ eq</i>]</b>
<b>Impacts pour la phase de production</b>	38 628,84	766 180,68
<b>Impacts pour la phase de fin de vie</b>	4 774,35	31 924,19
<b>Impacts pour les 2 phases</b>	43 403,19	798 104,87

Tableau 44 : Impacts liés aux phases de production et de fin de vie pour la maison acier/trespa sans bauge

- Phase d'utilisation

Le résultat fourni par Capsol concernant la demande de chauffage de l'habitation est le suivant :

$$\text{consommation annuelle} = 74,88 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$$

Et donc :

	<b>GWP [<i>kg CO<sub>2</sub> eq</i>]</b>	<b>CED [<i>MJ eq</i>]</b>
<b>Impacts pour 1 an</b>	2 231,9	37 883,69
<b>Impacts pour 80 ans</b>	178 552,01	3 030 694,93

Tableau 45 : Impacts liés au chauffage pour la maison acier/trespa sans bauge

La demande en électricité est la même pour tous les cas, à savoir :

$$\text{consommation électrique} = 4722,35 \text{ kWh/an}$$

Et donc :

	<b>GWP [<i>kg CO<sub>2</sub> eq</i>]</b>	<b>CED [<i>MJ eq</i>]</b>
<b>Impacts pour 1 an</b>	1 730,32	58 982,12
<b>Impacts pour 80 ans</b>	138 425,60	4 718 569,92

Tableau 46 : Impacts liés au fonctionnement des équipements électriques pour la maison acier/trespa sans bauge

– Transports

Voici les quantités de matériaux qui doivent être transportées, à la fois au moment de la construction de la maison et au moment de la démolition :

- poids total de matériaux à transporter (transport des distributeurs au site de construction) : 103 277,9 kg  $\approx$  105 tonnes  
Ce poids est inférieur à celui du cas de la maison acier/trespa avec cloison en bauge. En effet, ici, nous avons remplacé la cloison en bauge par une cloison à structure acier, qui est nettement plus légère, et ça se marque sur les résultats globaux. De tous les cas étudiés, c'est celui-ci qui a le poids total le plus petit.
- partie du poids total correspondant aux matériaux dont la fin de vie est le scénario C (transport jusqu'au C.E.T ou jusqu'à l'incinérateur) : 97 671,63 kg
- partie du poids total correspondant aux matériaux dont la fin de vie est le recyclage (éléments acier, avec transport jusqu'à l'aciérie) : 5 606,28 kg

Ainsi, nous trouvons les impacts liés aux transports :

	<b>GWP [kg CO<sub>2</sub> eq]</b>	<b>CED [MJ eq]</b>
<b>Transport construction</b>	1 192,86	20 234,47
<b>Transport fin de vie</b>	240,13	4 073,36
<b>TOTAL</b>	1 432,99	24 307,83

Tableau 47 : Impacts liés aux transports pour la maison acier/trespa sans bauge

Comme attendu, c'est bien le cas qui induit le moins d'impacts du point de vue du transport.

Au total, nous avons donc :

	<b>GWP [kg CO<sub>2</sub> eq]</b>	<b>CED [MJ eq]</b>
<b>TOTAL (production+fin de vie+transport+utilisation)</b>	361 813,79	8 571 677,55

Tableau 48 : Impacts totaux pour la maison acier/trespa sans bauge

Nous avons donc déterminé les impacts relatifs aux différents cas étudiés. Les 2 tableaux suivants sont des récapitulatifs des impacts pour les 6 cas :

		<b>GWP [<i>kg CO<sub>2</sub> eq</i>]</b>					
		<b>maison acier/trespa</b>	<b>maison acier/acier</b>	<b>maison acier/brique</b>	<b>maison mixte acier/ maçonnerie</b>	<b>maison traditionnelle</b>	<b>maison acier/trespa sans bauge</b>
<b>Impact pour la phase de production</b>		38 516,49	35 242,91	32 957,76	35 839,24	46 579,52	38 628,84
<b>Impact pour la phase de fin de vie</b>		4 760,47	4 355,86	4 073,43	4 429,57	5 757,02	4 774,35
<b>Impact pour les 2 phases</b>		43 276,96	39 598,77	37 031,19	40 268,81	52 336,54	43 403,19
<b>Impact lié au chauffage</b>	<b>pour 1 an</b>	2 216,28	2 227,42	2 231,5	2 231,1	2 244,16	2 231,9
	<b>pour 80 ans</b>	177 302,68	178 193,65	178 520,04	178 488,66	179 533,13	178 552,01
<b>Impact lié à la consommation d'électricité</b>	<b>pour 1 an</b>	1 730,32					
	<b>pour 80 ans</b>	138 425,60					
<b>Impact lié au transport avant la construction</b>		1 262,53	1 271,78	1 357,34	1 680,67	1 773,28	1 192,86
<b>Impact lié au transport en fin de vie</b>		254,46	252,88	273,84	340,86	361,53	240,13
<b>Impact pour les 2 transports</b>		1 516,99	1 524,66	1 631,18	2 021,53	2 134,81	1 432,99
<b>TOTAL</b>		360 522,23	357 742,68	355 608,01	359 204,6	372 430,08	361 813,79

Tableau 49 : Impact GWP pour les différents cas

		<b>CED [MJ eq]</b>					
		<b>maison acier/trespa</b>	<b>maison acier/acier</b>	<b>maison acier/brique</b>	<b>maison mixte acier/ maçonnerie</b>	<b>maison traditionnelle</b>	<b>maison acier/trespa sans bauge</b>
<b>Impact pour la phase de production</b>		763 143,53	642 516,33	575 160,55	609 469,98	719 054,71	766 180,68
<b>Impact pour la phase de fin de vie</b>		31 797,65	26 771,51	23 965,02	25 394,58	29 969,61	31 924,19
<b>Impact pour les 2 phases</b>		794 941,18	669 287,84	599 125,57	634 864,56	749 015,32	798 104,87
<b>Impact lié au chauffage</b>	<b>pour 1 an</b>	37 618,61	37 807,65	37 876,9	37 870,25	38 091,85	37 883,69
	<b>pour 80 ans</b>	3 009 489,16	3 024 612,25	3 030 152,22	3 029 619,62	3 047 348,23	3 030 694,93
<b>Impact lié à la consommation d'électricité</b>	<b>pour 1 an</b>	58 982 ,12					
	<b>pour 80 ans</b>	4 718 569,92					
<b>Impact lié au transport avant la construction</b>		21 416,34	21 573,27	23 024,57	28 509,12	30 080,09	20 234,47
<b>Impact lié au transport en fin de vie</b>		4 316,33	4 289,53	4 645,12	5 782,02	6 132,66	4 073,36
<b>Impact pour les 2 transports</b>		25 732,67	25 862,8	27 669,69	34 291,14	36 212,75	24 307,83
<b>TOTAL</b>		8 548 732,93	8 438 332,81	8 375 517,4	8 417 345,24	8 551 146,22	8 571 677,55

Tableau 50 : Impact CED pour les différents cas

Avant de se lancer dans une analyse de ces résultats, nous pouvons faire plusieurs remarques.

Tout d'abord, pour chaque cas étudié, la demande de chauffage trouvée par Capsol est d'environ  $75 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ <sup>25</sup>.

Or, si on considère que celle-ci est responsable de 85 % de la consommation totale en énergie (avec eau chaude sanitaire) [7], cette-dernière serait alors égale à environ  $90 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ . Cette valeur correspond tout à fait à la valeur exigée par les réglementations actuelles (cf. Tableau 1).

<sup>25</sup> Il est normal que la valeur soit plus ou moins égale pour tous les cas, vu qu'ils ont tous été étudiés pour répondre à la même réglementation thermique PEB.

Cependant, si on compare avec le résultat obtenu précédemment avec le logiciel PEB (cf. VII.1.1), il apparaît que les 2 valeurs de demande de chauffage trouvées sont assez éloignées l'une de l'autre (45 vs 75 kWh/m<sup>2</sup>/an).

Plusieurs choses pourraient expliquer cela. Tout d'abord, le fait d'avoir réalisé des approximations à plusieurs niveaux du calcul PEB (distances de canalisations, nombre de radiateurs, ...). Mais la raison principale de cette différence vient plutôt du fait que les différents scénarios (occupation, puissance dissipée, température de consigne) considérés pour le calcul avec Building Ecodesign Tool – et donc avec Capsol – ne sont certainement pas les mêmes que ceux utilisés par le logiciel PEB (scénarios que nous ne connaissons pas dans l'absolu). Nous allons donc conserver la valeur de 75 kWh/m<sup>2</sup>/an pour la consommation de chauffage dans nos calculs, celle-ci ayant pour avantage de pouvoir être reliée exactement à ses divers scénarios.

En rapport direct avec la remarque précédente, il faut bien noter que les résultats que nous avons obtenus sont entièrement liés aux divers scénarios que nous avons considérés pour le calcul. Changer ces scénarios reviendrait à obtenir des résultats totalement différents, comme nous le verrons plus loin lors de l'analyse de sensibilité.

Une remarque supplémentaire que l'on peut faire concerne les impacts liés aux transports. Que ce soit au niveau de l'impact GWP ou CED, il apparaît que ces transports n'interviennent que de façon minimale dans les résultats globaux pour toute la durée de vie du bâtiment (même pas de l'ordre de 1 %). Ce pourcentage est légèrement plus faible que celui que nous avons trouvé dans les articles traitant de l'analyse du cycle de vie de bâtiment (1,5 – 2,4 %, cf. I.5). Toutefois, les distances que nous avons considérées pour ces transports sont très faibles. Il nous semble donc judicieux de refaire le calcul en augmentant ces distances (en les doublant par exemple), ce qui permettra de voir l'influence du transport sur les résultats. Nous ferons cela lors de l'analyse de sensibilité.

Concernant les impacts liés à la fin de vie des matériaux, pour le GWP, ceux-ci sont de l'ordre de 1 % de l'impact global, et pour le CED, ils ont de l'ordre de 0,3 %, ce qui correspond au pourcentage trouvé dans les articles (0,2 – 5 % [9]).

## VIII. COMPARAISON DES RÉSULTATS

Nous pouvons comparer les résultats globaux pour tous les cas.

D'un point de vue poids des matériaux, c'est, comme nous nous y attendions, la maison traditionnelle qui a un poids total de matériaux le plus important. En effet, comme nous l'avons déjà signalé, toute sa structure portante est composée d'éléments lourds (parpaings, fermes bois, hourdis), en comparaison avec les autres cas où la structure est légère (éléments minces en acier).

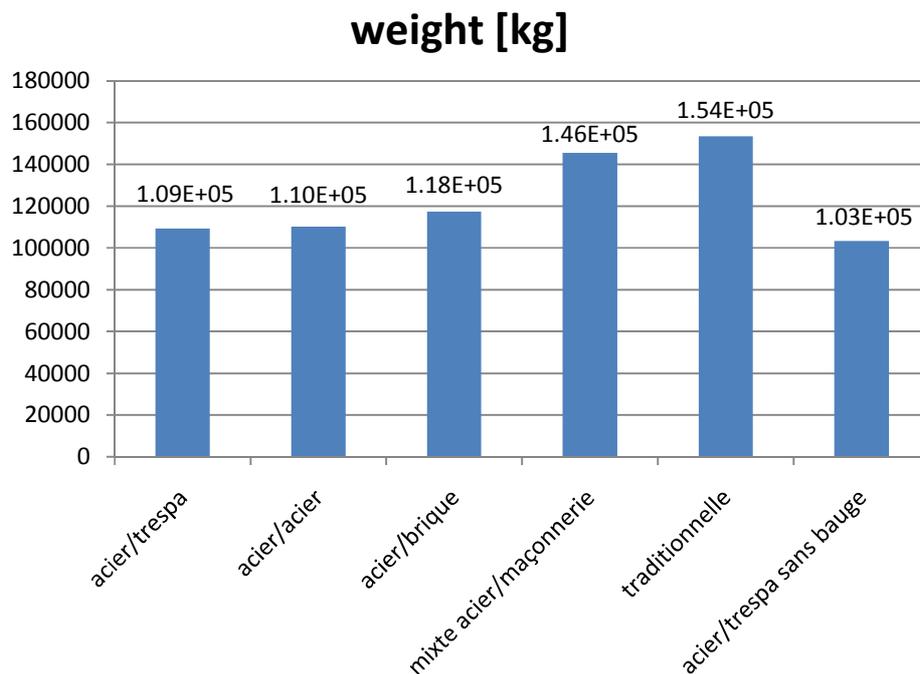


Figure 81 : Poids total de matériaux des 6 cas étudiés

Si on compare les poids des cas maison acier/brique, maison mixte acier/maçonnerie et maison traditionnelle, on remarque que c'est principalement le remplacement des éléments minces de la structure portante des murs extérieurs par des parpaings qui induit une augmentation du poids : la différence de poids est plus importante entre les maisons acier/brique et mixte acier/maçonnerie que celle entre les maisons mixte acier/maçonnerie et traditionnelle. Cela se comprend par le fait que la surface impliquée dans ce remplacement est plus importante.

Concernant les cas avec structure portante en acier, les poids sont assez proches. Il s'agit du cas de la maison sans cloison en bauge qui a le poids le plus petit. En effet, tout d'abord le panneau Trespa est le revêtement le plus léger – en comparaison avec les bardages acier et brique – et ensuite, nous avons le remplacement d'une cloison lourde en bauge par une cloison légère en acier.

Maintenant, concernant le GWP total pour les différents cas, nous remarquons que les résultats pour tous les cas sont de l'ordre de 360 000 kg CO<sub>2</sub> eq.

L'impact GWP est maximum pour la maison traditionnelle ; en se référant au Tableau 49, on voit que la différence de valeur par rapport aux autres cas se concentre principalement au niveau de la phase de production + fin de vie. Nous verrons plus loin si cette haute valeur peut être imputée à l'utilisation d'un matériau en particulier. Nous pouvons toutefois dire que cela ne semble pas être dû à l'utilisation de parpaings, vu la « faible » différence de valeur (en comparaison) entre les cas acier/brique et mixte acier/maçonnerie.

La maison qui induit le moins d'impact GWP est la maison acier/brique. Pourtant, des 3 types de parements envisagés, c'est n'est pas celui en brique mais bien celui en acier dont l'impact GWP est le plus faible. Cependant, tandis que la brique a une durée de vie de 100 ans, celle du bardage acier n'est que de 50 ans, nécessitant donc un remplacement au cours de la vie du bâtiment. Ainsi, en comptant sur toute la durée de vie, il apparaît que c'est le parement brique qui a l'impact GWP le plus faible. Notons que le panneau Trespa, quant à lui, a non seulement l'impact GWP le plus élevé des 3 parements, mais il nécessite également un remplacement au bout de 50 ans.

En comparant les résultats pour les 2 cas avec parement Trespa, il apparaît que c'est le cas sans cloison en bauge qui a l'impact GWP le plus important. Cela est dû au fait que, même si les 2 types de cloison – normale et en bauge – ont plus ou moins le même impact GWP, la première nécessite un remplacement au cours de la vie du bâtiment tandis que l'autre non (durée de vie de 50 ans vs 100 ans). Les 2 résultats sont toutefois très proches l'un de l'autre.

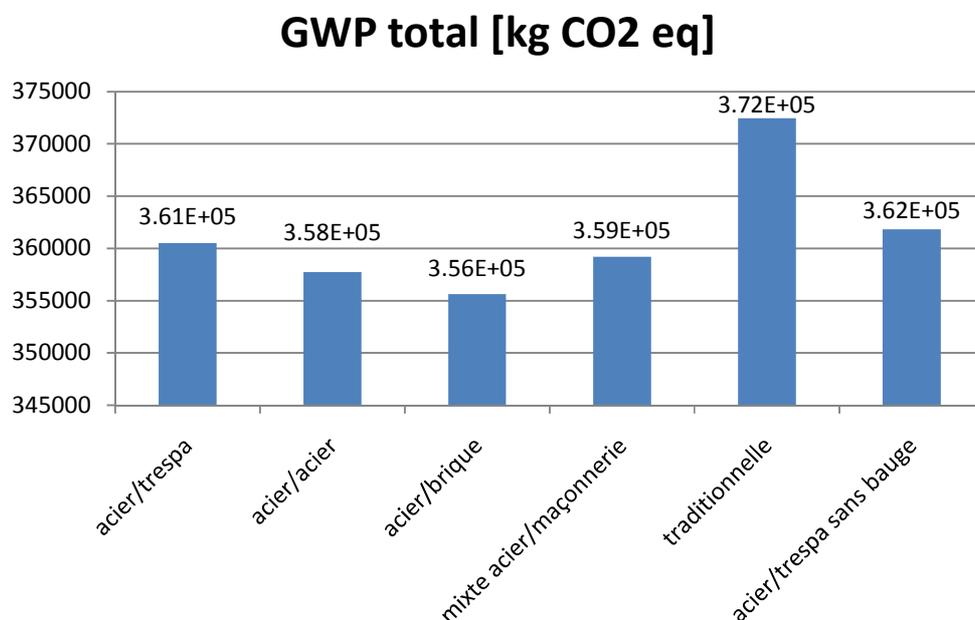


Figure 82 : GWP total des 6 cas étudiés

Enfin, concernant le CED total pour les différents cas, nous remarquons que les résultats pour tous les cas sont de l'ordre de 8 450 000 *MJ eq*.

L'impact CED est maximum pour la maison acier/trespa sans bauge. Si on compare les résultats pour les 4 cas de maison avec structure portante en acier, il apparaît que ce sont les 2 cas avec parement Trespa qui ont l'impact CED le plus élevé. En effet, si on se réfère à la valeur de CED par unité de référence relative à la production du panneau Trespa, on se rend compte que celle-ci est très élevée par rapport à celle des autres parements : les procédés de fabrication des panneaux Trespa requièrent beaucoup d'énergie.

Notons que l'observation faite au niveau du GWP des 2 cas avec parement Trespa peut également être faite au niveau du CED.

Comme pour le GWP, la maison qui induit le moins d'impact CED est la maison acier/brique car de nouveau elle ne nécessite pas de remplacement du parement, mais également parce que des 3 types de parements, c'est celui dont l'impact CED est le plus faible.

De plus, en comparant les résultats entre le cas « acier/brique » et le cas « traditionnelle », on remarque de nouveau une grande différence de valeur (dont la source se situe de nouveau au niveau de la phase de production cf. Tableau 49).

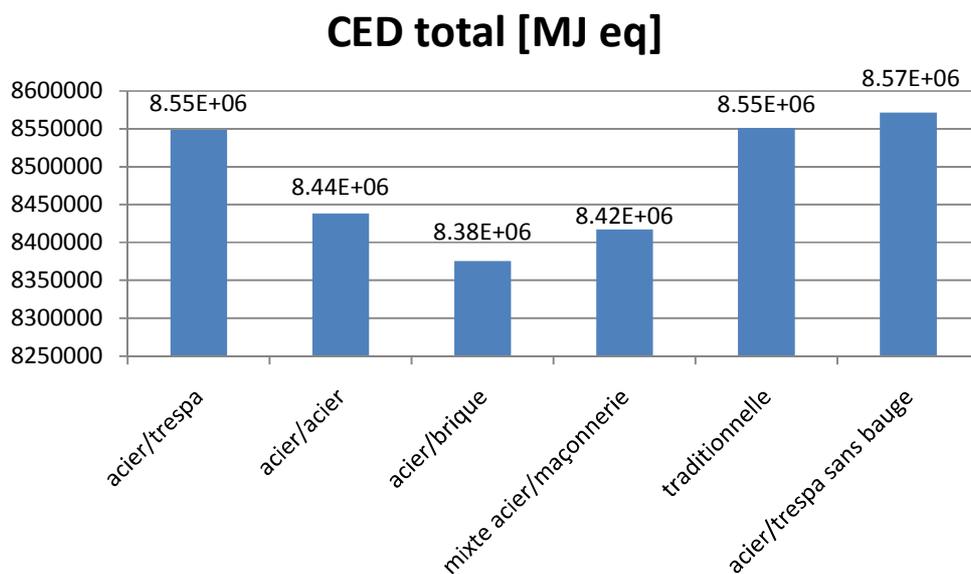
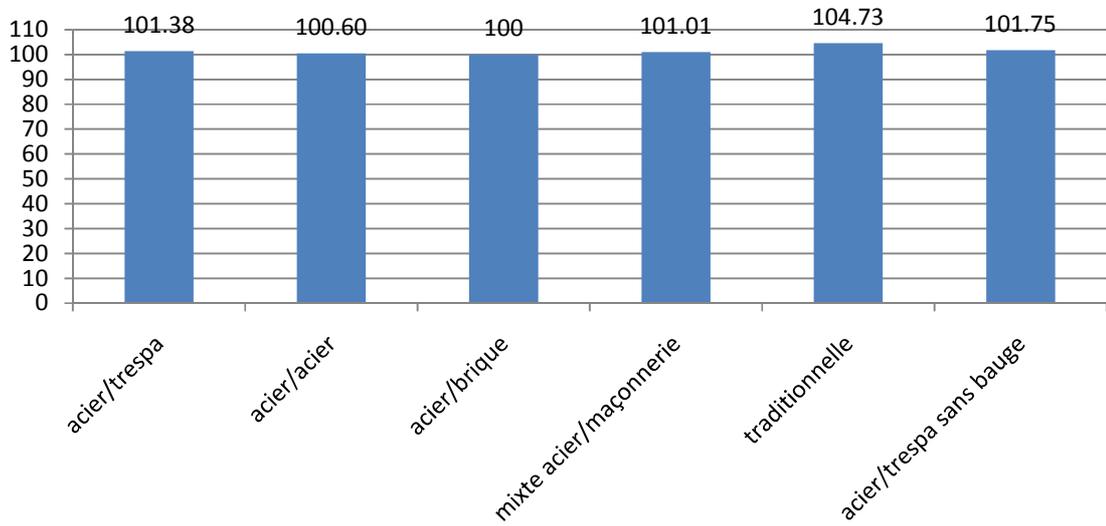


Figure 83 : CED total des 6 cas étudiés

Une remarque supplémentaire est à faire : bien que ce soit effectivement la maison acier à parement brique qui induise le moins d'impacts, la différence avec les valeurs obtenues pour les autres cas reste cependant minimale (de 0,5 – 5 %), comme nous pouvons le constater sur la figure suivante.

## GWP total [%]



## CED total [%]

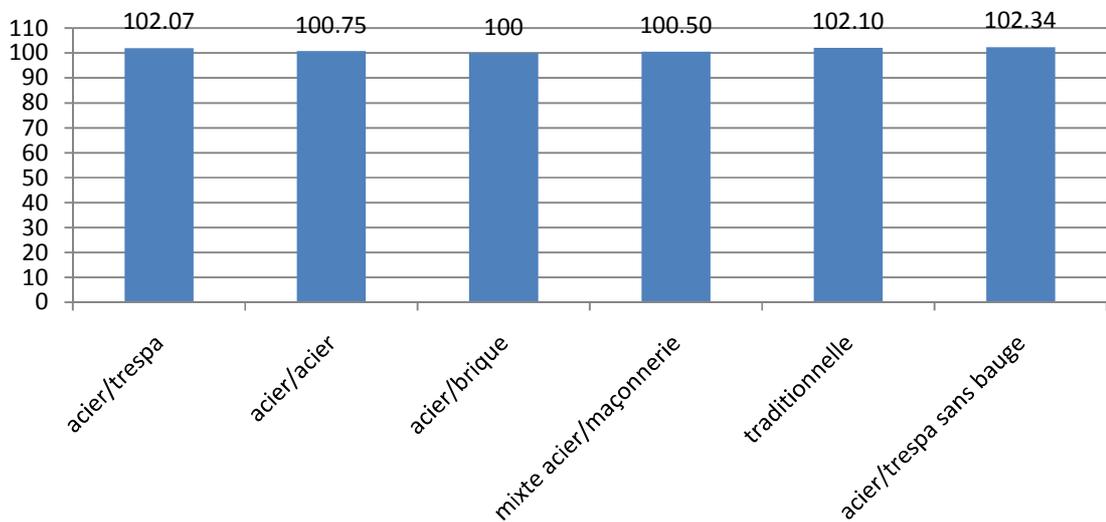
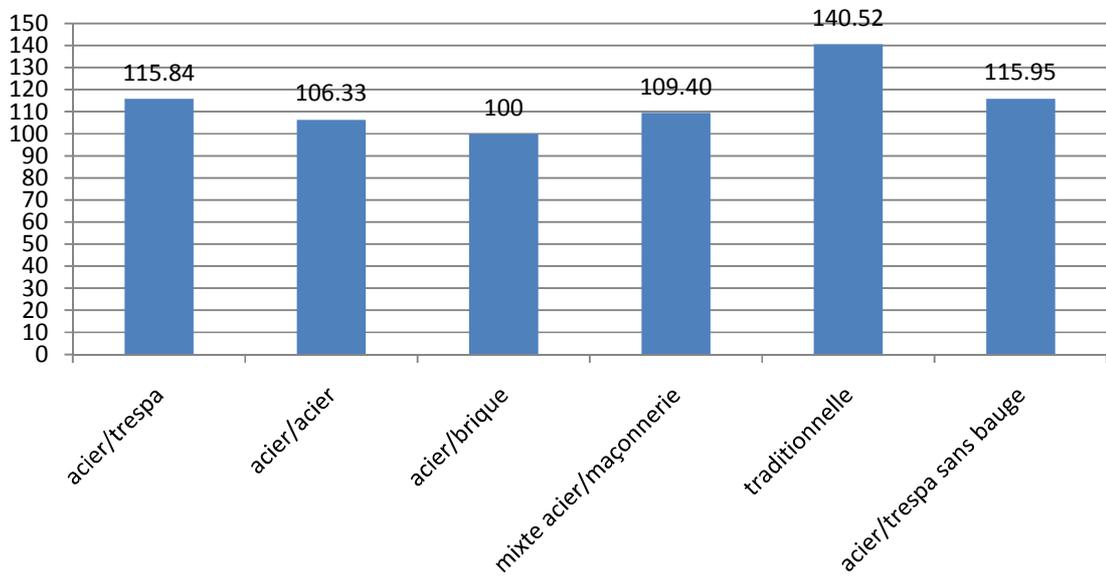


Figure 84 : Impacts GWP et CED totaux des 6 cas étudiés, en pourcent de la valeur minimale

Les différences sont plus significatives lorsque l'on regarde en terme d'impacts liés à l'embodied energy. En effet, dans ce cas, les différences sont de 6 – 40 % pour le GWP et de 6 – 31 % pour le CED.

## GWP de l'embodied energy [%]



## CED de l'embodied energy [%]

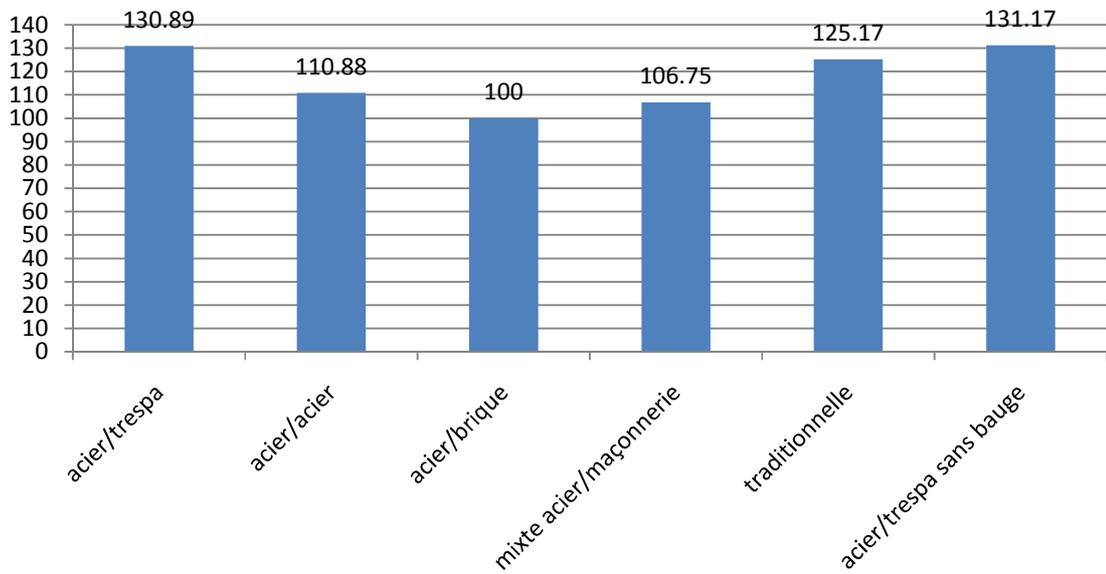


Figure 85 : Impacts GWP et CED de l'embodied energy des 6 cas étudiés, en pourcent de la valeur minimale

## VIII.1. Impacts sur toute la durée de vie du bâtiment

Pour chacun des cas, nous pouvons tracer l'évolution du GWP et du CED au cours de la vie du bâtiment.

Pour ces 2 impacts, nous n'allons pas tracer l'évolution de l'impact total, mais bien l'évolution de l'impact pour l'« embodied energy » et pour l'« opérationnel energy ».

L'embodied energy est l'énergie « incluse » dans le matériau. Elle fait référence à l'énergie requise lors des phases de production, de transport et de fin de vie du matériau.

L'opérationnel energy quant à elle fait référence à l'énergie requise lors de la phase d'utilisation du bâtiment (chauffage, équipements électriques).

Tout cela est fait aux figures suivantes.

Concernant l'évolution des impacts pour l'embodied energy, celle-ci est en forme d'escalier :

- l'impact est non nul au départ ; la valeur correspond aux impacts liés à la production des matériaux et à la construction du bâtiment (transport jusqu'au site de construction)
- la valeur de l'impact reste constante à la valeur de départ durant une partie de la vie du bâtiment
- au premier remplacement de matériaux durant la vie du bâtiment (matériaux arrivant à la fin de leur durée de vie), la valeur de l'impact augmente et reste ensuite constante à cette nouvelle valeur jusqu'au prochain remplacement – l'augmentation de valeur de l'impact est égale à l'impact relatif à l'embodied energy des matériaux remplacés ; dans notre cas, nous avons 3 augmentations (3 « marches d'escalier ») : à 30 ans, à 50 ans et à 60 ans (se référer au Tableau 52 de l'Annexe E pour les durées de vie des matériaux utilisés dans nos compositions de parois)
- à la fin de la vie du bâtiment, l'impact augmente une dernière fois ; cette augmentation correspondant à l'impact lié à la démolition du bâtiment (transport et scénarios de fin de vie)

Quant aux impacts pour l'opérationnel energy, ceux-ci évoluent d'une toute autre manière : l'évolution est linéaire :

- l'impact est nul au départ
- l'impact augmente linéairement tout le long de la vie du bâtiment : d'année en année, les consommations liées au chauffage et au fonctionnement des équipements électriques sont constantes

Analysons maintenant les valeurs d'impacts proprement dites. Au départ ainsi qu'au tout début de la vie du bâtiment, il apparaît que ce sont les impacts liés à l'embodied energy qui sont les plus importants (ce qui est tout à fait normal vu que leurs valeurs sont non nulles au départ contrairement à celles de l'opérationnal energy). Cependant, par la suite, les impacts relatifs à l'opérationnal energy prennent le pas sur ceux de l'embodied energy, jusqu'à atteindre une valeur presque 10 × plus grande à la fin de la vie du bâtiment.

Pour plus de clarté (pour mieux voir les « marches d'escalier »), nous avons réalisé, pour les 2 impacts, un second graphique avec des échelles différentes pour l'embodied et l'opérationnal energy.

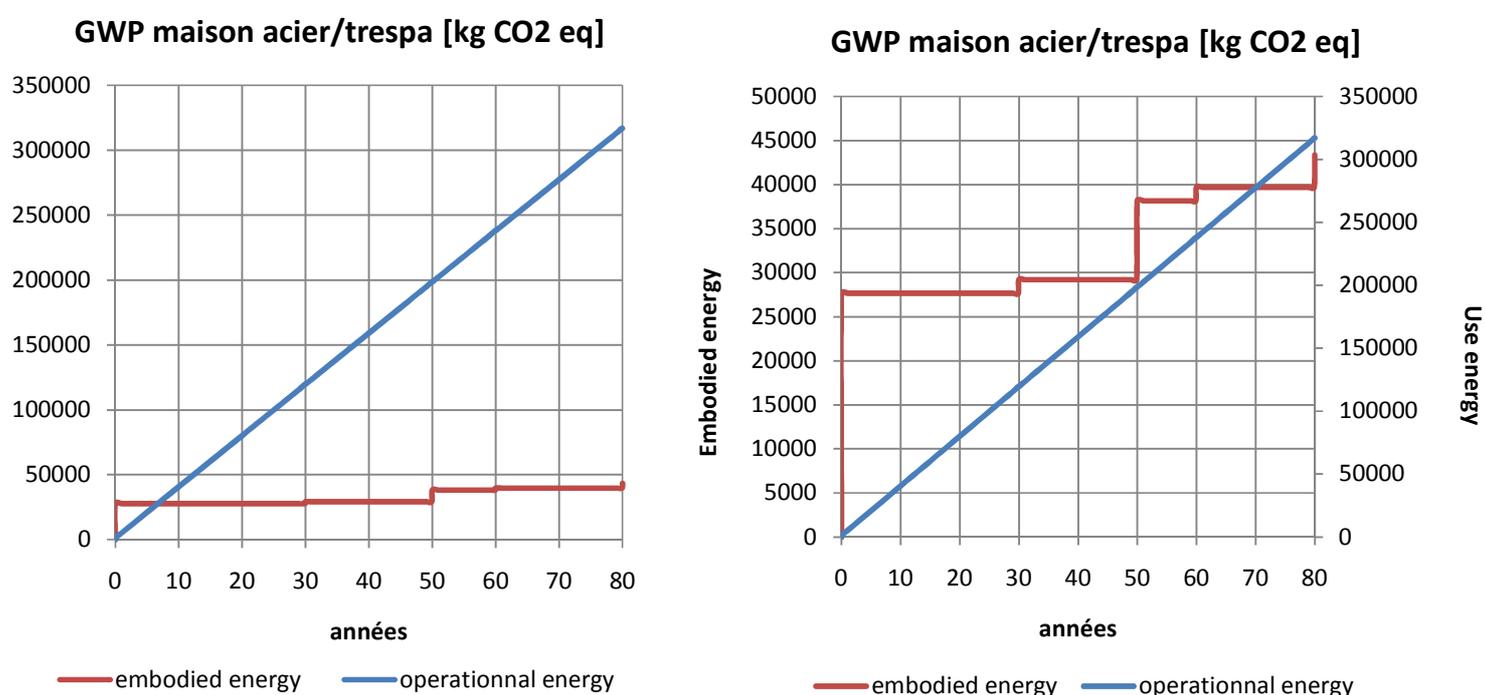


Figure 86 : Evolution du GWP sur toute la durée de vie, pour la maison acier/trespa

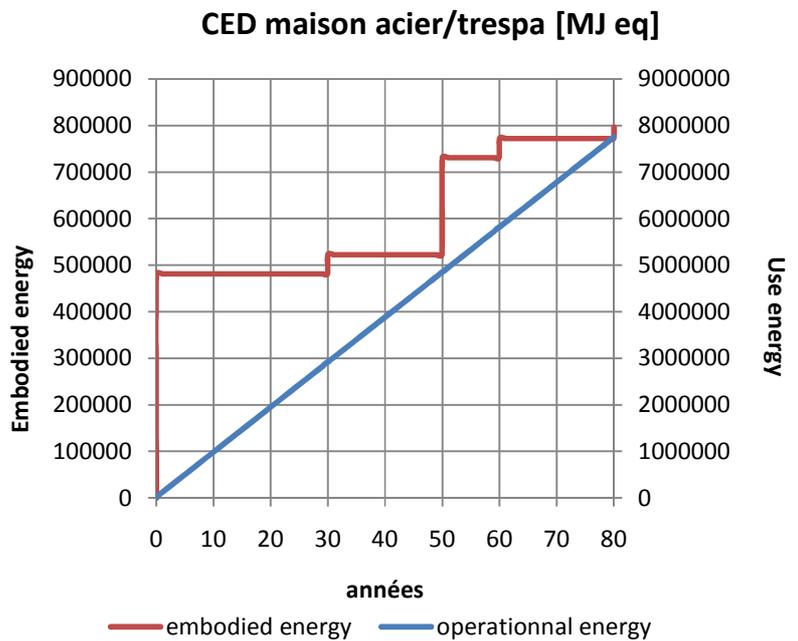
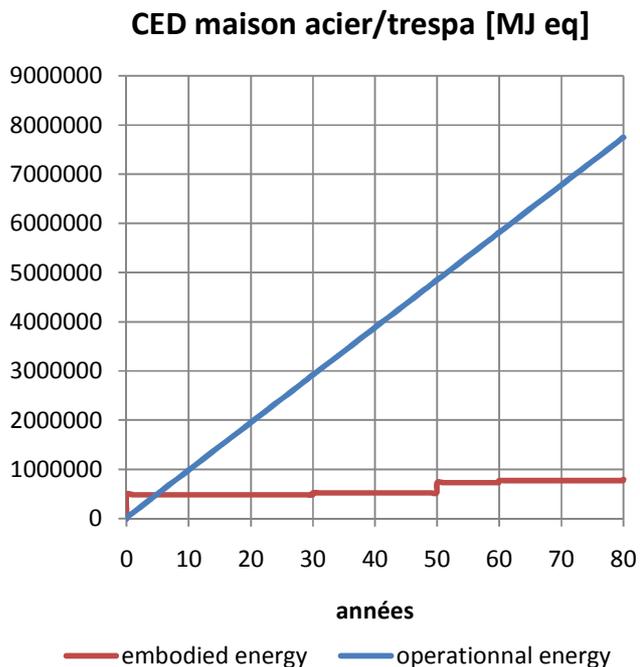


Figure 87 : Evolution du CED sur toute la durée de vie, pour la maison acier/trespa

Pour les autres cas étudiés, l'évolution des impacts est foncièrement la même. Les seules différences qui apparaissent viennent de la valeur des impacts au départ et de la valeur de l'augmentation des impacts lors du remplacement à 50 ans de vie du bâtiment (celles à 30 et 60 ans sont les mêmes pour tous les cas, correspondant au remplacement des fenêtres du bâtiment).

Vous trouverez les figures correspondant aux autres cas étudiés à l'Annexe L.

De ces figures, nous pouvons faire remarquer que c'est la maison traditionnelle qui présente une valeur d'impacts au départ la plus importante (comme nous l'avons déjà noté précédemment, cf. Tableau 49 et Tableau 50).

En ce qui concerne l'augmentation des valeurs des impacts après 50 ans de vie du bâtiment, il apparaît que c'est la maison acier/brique qui présente une augmentation la plus faible. En effet, comme dit plus haut, le parement brique est le seul ne nécessitant pas de remplacement au cours de la vie du bâtiment.

De plus, pour les autres cas où le parement est réalisé en brique (cas mixte acier/maçonnerie et traditionnelle), il semblerait qu'il intervienne dans ces cas des matériaux dont le remplacement produit plus d'impacts et donc une augmentation plus importante.

## VIII.2. Impacts par phases du cycle de vie

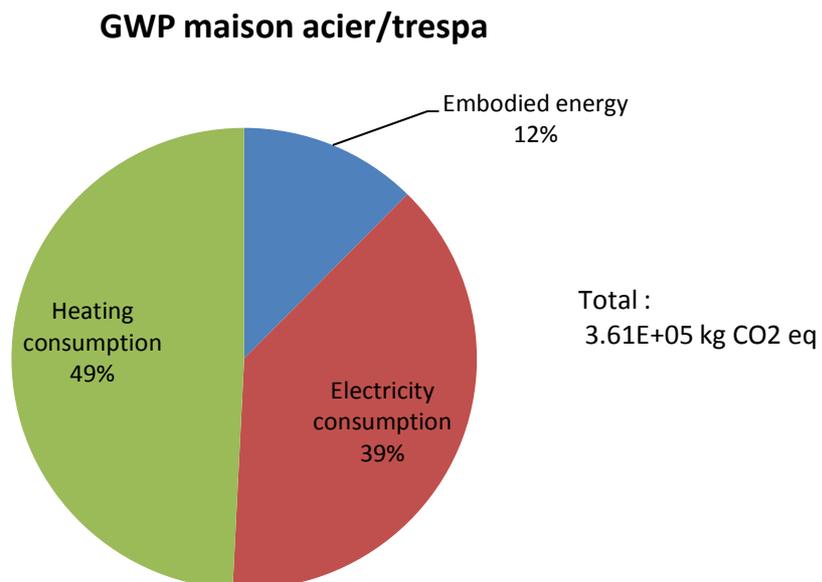
Comme nous venons de le constater sur les graphes précédents, les impacts liés à l'embodied energy sont presque 10 × plus petits que ceux liés à l'operationnal energy.

Les figures suivantes présentent de façon précise la répartition des impacts par phases du cycle de vie : quel pourcentage de l'impact global est dû à telle ou telle phase.

Les « phases » que nous allons considérer sont : l'embodied energy (production des matériaux + transport + fin de vie) et l'operationnal energy, cette dernière étant divisée en ses 2 composantes : la consommation de chauffage et la consommation d'électricité.

Pour la maison acier/trespa, nous avons (cf. Figure 88) :

- GWP :
  - la contribution la plus importante vient de la consommation de chauffage, avec 49 %
  - la consommation d'électricité intervient pour 39 %
  - la phase qui induit le moins d'impact est l'embodied energy, à raison de 12 %
- CED :
  - la contribution la plus importante vient cette fois de la consommation d'électricité, avec 55 %
  - ensuite, c'est la consommation de chauffage, qui intervient pour 35 %
  - enfin, la phase qui induit le moins d'impact est de nouveau l'embodied energy, à raison de 10 %



### CED maison acier/trespa

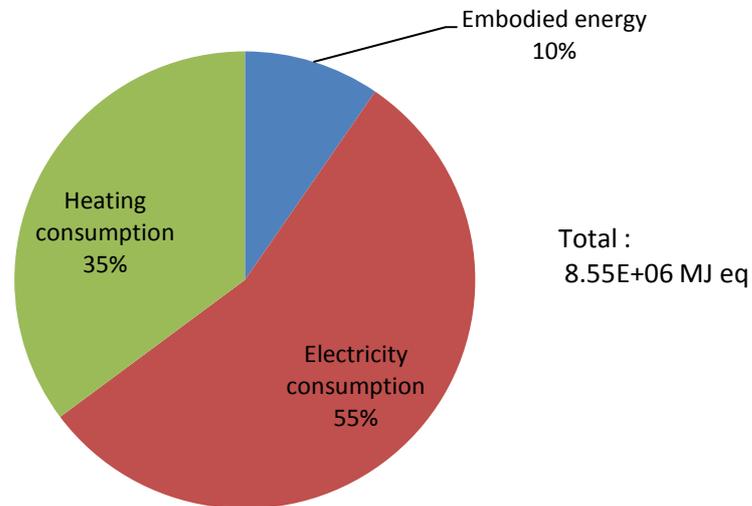


Figure 88 : Répartition des impacts GWP et CED par phases du cycle de vie pour la maison acier/trespa

Ainsi, c'est sans conteste la phase d'utilisation du bâtiment qui produit la majorité des impacts (88 – 90 %, pour les 2 impacts), comme nous l'avons bien noté précédemment. Ceci est tout à fait compréhensible vu que c'est de loin la phase la plus longue du cycle de vie complet du bâtiment. De plus, ce pourcentage est en totale adéquation avec celui que nous avons trouvé dans les articles concernant cette phase (80 – 98 %, [9]). Le pourcentage de la phase liée à l'embodied energy, à savoir 10 – 12 %, correspond lui aussi à ce l'on trouve dans les articles (1–20 %, [9]).

Au vu de ces résultats, c'est donc au niveau de la phase d'utilisation qu'il faudra essayer d'apporter des améliorations pour diminuer l'impact global du bâtiment.

Par améliorations, nous entendons par exemple l'utilisation de technologies permettant le chauffage pour lesquelles l'impact environnemental est moindre, idem pour la production d'électricité (énergies renouvelables,...).

En diminuant l'impact de la phase d'utilisation, celui relatif à l'embodied energy des matériaux, et plus précisément à la phase de production des matériaux (le transport et la fin de vie n'intervenant quasiment pas en comparaison comme nous l'avons noté à la fin du point VII), aura une importance de plus en plus grande sur l'impact total.

Notons que la contribution de la phase d'utilisation à l'impact global est propre à chaque pays. En effet, l'impact lié à la consommation d'électricité dépend du mix énergétique choisi, et celui-ci est différent en fonction du pays considéré.

Ainsi, si nous faisons le même travail mais cette fois en considérant le mix français, les pourcentages de chaque phase seraient certainement différents. Cela sera fait ultérieurement, au niveau de l'analyse de sensibilité.

Pour les autres cas étudiés, les pourcentages relatifs aux différentes phases sont identiques ou presque (à 1 ou 2 % près) à ceux de la maison acier/trespa. Nous n'allons donc pas mettre les schémas correspondants, ceux-ci n'apportant rien de plus.

### **VIII.3. Impacts par type de matériaux**

Nous allons à présent étudier la distribution du poids et des impacts GWP et CED (pour les phases de production et de fin de vie) par type de matériaux.

Les types de matériaux que nous avons considérés sont les suivants : Pierres et bétons, Acier, Mortier et plâtre, Bois, Isolants et Portes/fenêtre.

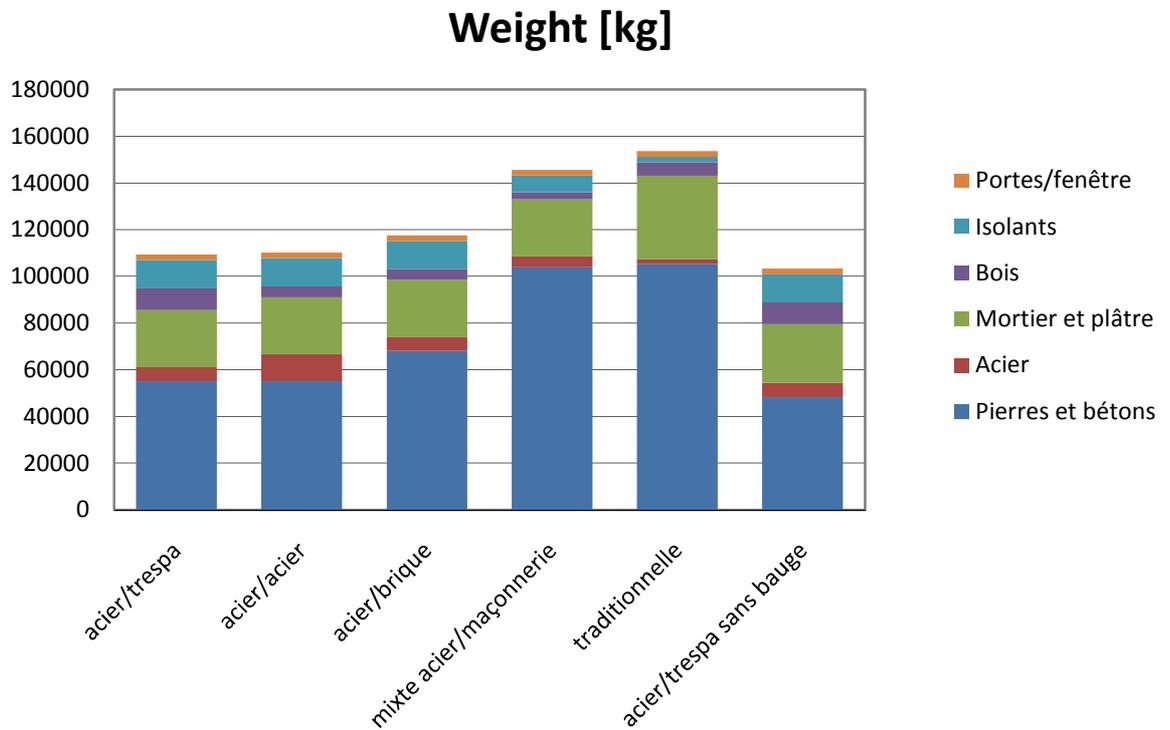
Notons que nous avons classé le panneau Trespa dans la catégorie Bois (celui-ci étant composé à 70 % de fibres de bois, cf. Annexe B), et la bauge dans la catégorie « Pierres et bétons ».

Les 3 figures suivantes représentent ces distributions.

Au niveau de la distribution du poids, on voit que c'est le type de matériaux « Pierres et bétons » qui a la plus grande importance, et de loin par rapport aux autres types. En effet, ce sont souvent les matériaux de ce type qui ont les masses volumiques les plus élevées, tout en étant utilisés en grande quantité (comparé à l'acier). Pour tous les cas, les éléments faisant partie de cette catégorie sont la dalle de sol et les fondations. De plus, pour les maisons acier/brique, mixte acier/maçonnerie et traditionnelle, de nouveaux éléments de la construction viennent successivement s'ajouter à cette catégorie : d'abord les briques du parement, puis les parpaings de la structure des murs extérieurs et enfin les hourdis des planchers intermédiaires. Ainsi, d'un cas à l'autre, le poids relatif à cette catégorie augmente.

Notons que le changement de parement des cas 1 à 3 est tout à fait visible au niveau de ce graphique. En effet, les 3 types de parement appartenant chacun à une catégorie de matériaux différente (Bois, Acier et Pierres et béton respectivement), on observe pour chacun des cas une légère augmentation du poids relatif à la catégorie dont fait partie son parement tandis que les poids des 2 autres catégories restent « constants ».

Finalement, au niveau de la catégorie Isolants, on remarque que son poids est relativement identique pour tous les cas, sauf pour la maison traditionnelle pour laquelle son poids est bien inférieur. En effet, dans ce cas, les épaisseurs d'isolation mises en place au niveau des murs extérieurs et de la toiture sont moindres que dans les autres cas (cf. point VII).



**Figure 89 : Distribution du poids par type de matériaux, pour les 6 cas étudiés**

Etudions maintenant la distribution de l'impact GWP (Figure 90).

La première chose que l'on peut dire sur ce graphique est que, si on le compare au graphique de la distribution du poids, il n'y a pas forcément correspondance entre les 2 résultats : des types de matériaux qui n'ont pourtant pas une part importante dans le poids total de matériaux peuvent avoir des impacts environnementaux très importants, et inversement.

Le cas le plus flagrant concerne la catégorie Portes et fenêtres. Bien que son poids soit négligeable par rapport à ceux des autres types de matériaux, son impact environnemental, lui, ne l'est certainement pas !! Son impact relativement important est principalement dû au fait que la durée de vie des fenêtres (30 ans) nécessite qu'elles soient remplacées 2 × au cours de la vie du bâtiment. Notons au passage que, comme attendu, l'impact relatif à cette catégorie est constant pour tous les cas étudiés.

Ce phénomène peut s'observer, dans une moindre mesure, pour les autres catégories sauf pour la catégorie Portes et fenêtres. En effet, pour celle-là, c'est le phénomène inverse qui apparaît : la catégorie a une contribution moindre à l'impact GWP qu'au poids total de matériaux.

Nous pouvons essayer de déterminer quel type de matériaux produit le plus gros impact. Il apparaît qu'en fonction du cas considéré, celui-ci n'est pas le même. Pour les 3 premiers cas, il s'agit respectivement du type dont fait partie le parement, et l'impact relatif à ce type est d'autant plus grand que le parement nécessite un remplacement au cours de la vie du bâtiment : l'impact le plus grand est relatif au parement Trespas, puis c'est celui relatif au bardage acier et enfin celui du parement brique.

Concernant l'impact relatif aux matériaux d'isolation, celui-ci est quasiment constant pour tous les cas avec structure portante en acier. Par contre, pour les cas avec murs en blocs de maçonnerie, l'impact est plus important, bien que l'épaisseur totale des différents isolants mis en place soit plus petite (cf. poids de la catégorie Isolants à la Figure 89). Cela est dû au fait que dans ces cas-là, nous ne mettons au niveau des murs extérieurs (et de la toiture dans le cas de la maison traditionnelle) que du polystyrène expansé comme isolant, qui a un impact environnemental beaucoup plus important que la laine de bois, qui est l'isolant principal pour les cas maisons acier/... .

Si on se concentre maintenant sur le cas de la maison traditionnelle, à savoir le cas qui présente l'impact GWP le plus important, on voit que cela n'est pas dû à l'utilisation, dans ce cas, d'un matériau en particulier, mais bien à l'accumulation de l'utilisation, ensemble, des divers matériaux la composant. Si on compare avec le cas maison/brique, on remarque :

- tout d'abord, le remplacement de la structure portante acier des murs extérieurs et des planchers intermédiaires par respectivement des parpaings et des hourdis diminue le GWP relatif à l'acier, mais surtout augmente de manière plus significative le GWP relatif à la catégorie Pierres et bétons
- ensuite, comme dit au-dessus, l'utilisation de polystyrène expansé comme isolant augmente le GWP relatif à cette catégorie
- de plus, l'utilisation de hourdis nécessite la mise en place d'une chape de mortier, ce qui augmente le GWP relatif à cette catégorie
- enfin, le remplacement de la ferme acier par une ferme en bois augmente de manière significative le GWP relatif à cette catégorie ; de toutes les augmentations de valeurs pour les différents types de matériaux, c'est cette augmentation-ci qui est la plus importante

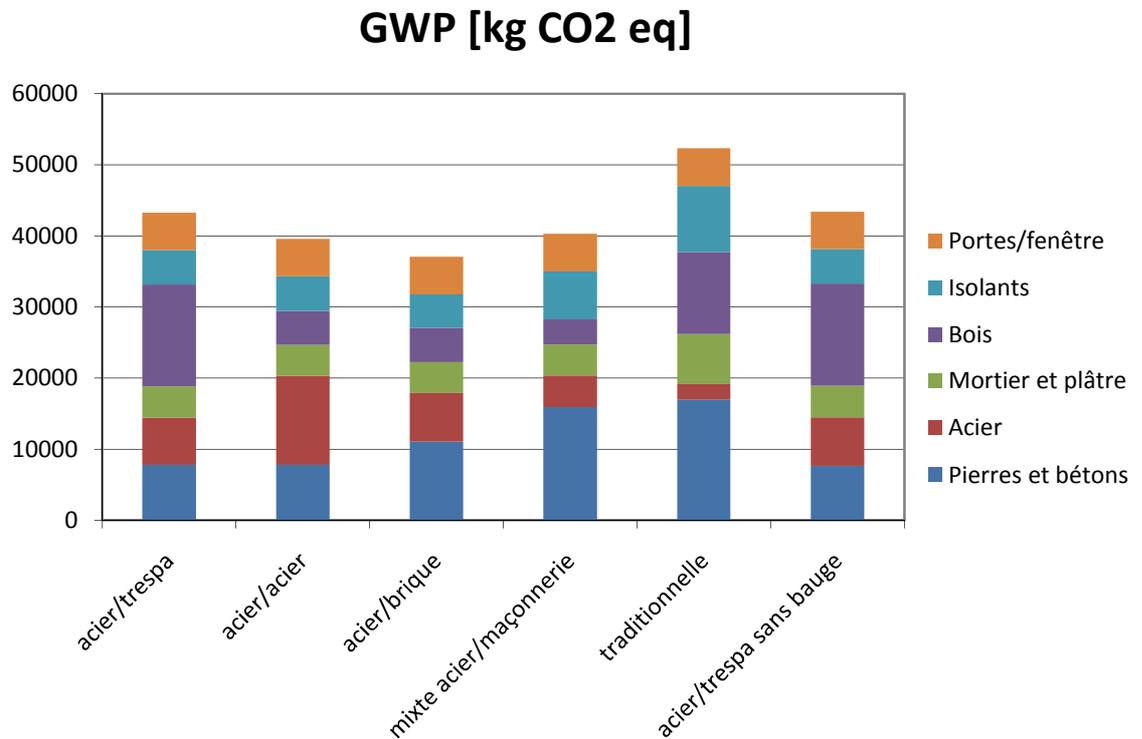


Figure 90 : Distribution du GWP par type de matériaux, pour les 6 cas étudiés

Etudions maintenant la distribution de l'impact CED (Figure 91).

Notons que la plupart des remarques faites au niveau du GWP sont encore valables dans ce cas-ci.

De nouveau on remarque ici que des types de matériaux, qui n'ont pourtant pas une part importante dans le poids total de matériaux, ont des impacts environnementaux relativement importants, et inversement.

La contribution de la catégorie Portes et fenêtres à l'impact CED est encore plus importante qu'elle ne l'était pour l'impact GWP.

Dans le même ordre d'idée, la contribution de la catégorie Pierres et bétons en terme de CED est plus petite que celle en terme de GWP. Cela est dû au fait que les procédés de production du béton demandent de faibles quantités d'énergie.

Au niveau des cas avec parement Trespa, il apparaît que c'est la catégorie Bois qui intervient le plus dans le CED. Cela est totalement lié à la valeur élevée du CED par unité de référence pour la production du panneau Trespa, et au fait que celui-ci nécessite un remplacement au bout de 50 ans de durée de vie. Notons que pour le parement acier, c'est la catégorie Acier qui a le plus gros impact CED, pour les mêmes raisons.

Enfin, pour le cas de la maison traditionnelle, il y a, contrairement à l'impact GWP, une catégorie qui se démarque par rapport aux autres quant à sa contribution à l'impact ; il s'agit de la catégorie Isolants. En effet, rappelons-le, l'isolant polystyrène expansé mis en place au niveau des différentes parois a des impacts environnementaux importants, qui se reflètent d'autant plus sur la valeur totale des impacts à cause du fait que la durée de vie de l'isolant est telle qu'elle nécessite un remplacement au cours de la vie du bâtiment.

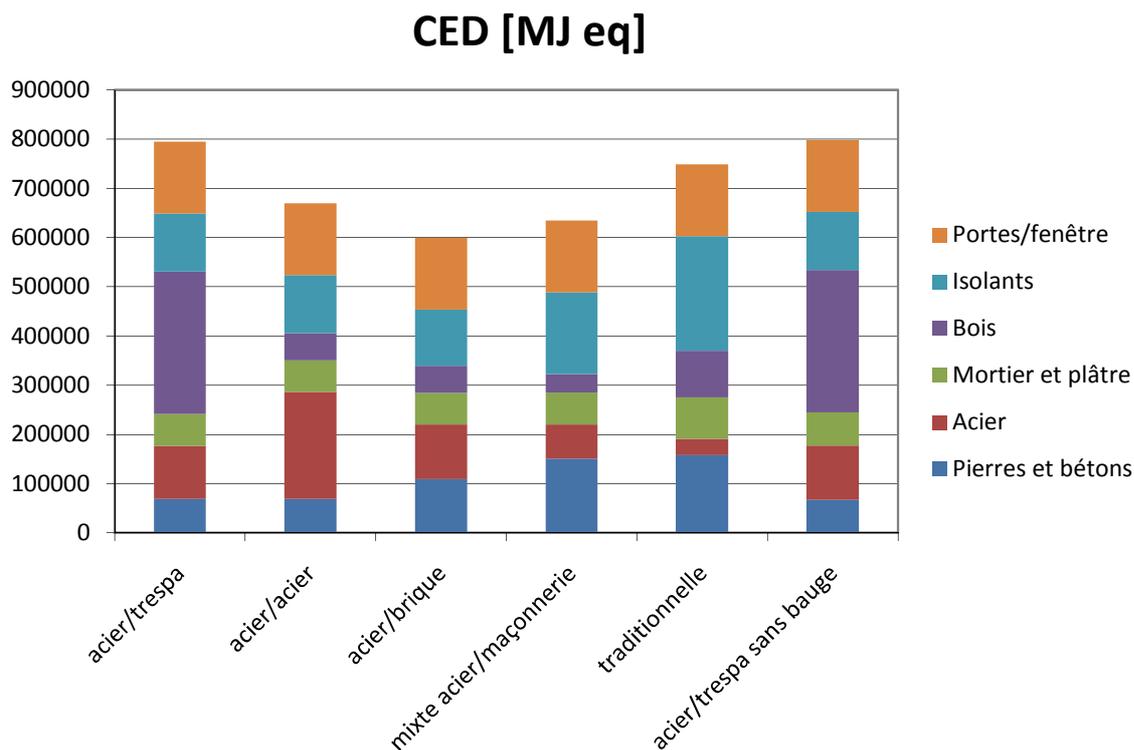


Figure 91 : Distribution du CED par type de matériaux, pour les 6 cas étudiés

#### VIII.4. Impacts par emplacement dans le bâtiment

Finalement, nous allons étudier la distribution du poids et des impacts GWP et CED (pour les phases de production et de fin de vie) suivant l'emplacement/la fonction qu'occupe le matériau dans le bâtiment.

Les emplacements considérés sont : Structure, Façade, Toiture, Portes et Plancher.

Remarque : les cloisons intérieures de la maison sont comptées dans la partie Portes.

Les 3 figures suivantes représentent ces distributions.

Au niveau de la distribution du poids, on voit que c'est la Structure qui a la plus grande importance : elle intervient pour presque 50 % du poids total dans les 6 cas étudiés. Dans le cas de la maison traditionnelle, c'est le Plancher qui occupe la deuxième place en terme de contribution au poids, celui-ci étant réalisé avec des hourdis en béton. Pour tous les cas, c'est la toiture qui contribue le moins au poids total des matériaux.

Au niveau du poids de la Façade pour les 3 premiers cas, celui-ci est relativement égal pour les cas acier/trespa et acier/acier. Par contre, pour le cas acier/brique, le poids est légèrement supérieur. Cela s'explique tout simplement par le fait que la brique est plus lourde que les autres parements considérés.

Ensuite, en comparant le poids de la Façade pour les 3 cas avec parement en brique, il apparaît que c'est le cas acier/brique qui a le poids le plus important. En effet, cette valeur ne tenant pas compte du poids de la structure portante du mur (celui-ci est compté au niveau de la Structure), il ne reste que l'isolant et le parement en lui-même. Ce dernier étant identique pour les 3 cas, la différence vient de la quantité d'isolant mise en place dans les différents cas, et effectivement, cette quantité est supérieure dans le cas acier/brique que dans les 2 autres cas.

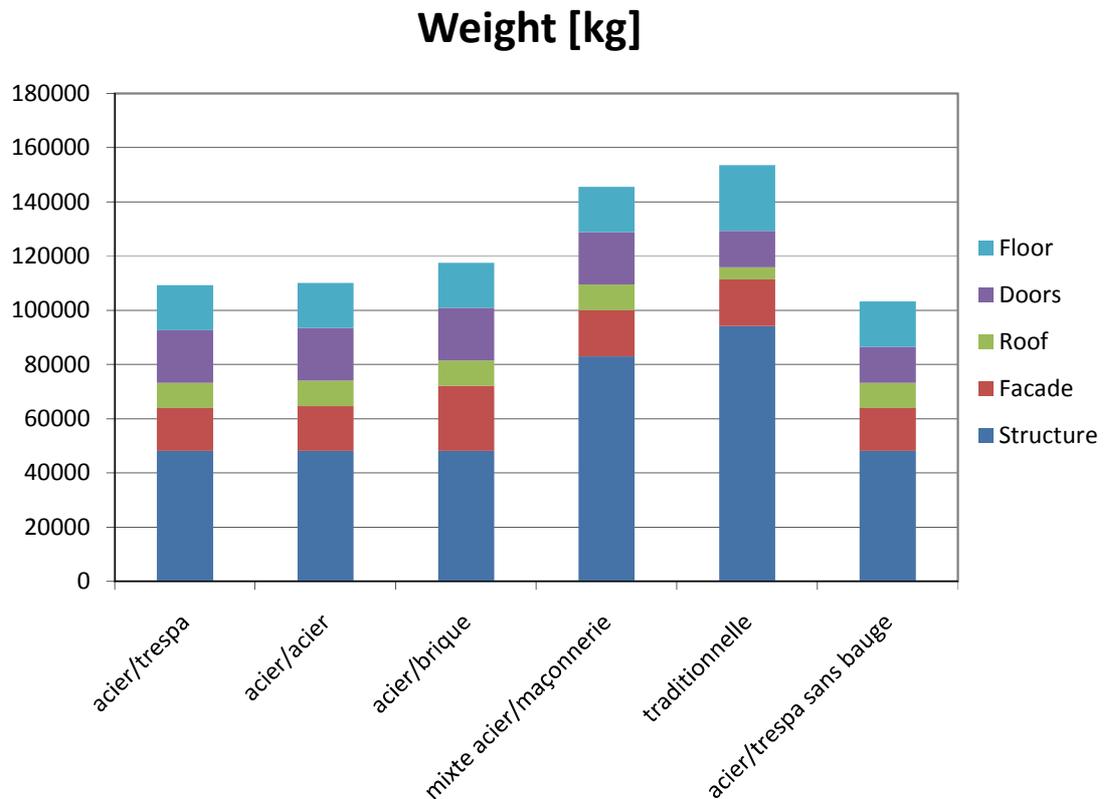


Figure 92 : Distribution du poids suivant l'emplacement des matériaux dans le bâtiment, pour les 6 cas étudiés

Etudions maintenant la distribution de l'impact GWP (Figure 93).

Une première remarque à faire est que, comme pour la distribution par type de matériaux, il n'y aura pas nécessairement correspondance entre les résultats obtenus pour les différentes distributions (poids, GWP et CED).

Pour les 3 premiers cas, toutes les contributions sont les mêmes, sauf celle de la Façade. Ainsi, comme nous l'avons déjà dit, c'est le parement fait en brique qui a l'impact le plus faible, suivi par le bardage acier et enfin par le parement en panneaux Trespa (ces 2 derniers revêtements nécessitant un remplacement au cours de la vie du bâtiment).

Pour les 3 cas avec parement brique, c'est principalement au niveau de la Structure que les contributions sont différentes : entre les cas acier/brique et mixte acier/maçonnerie, on observe bien une légère augmentation de la valeur de GWP relative à la Structure (cela dû au remplacement de la structure acier par de la structure « béton ») mais la différence la plus grande apparaît pour le cas de la maison traditionnelle. Dans ce cas, on a en plus remplacement des planchers et toiture acier respectivement par des hourdis et une toiture bois. Si on se rappelle les résultats que nous avons obtenus concernant la répartition du GWP total par types de matériaux, il est clair que cette augmentation de valeur de GWP pour la partie Structure est due principalement à l'utilisation du bois, au lieu de l'acier, pour les fermes du toit.

## GWP [kg CO2 eq]

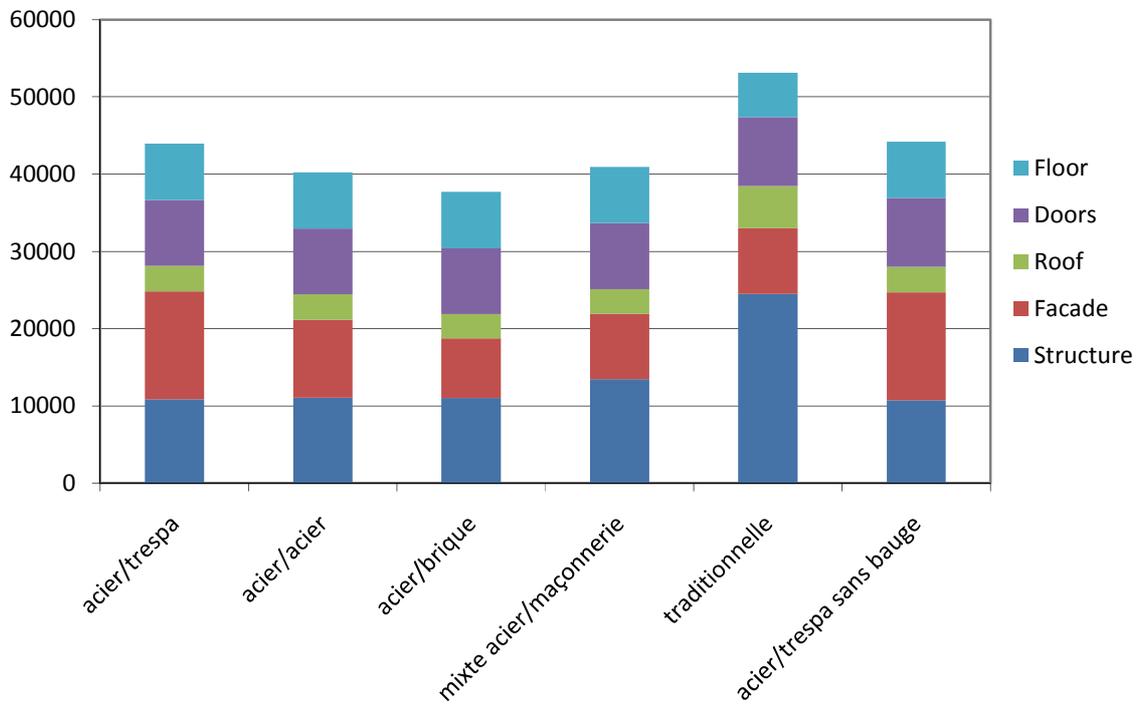


Figure 93 : Distribution du GWP suivant l'emplacement des matériaux dans le bâtiment, pour les 6 cas étudiés

Etudions finalement la distribution de l'impact CED (Figure 94).

La partie Structure, dans ce cas, n'intervient quasiment pas, et ce pour tous les cas étudiés.

Par contre, la partie Portes a une contribution plus grande au niveau du CED qu'elle ne l'était au niveau du GWP. Cela s'explique par le fait que dans cette partie sont prises en compte les cloisons, cloisons qui font intervenir beaucoup de plaques de plâtre ; or celles-ci ont non seulement un CED relativement important, mais ont également une durée de vie qui n'est que de 50 ans, nécessitant un remplacement.

Au niveau des cas avec parement Trespa, on retrouve de nouveau une contribution importante du panneau au CED, cela transparissant au niveau du graphique par la partie Façade produisant le plus d'impacts.

## CED [MJ eq]

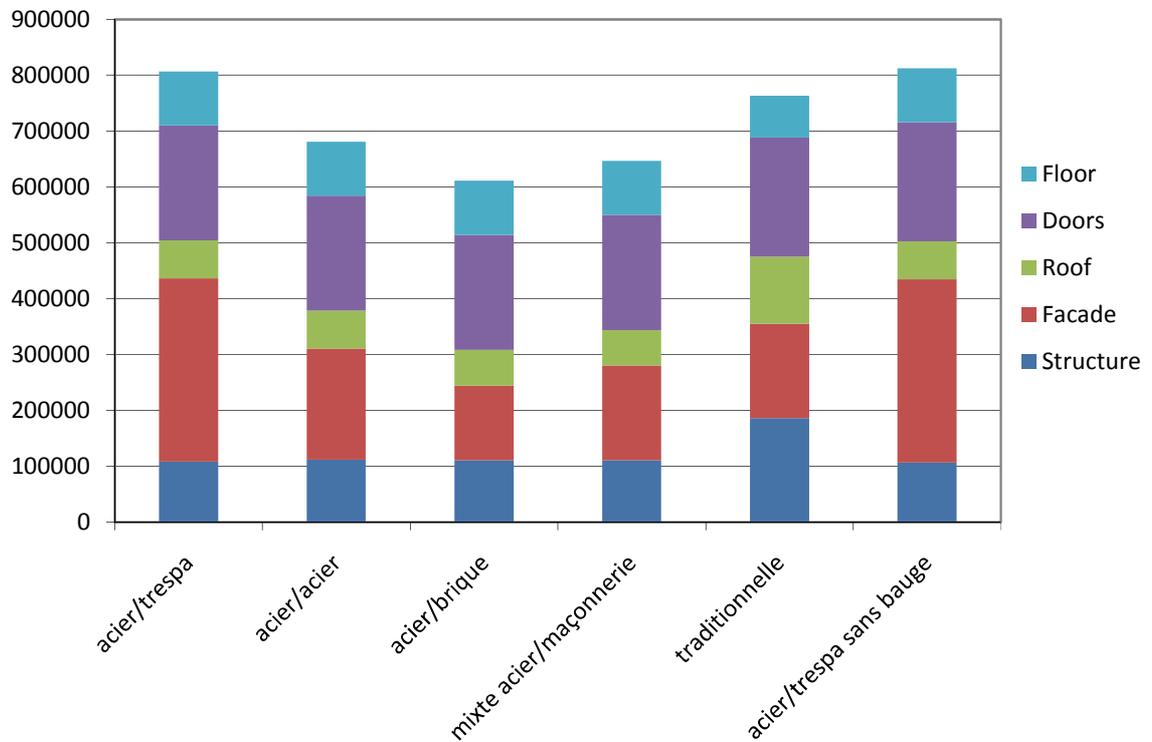


Figure 94 : Distribution du poids suivant l'emplacement des matériaux dans le bâtiment, pour les 6 cas étudiés

En définitive, il apparaît au vu des résultats obtenus que c'est la maison avec structure portante en acier et parement en brique qui produit le moins d'impacts environnementaux.

En effet, en comparaison avec les deux autres parements, c'est le bardage brique dont les impacts environnementaux pour toute la durée de vie du bâtiment sont les plus faibles. Notons au passage que le panneau Trespa, pour lequel les procédés de fabrication requièrent de grandes quantités d'énergie, ne constitue pas un matériau très favorable du point de vue environnemental.

En ce qui concerne le cas de la maison traditionnelle, il apparaît clairement au vu des résultats que dans l'état (c'est-à-dire avec les matériaux considérés), la maison traditionnelle est hors compétition : elle induit des impacts environnementaux beaucoup plus importants que la maison acier/brique, et même que la maison acier/acier. Pour qu'elle devienne compétitive d'un point de vue environnemental, il faudrait faire quelques modifications au niveau des matériaux utilisés.

Notons que l'observation selon laquelle une maison avec structure portante en blocs de maçonnerie induit plus d'impacts que cette même maison avec structure portante en acier correspond bien à ce qu'il a été trouvé dans les articles portant sur le sujet.

Finalement, la comparaison entre les cas de la maison acier/trespa avec et sans cloison en bauge permet de voir l'effet d'une telle cloison sur les résultats finaux. Il apparaît que non seulement le GWP mais également le CED sont inférieurs dans le cas avec cloison en bauge. De tels résultats nous incitent à penser qu'une maison dont toutes les cloisons intérieures seraient faites en bauge pourrait présenter des résultats environnementaux encore plus favorables.

De plus, au niveau du calcul de la consommation annuelle pour le chauffage, il apparaît que celle avec cloison en bauge est légèrement inférieure à celle sans cloison en bauge. La différence n'est pas énorme, mais elle ne concerne qu'une seule cloison : rapporté à toutes les cloisons de la maison, cela pourrait peut-être, au final, induire une différence significative.

Même s'il n'est pas très conséquent au départ, ce gain au niveau de la consommation annuelle de chauffage peut tout de même s'avérer très important, lorsque l'on sait que la consommation totale de chauffage sur toute la durée de vie du bâtiment intervient pour presque 50 % de l'impact GWP total et pour environ 35 % de l'impact CED total.

En plus de ces impacts liés à la consommation de chauffage, si on tient compte de ceux liés à la consommation en électricité, il apparaît que la phase d'utilisation du bâtiment induit près de 90 % des impacts environnementaux totaux. Ainsi, si l'on veut que cela ait un impact significatif sur les résultats totaux du bâtiment, c'est à cette phase qu'il faudra apporter des modifications.

## IX. ANALYSE DE SENSIBILITÉ

Nous allons à présent réaliser une analyse de sensibilité, et ce sur plusieurs points relatifs aux résultats obtenus précédemment.

Le cas de base que nous allons considérer durant cette analyse de sensibilité est la maison acier/trespa. Sur base de ce cas, nous allons procéder à quelques modifications, et ensuite nous comparerons les résultats obtenus sans et avec modifications.

Les points sur lesquels vont porter successivement l'analyse de sensibilité sont les suivants :

- changement de la température de consigne pour le chauffage
- changement des distances de transport
- changement du climat

### IX.1. Changement de la température de consigne pour le chauffage

Pour réaliser l'analyse avec Building Ecodesign Tool, nous avons dû, au niveau de Pleiades, définir différents scénarios, dont un scénario de chauffage de l'air, qui s'exprime en °C.

Pour rappel, la température introduite est la température de consigne pour la mise en route du dispositif de chauffage (si  $t_{air} < t_{consigne} \rightarrow$  mise en route du dispositif de chauffage).

Dans notre analyse, nous nous sommes basés sur la RT 2005 pour déterminer cette température de consigne, que nous avons donc prise égale à 19 °C.

Nous allons maintenant changer cette température de consigne, et voir quels changements cela induit.

Notons qu'il n'y aura aucun changement au niveau des impacts liés à l'embodied energy, mais que les impacts liés à l'opérationnel energy seront eux modifiés.

En effet, modifier la température de consigne va avoir pour effet de modifier la demande annuelle de chauffage pour la maison étudiée.

Les nouvelles températures de consigne que nous allons considérées sont 18°C et 20°C, soit 1°C en moins et en plus de la température de consigne du cas de base.

La figure suivante présente les demandes de chauffage, en kWh/m<sup>2</sup>/an pour les 3 températures de consigne étudiées :

## Demande de chauffage [kWh/m<sup>2</sup>/an]

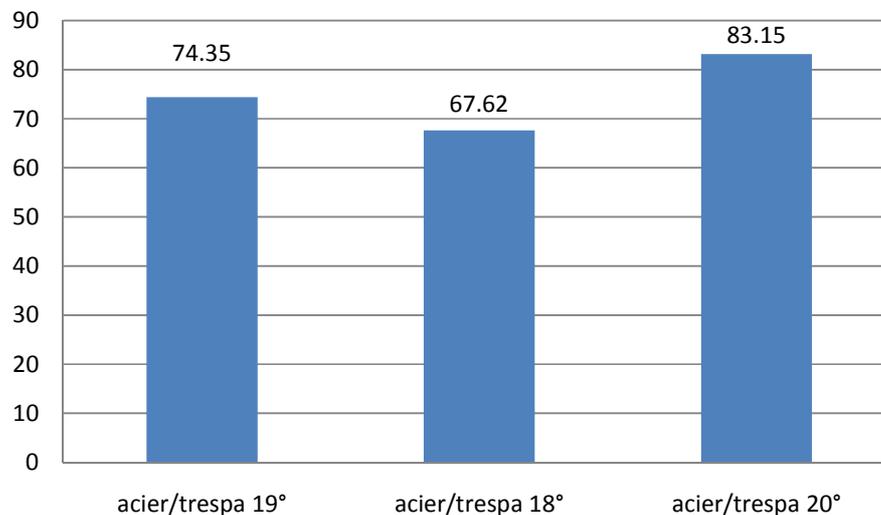


Figure 95 : Demandes de chauffage pour les 3 températures de consigne étudiées

Ainsi, en diminuant la température intérieure de la maison de 1°C, on diminue la demande de chauffage de presque 10 %. De même, en augmentant la température intérieure de la maison de 1°C, on augmente cette fois la demande de chauffage de presque 12 %.

En terme de coût, cela donne :

- prix au kWh : 0,0974 € (valeur Electrabel sans tenir compte de la redevance annuelle)
- 18°C : économie d'environ 75 € par an par rapport à 19°C
- 20°C : dépense supplémentaire de presque 100 € par an par rapport à 19°C

Au vu de ces écarts de prix, et ce pour seulement 1°C de différence (surtout entre 19 et 20°C), il y a tout intérêt à baisser la température de consigne à l'intérieur de la maison, et de mettre un pull supplémentaire !!

Au niveau des impacts environnementaux totaux, il apparaît que ces changements de température ne modifient pas de manière trop significative les résultats :

- GWP : changement de 1°C modifie la valeur d'environ 5 %
- CED : changement de 1°C modifie la valeur d'environ 3 %

Ces pourcentages correspondent bien à ce que nous nous attendions à avoir. En effet, la demande en chauffage contribuant respectivement pour 50 % et 35 % aux impacts GWP et CED totaux (cf. Figure 88), une augmentation de l'ordre de 10 % de cette demande induirait une augmentation au niveau des impacts totaux de l'ordre de 5 % et 3,5 %.

### GWP total [kg CO2 eq]

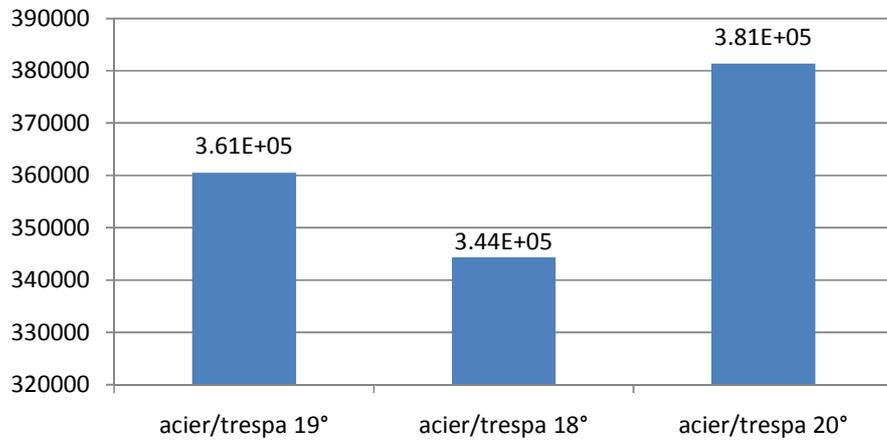


Figure 96 : Comparaison de l'impact GWP total avec changement de la température de consigne

### CED total [MJ eq]

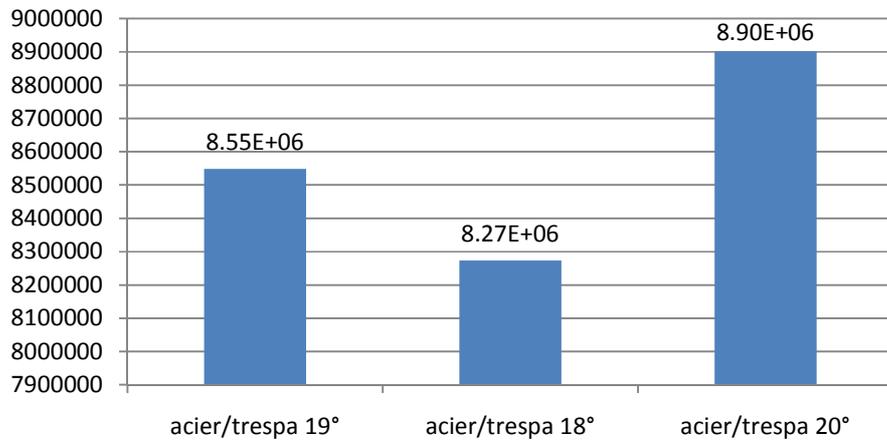


Figure 97 : Comparaison de l'impact CED total avec changement de la température de consigne

Il faut noter à ce niveau que bien que le fait de changer le scénario de chauffage de l'air n'apporte pas des changements très significatifs sur les impacts totaux, il n'en serait sûrement pas de même si nous décidions de modifier un autre scénario : celui d'occupation par exemple.

## IX.2. Changement des distances de transport

Comme nous l'avons observé précédemment, avec les distances que nous avons considérées au niveau des transports, ceux-ci n'interviennent que de façon minimale dans les résultats globaux pour toute la durée de vie du bâtiment (même pas de l'ordre de 1 %).

Pour rappel, les distances considérées sont :

- 75 *km* pour la distance moyenne séparant les distributeurs de matériaux et le site de construction de la maison
- environ 15 *km* pour la distance séparant le site de construction de la maison des différents « centres de fin de vie des matériaux » (recyclage acier, incinérateur et C.E.T.)

Toutefois, ces distances sont des approximations des distances réelles de transport. En effet, ces distances sont les distances « directes » entre le site de construction de la maison et les différents distributeurs/centres de fin de vie. Or, il ne paraît pas très vraisemblable qu'un simple particulier se charge lui-même d'aller acheter chez les distributeurs tous les matériaux nécessaires à la construction de sa maison, ou encore qu'il aille lui-même déposer les matériaux résultants de la démolition de sa maison aux différents centres de fin de vie (surtout celui concernant l'acier). Non, tous ces transports se font par l'intermédiaire de différentes sociétés/entreprises, qui ne sont sûrement pas basées juste à côté du site de construction de la maison et donc qui font faire des « détours » aux divers matériaux lorsqu'ils sont transportés.

Nous allons donc refaire le calcul des impacts totaux, mais cette fois en considérant des distances plus grandes :

- 150 *km* pour la distance séparant les distributeurs de matériaux et le site de construction de la maison
- 50 *km* pour la distance séparant le site de construction de la maison des différents « centres de fin de vie des matériaux »

Les 2 figures suivantes présentent le résultat obtenu pour les 2 impacts considérés.

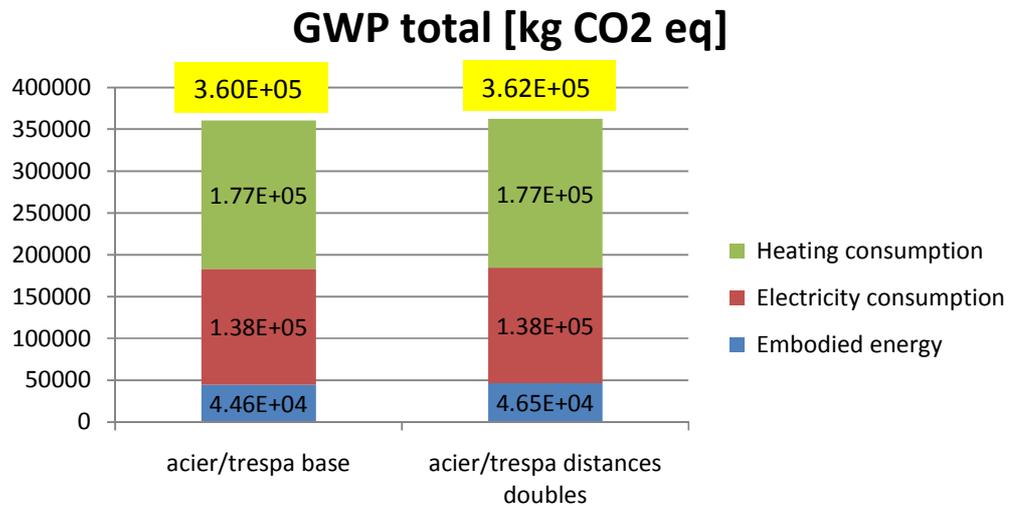


Figure 98 : Comparaison de l'impact GWP total avec changement des distances de transport

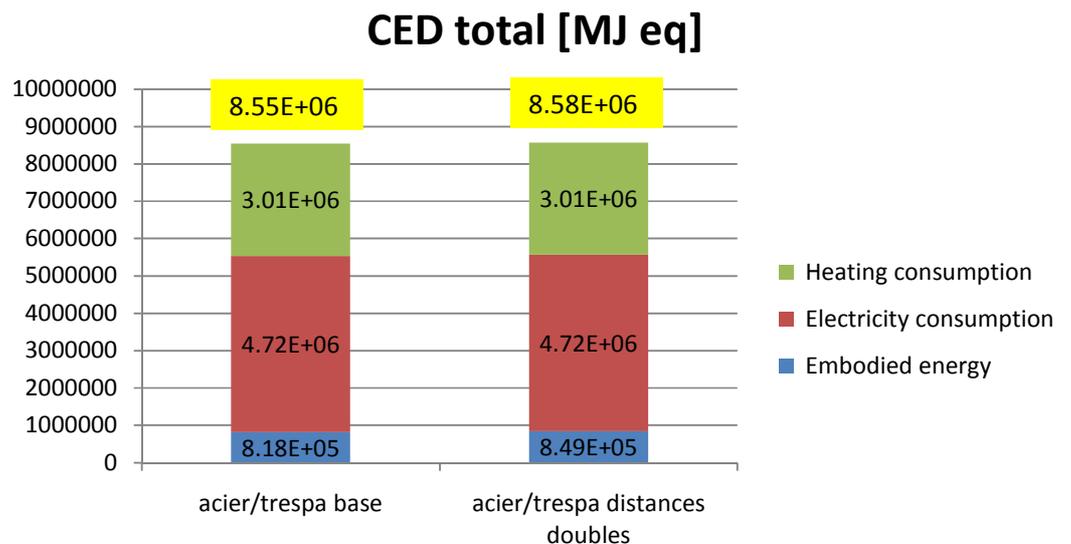


Figure 99 : Comparaison de l'impact GWP total avec changement des distances de transport

Pour le GWP et le CED, ce sont bien uniquement les impacts relatifs à l'embodied energy qui sont modifiés par l'augmentation des distances de transport ; les impacts pour l'operationnal energy ne sont en rien modifiés :

- GWP :
  - embodied energy : augmentation de 4 % de la valeur
  - total : augmentation de 0,5 % de la valeur

- CED :
  - embodied energy : augmentation de 4 % de la valeur
  - total : augmentation de 0,4 % de la valeur

Ainsi, le doublement des distances de transport induit des modifications d'impacts totaux totalement négligeables !!

Nous pouvons donc dire que, le fait d'approximer grossièrement les distances de transport n'ayant pas de conséquences importantes sur les résultats finaux, nous pourrions nous permettre sans trop de problème de faire ces simplifications.

### **IX.3. Changement du climat**

Jusqu'à présent, nous avons effectué tous nos calculs pour une maison située dans la commune de Liège, en considérant les informations sur le climat de la station météorologique d'Uccle.

Nous décidons à présent de changer le site de construction de la maison, ce qui revient, dans l'absolu, à changer le climat.

Les nouveaux sites de construction que nous allons considérer sont Ostende et Nice (sud de la France).

Le changement du climat implique différentes choses :

- changement de la station météorologique dont on tire les données sur le climat
- changement des distances de transport
- changement du mix électrique si pays différent
- changement de la technologie pour le chauffage en fonction de ce qui est le plus courant dans la nouvelle région considérée
- changement des compositions des parois : en fonction du pays ou même de la région, la réglementation thermique en vigueur peut être différente et donc les épaisseurs d'isolation à mettre en place au niveau des parois aussi
- changement des scénarios : en fonction de la région, une climatisation peut éventuellement être requise

Nous n'allons cependant pas effectuer tous ces changements pour les 2 nouveaux sites de construction envisagés : nous décidons de conserver le même bâtiment, avec les mêmes compositions de parois déterminées précédemment.

Au niveau du site de construction Ostende, les résultats que nous obtiendrons tout en faisant ce choix ne seront pas très différents de ceux que nous aurions eus réellement ; en effet, la réglementation thermique en vigueur en Flandre est également la réglementation PEB, bien qu'elle soit légèrement différente.

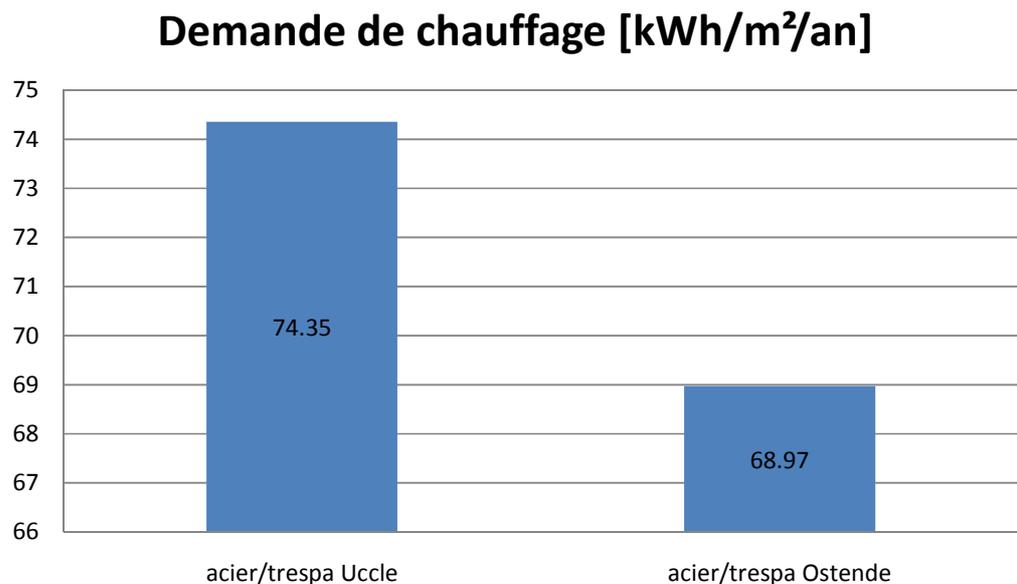
Au niveau du site de construction Nice, il faudrait effectivement changer les compositions des parois, parce que la réglementation en vigueur à cet endroit est la RT 2005, qui est très différente de la PEB. Cependant, définir de nouveau les compositions de parois, cette fois en se référant non plus à la PEB mais bien à la RT 2005, serait non seulement un travail considérable, pouvant faire l'objet d'un autre TFE à lui tout seul (comparaison des réglementations thermiques en vigueur en Belgique et en France), mais en plus, cela n'est pas l'objet de ce travail-ci en lui-même. Nous allons donc faire la simplification de considérer les mêmes compositions de parois.

### IX.3.1. Ostende

- la station météorologique considérée est celle d'Ostende
- nous considérons des distances de transport plus importantes : 150 km et 100 km entre le site de construction et respectivement les distributeurs de matériaux et les « centres de fin de vie »
- mix électrique inchangé : celui relatif à la Belgique
- même technologie de chauffage : chaudière gaz à condensation dont la puissance maximale est de 13 kW
- changement des scénarios : NON car pas de climatisation considérée

La figure suivante représente la comparaison des demandes de chauffage pour les 2 sites de construction Uccle et Ostende.

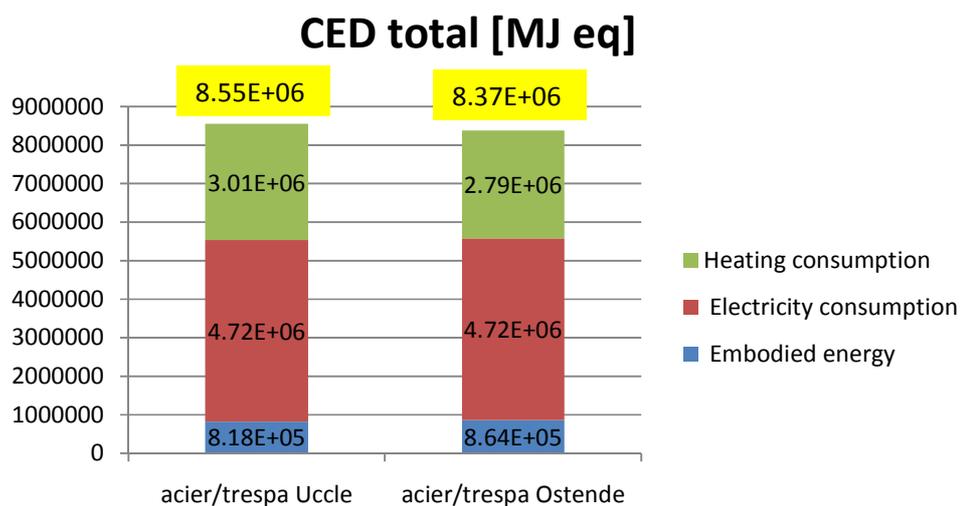
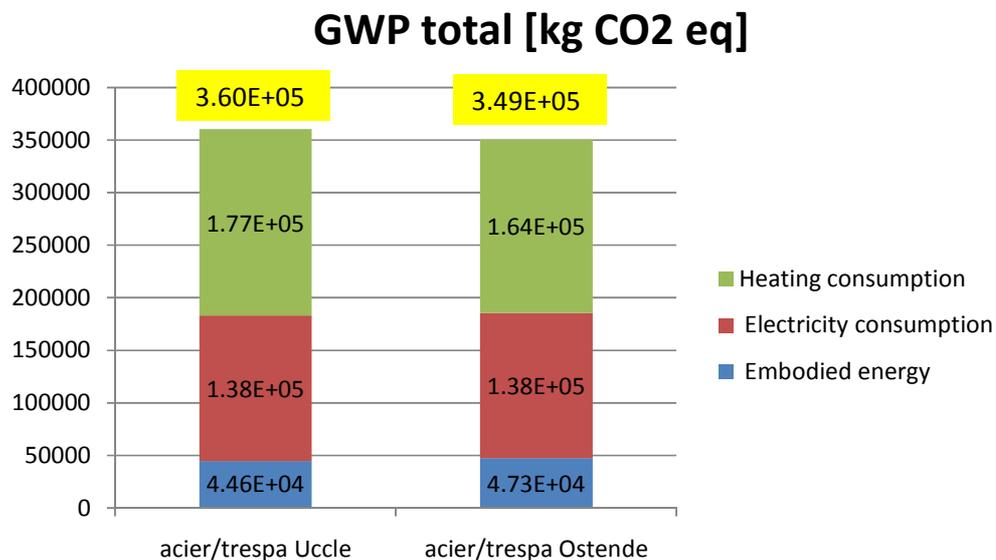
Cette demande diminue d'environ 7 % en considérant Ostende comme site de construction.



**Figure 100 : Demande de chauffage pour les 2 sites de construction Uccle et Ostende**

Au niveau des impacts GWP et CED totaux, la figure suivant présente les résultats obtenus :

- impacts liés à l'embodied energy légèrement supérieurs pour Ostende car distances de transport plus grandes
- GWP et CED : diminution des valeurs totales de l'ordre de 3 %



**Figure 101 : Comparaison des impacts GWP et CED totaux avec changement du climat Ostende**

Ainsi, le fait de changer le climat, tout en restant dans le même pays (et en conservant la même technologie de chauffage), n'induit pas des modifications très importantes au niveau des impacts totaux ; ces modifications sont négligeables.

### IX.3.2. Nice

Nous allons à présent traiter le cas du site de construction à Nice (sud de la France). Voici les changements à effectuer :

- la station météorologique considérée est celle de Nice
- nous considérons des distances de transport encore plus importantes que dans le cas d'Ostende (la France est un pays plus grand que la Belgique) : 300 km et 100 km entre le site de construction et respectivement les distributeurs de matériaux et les « centres de fin de vie »
- mix électrique changé : celui relatif à la France
- même technologie de chauffage : chaudière gaz à condensation dont la puissance maximale est de 13 kW
- changement des scénarios : OUI car nous considérons une climatisation ; nous fixons la valeur de consigne de celle-ci à 25°C : le dispositif de climatisation se met en route dès que la température intérieure devient > 25°C

La figure suivante représente la comparaison des demandes de chauffage/climatisation pour les 2 sites de construction Uccle et Nice.

Bien qu'on ait la présence d'un dispositif de climatisation, la demande liée au chauffage/climatisation pour Nice est inférieure à celle pour Uccle, de 34 %.

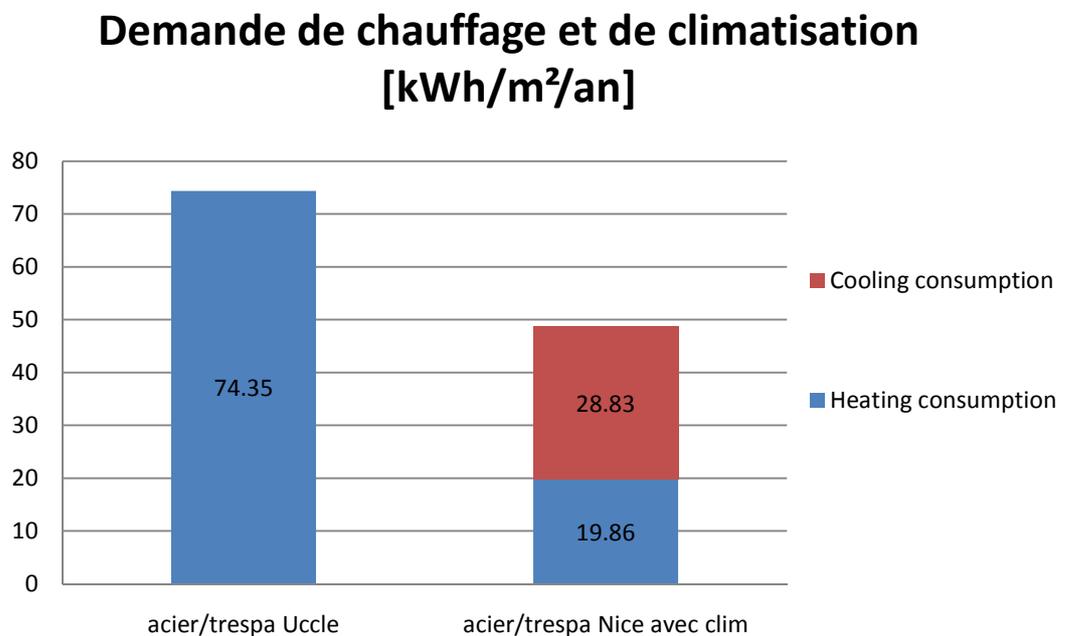
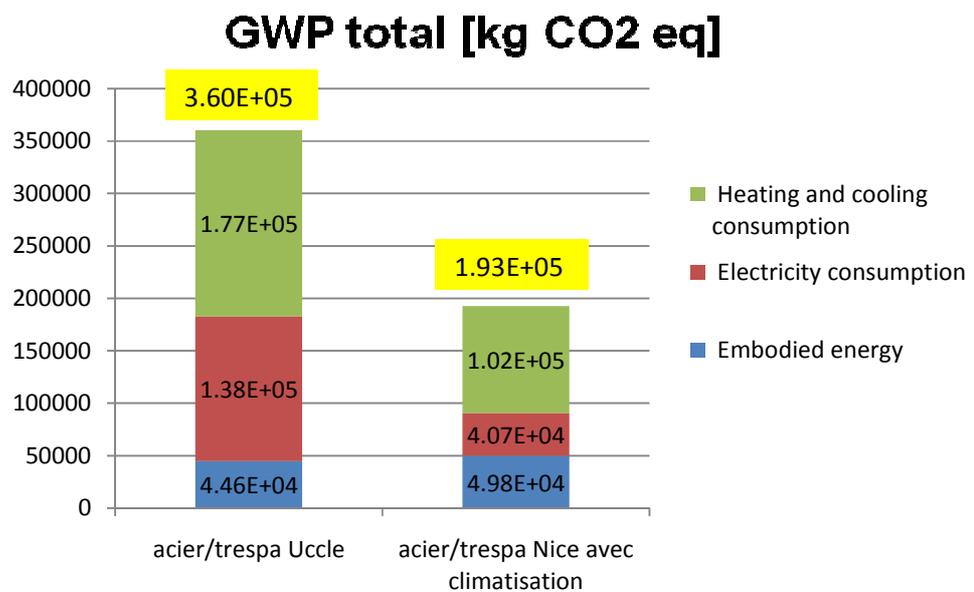


Figure 102 : Demande de chauffage et de climatisation pour les 2 sites de construction Uccle et Nice

Au niveau des impacts GWP et CED totaux, la figure suivant présente les résultats obtenus :

- impacts liés à l'embodied energy légèrement supérieurs pour Nice car distances de transport plus grandes
- GWP : diminution de la valeur totale de l'ordre de 46 %
  - diminution de la valeur liée à la consommation de chauffage/climatisation de 42 %, car diminution de la demande
  - diminution de la valeur liée à la consommation d'électricité de 70 % car changement du mix électrique
- CED : diminution de la valeur totale de l'ordre de 7 %
  - diminution de la valeur liée à la consommation de chauffage/climatisation de 40 %, car diminution de la demande
  - augmentation de la valeur liée à la consommation d'électricité de 9 % car changement du mix électrique



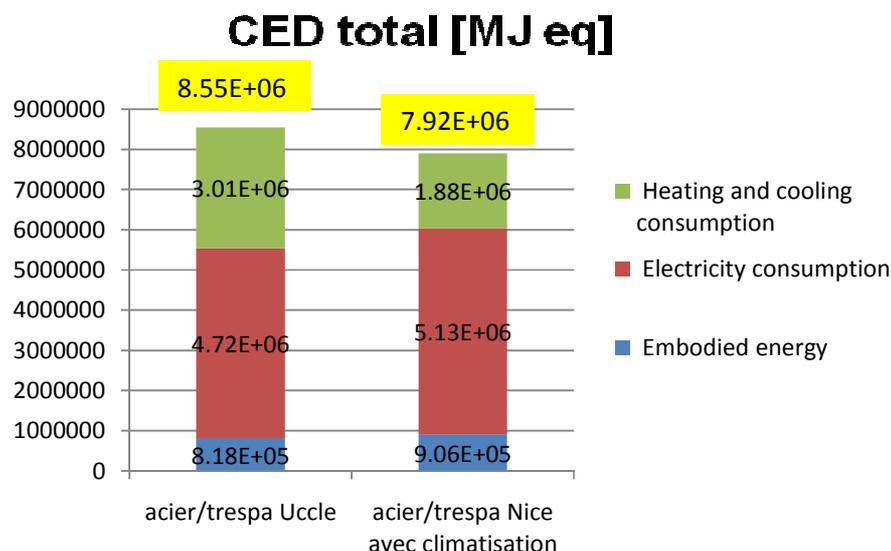


Figure 103 : Comparaison des impacts GWP et CED totaux avec changement du climat Nice

Ainsi, le fait de changer le climat, dans ce cas-ci, implique de grands changements, tant du point de vue des impacts totaux que des impacts relatifs à chaque phase.

Les diminutions des valeurs relatives à la consommation de chauffage/climatisation sont tout simplement dues au fait que la demande est bien moindre dans le cas de Nice.

Au niveau des variations de valeurs relatives à la consommation d'électricité, celles-ci sont dues au changement de l'électricity mix. Le tableau suivant présente les electricity mix pour la Belgique et la France :

Origin of Electricity	Unit	GWP (kg CO2 eq/Unit)	CED (MJ eq/Unit)
France	<i>kWh</i>	0.11	13.57
Belgium	<i>kWh</i>	0.37	12.49

Tableau 51 : Electricity mix pour la Belgique et la France (source : Ecolinvent)

La différence principale au niveau des valeurs de l'électricity mix des 2 pays se situe au niveau de l'impact GWP pour la production de 1 *kWh* d'électricité : il est plus de 3 × plus grand en Belgique qu'en France.

Cela s'explique par le fait que l'électricité, en France, est principalement produite par l'énergie nucléaire – 77 % en se référant à la Figure 104 – qui est un moyen de production induisant peu d'impacts GWP (cf. Figure 106) tandis que les énergies fossiles (très émettrices en CO2) n'ont qu'une part de production de 10 %.

En Belgique par contre, 40 % de l'électricité est encore produite par les énergies fossiles, avec également 55 % pour l'énergie nucléaire. L'impact GWP pour la production de 1 kWh est donc beaucoup plus important en Belgique qu'en France.

### Pourcentages des différents moyens de production d'électricité pour la France en 2007

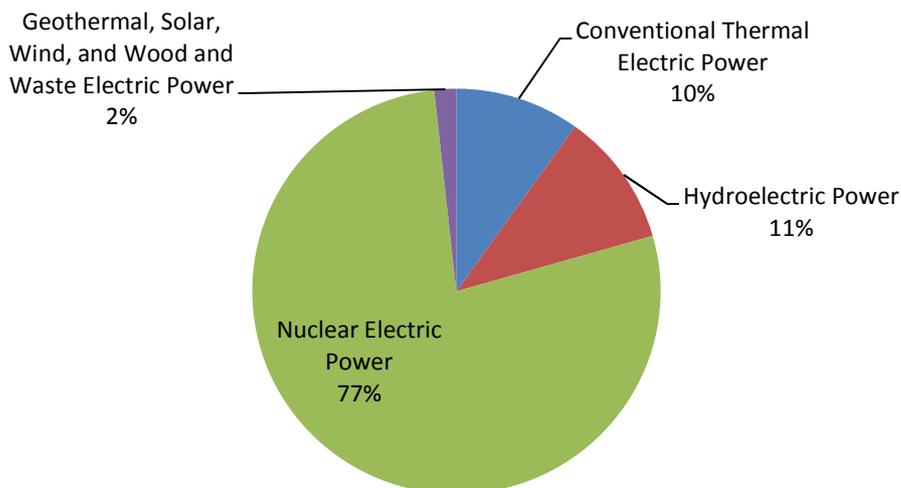


Figure 104 : Pourcentages des différents moyens de production d'électricité pour la France en 2007 (source : <http://www.eia.doe.gov/>)

### Pourcentages des différents moyens de production d'électricité pour la Belgique en 2007

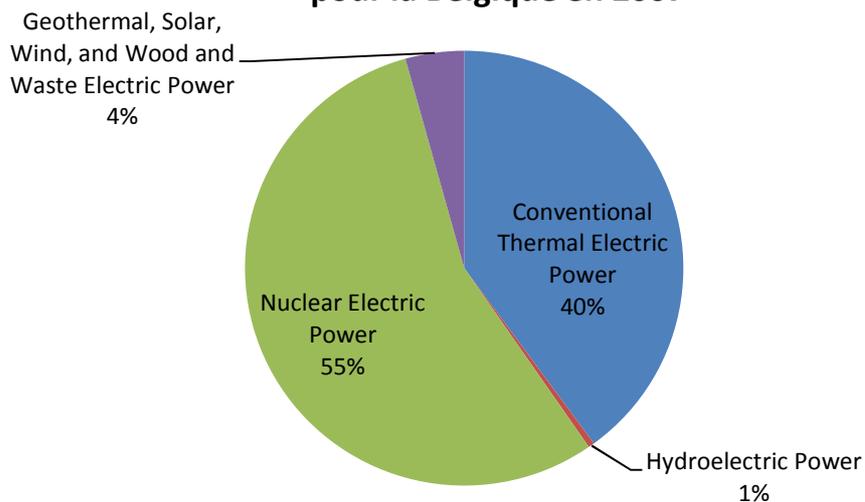


Figure 105 : Pourcentages des différents moyens de production d'électricité pour la Belgique en 2007 (source : <http://www.eia.doe.gov/>)

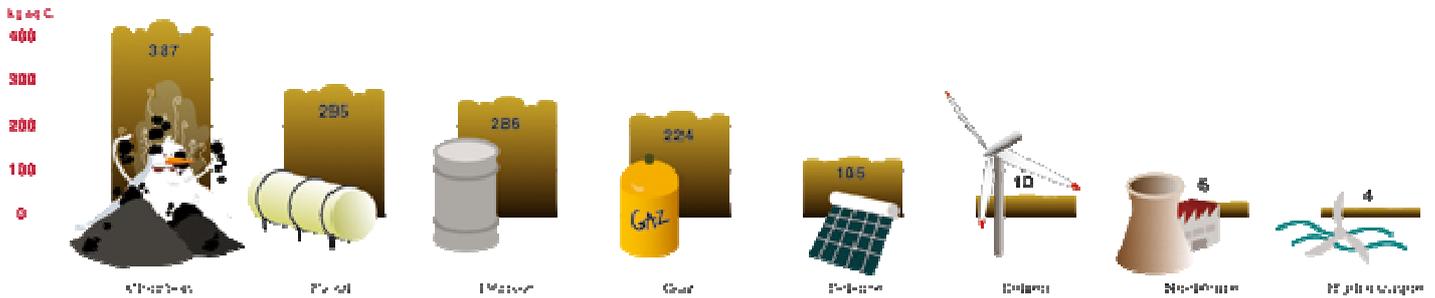
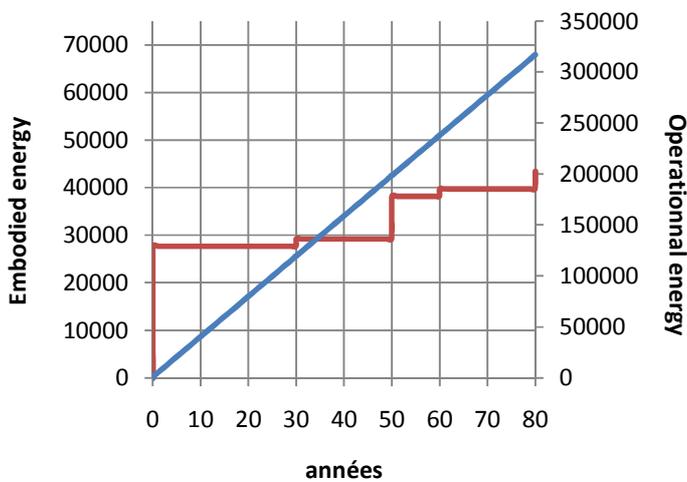


Figure 106 : Ecart des émissions de CO2 entre différentes sources, pour produire la même quantité d'énergie (4000 kWh ici) – unité : kg C eq = 3,7 kg CO2 eq (source : <http://www.mountain-riders.org>)

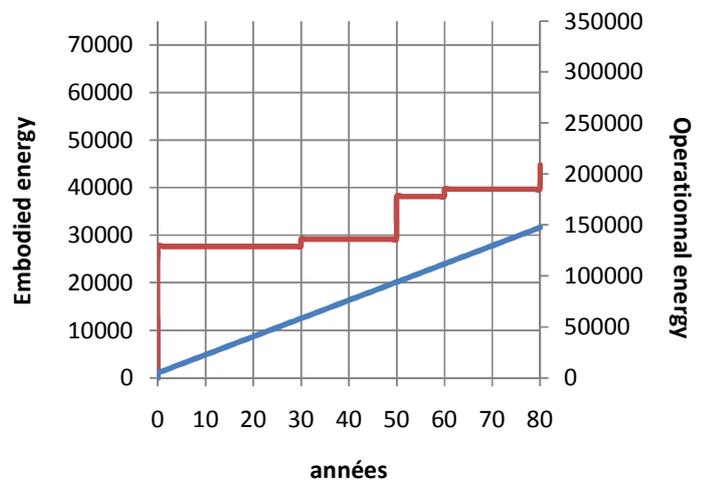
Comme nous l'avons fait précédemment pour les 6 cas étudiés, nous pouvons tracer l'évolution du GWP et du CED au cours de la vie du bâtiment.

**GWP maison acier/trespa Uccle**  
[kg CO2 eq]



— embodied energy — operationnel energy

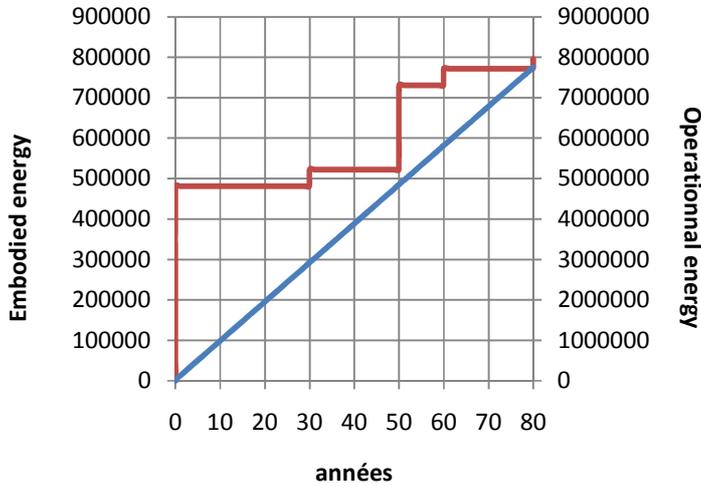
**GWP maison acier/trespa Nice**  
[kg CO2 eq]



— embodied energy — operationnel energy

**CED maison acier/trespa Uccle**

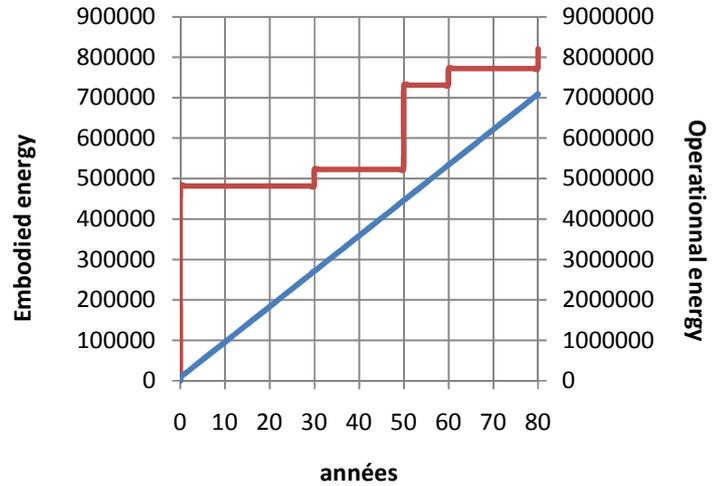
[MJ eq]



— embodied energy — operationnal energy

**CED maison acier/trespa Nice**

[MJ eq]



— embodied energy — operationnal energy

**Figure 107 : Evolution des GWP et CED au cours de la vie du bâtiment pour les 2 sites de construction Uccle et Nice**

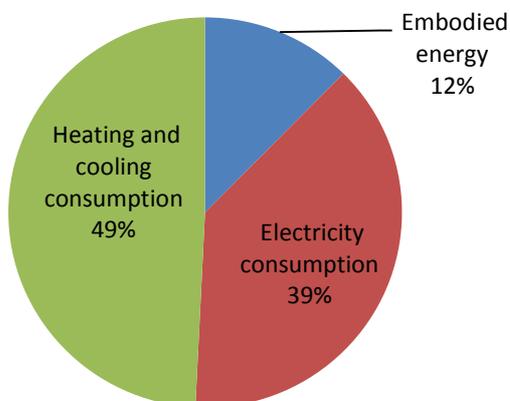
En mettant les mêmes échelles pour les 2 graphiques (relatifs aux 2 sites de construction Uccle et Nice), on remarque bien, dans le cas du GWP, que l'impact relatif à l'operationnal energy est beaucoup plus faible pour Nice que pour Uccle – tandis que celui relatif à l'embodied energy est presque identique pour les 2 sites. Dans le cas du CED, on note également bien que l'impact lié à l'operationnal energy est légèrement plus faible pour Nice que pour Uccle, comme nous l'avons déjà remarqué sur les graphiques précédents.

Un dernier graphique que nous pouvons tracer est celui donnant la contribution aux 2 impacts totaux, en pourcents, de chaque phase de du cycle de vie.

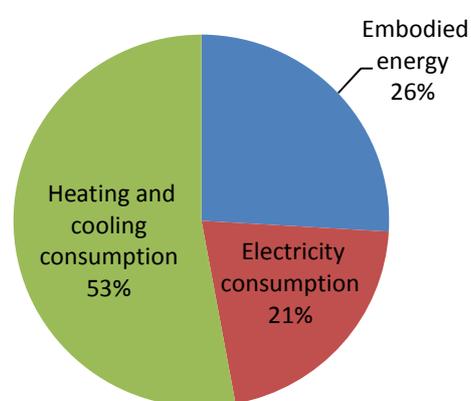
Sur ce graphique, nous pouvons observer que l'embodied energy contribue dans le cas de Nice à 26 % de l'impact GWP total, alors qu'elle ne participait dans le cas d'Uccle qu'à 12 %. Cela est dû au fait que la part relative à la consommation d'électricité est beaucoup plus faible pour Nice, vu l'electricity mix.

Concernant le CED, la part relative à la consommation d'électricité est plus importante pour Nice que pour Uccle : elle passe de 55 % à 65 %.

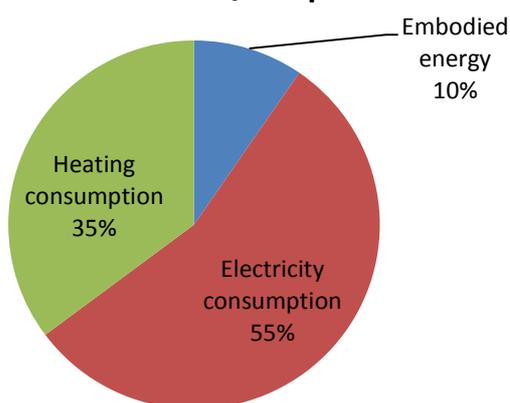
### GWP maison acier/trespa Uccle



### GWP maison acier/trespa Nice



### CED maison acier/trespa Uccle



### CED maison acier/trespa Nice

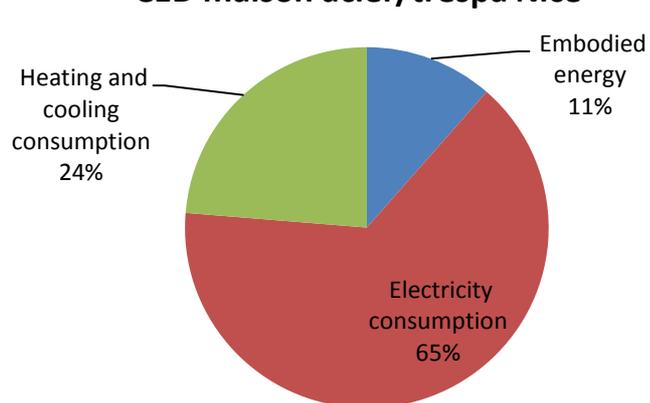


Figure 108 : Répartition des impacts GWP et CED par phases du cycle de vie pour la maison acier/trespa à Uccle et à Nice

Ainsi, comme annoncé précédemment, nous pouvons dire que le fait de changer de pays pour la construction du bâtiment et donc de changer l'électricité mix considéré modifie de manière plus ou moins importante les impacts liés à la consommation d'électricité – ainsi que ceux liés à la consommation de chauffage/climatisation si le climat extérieur est fort différent d'un site de construction à l'autre.

Or, la phase d'utilisation ayant une contribution importante aux impacts totaux, ceux-ci peuvent se trouver considérablement modifiés selon le pays où le bâtiment est construit.

De plus, les contributions de chaque phase du cycle de vie aux impacts totaux seront également différentes. Notons que ces observations sont bien les mêmes que celles trouvées dans les articles traitant du sujet.

## X. CONCLUSION GÉNÉRALE

Le but recherché dans ce travail de fin d'études était de réaliser les analyses de cycle de vie de plusieurs alternatives d'un même bâtiment, et de comparer les résultats obtenus.

Concernant le bâtiment étudié, il s'agit d'une maison unifamiliale construite dans la commune de Liège ayant une surface de plancher chauffé de  $115,2 m^2$ .

Les différentes alternatives du bâtiment que nous avons considérées sont :

- maison à structure acier et parement avec des panneaux Trespa
- maison à structure acier et bardage acier
- maison à structure acier et parement en briques
- maison à structure portante mixte acier/maçonnerie et parement en briques
- maison traditionnelle (maçonnerie, hourdis, fermes en bois)
- maison à structure acier et parement avec des panneaux Trespa sans cloison intérieure faite en bauge

Pour chacun de ces cas, nous avons déterminé la composition des parois, et surtout les épaisseurs d'isolants à mettre en place, pour que le bâtiment réponde à la certification énergétique PEB en vigueur en Belgique.

Il résulte de ces compositions de parois que, pour les 3 premiers cas étudiés (ceux-ci étant identiques, sauf en ce qui concerne la peau du mur extérieur), l'épaisseur d'isolant à mettre en place au niveau du mur extérieur dans le cas du parement en briques est légèrement inférieure à celle pour les 2 autres cas, la résistance thermique de la brique étant meilleure que celle du panneau Trespa ou encore de l'acier. Cette épaisseur peut encore être diminuée dans le cas de la structure mixte acier/maçonnerie, n'ayant plus le problème des ponts thermiques liés à la structure portante ponctuelle des murs extérieurs.

Ensuite, nous avons réalisé les analyses de cycle de vie pour les différents cas ; les résultats sont fournis sous forme de 2 indicateurs : le Global Warming Potential (GWP), qui est l'indicateur le plus représentatif du changement climatique, et le Cumulative Energy Demand (CED), qui représente la consommation d'énergie directe et indirecte tout au long du cycle de vie (du berceau à la tombe).

Ainsi, nous avons constaté, au vu des résultats obtenus, que c'est la maison avec structure portante en acier et parement en briques qui produit le moins d'impacts environnementaux.

Premièrement, en comparaison avec les deux autres parements, c'est le bardage brique qui présente les impacts environnementaux les plus faibles pour toute la durée de vie du bâtiment. Cela est dû en partie au fait que c'est le seul des 3 bardages qui ne nécessite pas de remplacement au cours de la vie du bâtiment.

Ensuite, concernant la structure portante, la comparaison des résultats avec les cas des maisons mixte acier/maçonnerie et traditionnelle montre bien que c'est la structure « complète » acier qui induit le moins d'impacts, cette observation étant identique à celle trouvée dans les articles portant sur le sujet.

Enfin, la comparaison des résultats entre les 2 cas de maison acier/trespa nous permet d'affirmer que la cloison en bauge a un effet favorable sur les valeurs d'impacts. Ainsi, nous pouvons en conclure que c'est bien la maison acier/brique avec cloison en bauge qui est la meilleure du point de vue des 2 impacts étudiés.

Il faut cependant noter que, bien que ce soit effectivement la maison acier/brique qui présente le moins d'impacts environnementaux, les différences par rapport aux autres cas, en terme d'impacts totaux, ne sont toutefois pas énormes (de l'ordre de 0,5 – 5 %).

Les différences sont plus significatives lorsque l'on regarde en terme d'impacts liés à l'embodied energy. En effet, dans ce cas, les différences sont de 6 – 40 % pour le GWP et de 6 – 31 % pour le CED.

Ces différences transparaissent peu au niveau des résultats totaux suite au fait que l'embodied energy ne contribue à ces impacts que pour environ 10 %, les 90 % restants étant dus à la phase d'utilisation. Notons au passage que ces pourcentages correspondent bien à ceux trouvés dans les divers articles étudiés.

Ainsi, si ces pourcentages étaient modifiés, les différences entre les valeurs des impacts totaux pour les 6 cas étudiés le seraient également, pouvant dès lors être plus significatives.

Comme nous l'avons vu lors de l'analyse de sensibilité, une chose qui pourrait modifier ces pourcentages est l'electricity mix considéré. Celui-ci est propre à chaque pays, et reflète les impacts liés à la production d'1 kWh d'électricité. Un electricity mix différent modifie les impacts liés à la production d'électricité et donc les impacts liés à la phase d'utilisation. Les impacts totaux se trouvent dès lors également modifiés.

Dans notre analyse de sensibilité, nous avons fait l'étude de notre bâtiment pour le sud de la France. Le fait de changer de pays a fait passer la contribution de la phase d'utilisation à l'impact total GWP de 90 % à 75 %, et celle de la phase liée à l'embodied energy de 10 % à 25 %.

Notons que de tels résultats ne sont pas dus uniquement au changement de l'electricity mix. En effet, en changeant de site de construction, le climat est également modifié ce qui induit une demande en chauffage différente et donc des impacts pour la phase d'utilisation différents.

La modification des pourcentages des différentes phases avec le site de construction a également été observés dans les articles étudiés portant sur le sujet.

Pour tous les cas étudiés dans ce travail, la phase du cycle de vie du bâtiment induisant les impacts les plus importants a toujours été la phase d'utilisation. Cela est tout à fait compréhensible vu que c'est de loin la phase la plus longue du cycle de vie complet du bâtiment. C'est donc au niveau de cette phase qu'il faudra essayer d'apporter des améliorations pour diminuer l'impact global d'un bâtiment et donc, par extension, diminuer l'impact lié au secteur du bâtiment.

Dans cette optique, il faudra autant que possible encourager l'utilisation des énergies renouvelables pour la production de chauffage, d'eau chaude sanitaire et d'électricité : mise en place de panneaux solaires, photovoltaïques, système géothermique (pompe à chaleur / puits canadien), chauffage au bois.

Mieux encore, il faudra encourager les conceptions de bâtiment dans l'optique d'une architecture bioclimatique car, si celle-ci est correctement réalisée, elle permet de faire des économies d'énergie de l'ordre de 30 à 50 % et tout cela pour un surcoût très faible. En effet, il suffit juste, lors de la conception du bâtiment, de veiller à respecter certaines règles architecturales bien précises (position des ouvertures, matériaux isolants, matériaux accumulateurs, espaces tampons, protection des vents dominants...).

Pour finir, attardons-nous un instant sur le cas de la maison traditionnelle. Il apparaît clairement, au vu des résultats, que dans l'état (c'est-à-dire avec les matériaux considérés), la maison traditionnelle n'est pas du tout « compétitive » d'un point de vue environnemental, par rapport aux autres maisons étudiées. Les valeurs élevées de GWP et CED que l'on obtient semblent dues principalement à l'utilisation, pour le premier indicateur, de fermes en bois plutôt qu'en acier, tandis que pour le second indicateur, cela serait plutôt dû à l'emploi de polystyrène expansé à la place de laine de bois comme isolant principal.

La maison traditionnelle est pourtant, comme son nom l'indique, la maison la plus souvent construite en Belgique, et cela n'est pas prêt de changer. En effet, ce n'est pas encore entré dans les mœurs de construire sa maison avec une ossature portante en acier.

Ainsi, pour diminuer l'impact environnemental des maisons construites, nous devons non pas jouer sur la structure portante mais bien sur les matériaux utilisés, si on veut que cela soit réalisé en pratique. Ainsi, en regard à ce qui a été dit plus haut, nous pourrions par exemple utiliser comme isolant de la laine de bois – ou tout autre isolant minéral – dont l'impact est nettement moindre par rapport au polystyrène expansé. Notons toutefois que ce genre d'isolant est légèrement moins efficace (valeur de  $\lambda$  plus élevée) et donc, pour obtenir les mêmes caractéristiques thermiques, il faudrait mettre en place une épaisseur plus importante ; mais malgré cela, l'impact serait quand même bien inférieur.

Le problème relatif à une telle substitution est que ce genre d'isolant coûte légèrement plus cher que l'isolant habituel/polystyrène expansé. Il n'est donc pas sûr que les personnes acceptent un tel échange, cela ne leur apportant qu'une dépense supplémentaire et aucun bénéfice direct.

Il faut toutefois bien se dire que la préservation de l'environnement doit être l'affaire de tous. C'est l'action combinée des petits gestes de tout un chacun qui va conduire à cette préservation : déboursier quelques euros de plus pour construire sa maison ou bien encore baisser la température de chauffage d' 1°C,...

Nous pouvons très bien dire aux gens ce qu'ils doivent faire (en cela aidés par des outils comme l'ACV), mais nous ne pouvons pas les obliger à le faire... La question est donc : les gens sont-ils prêts à faire ces quelques gestes ?

## XI. PERSPECTIVES

Lors de la réalisation de ce TFE, nous avons fait plusieurs hypothèses. Or, ces hypothèses pourraient être sources non pas d'erreurs, mais plutôt d'un manque de précision dans les résultats obtenus. Il serait alors peut-être judicieux d'approfondir ce travail en essayant de remplacer ces hypothèses.

La première imprécision qui apparaît dans ce travail se situe au niveau du calcul du  $U$  des parois. En effet, nous n'avons tenu compte des ponts thermiques qu'au niveau de la structure porteuse des murs, si celle-ci était ponctuelle. Il existe cependant d'autres ponts thermiques (plancher bas sur terre-plein, entre 2 murs, plancher haut, menuiseries) que nous n'avons pas pris en compte dans nos calculs. Les valeurs réelles des  $U$  doivent donc être supérieures à celles que nous avons considérées dans ce travail. De plus, même au niveau des  $U$  des parois avec structure ponctuelle, pour lesquelles nous avons tenu compte des ponts thermiques, rien ne permet d'affirmer que les résultats fournis par le logiciel Therm soient tout à fait corrects.

Ensuite, au niveau du calcul des impacts environnementaux liés à la phase de fin de vie des matériaux, nous avons fait une simplification assez importante en considérant que tous les matériaux (sauf l'acier) étaient soit mis en décharge soit incinérés. Dans la pratique, ce n'est pas du tout comme cela que ça se passe. Il serait alors intéressant de refaire l'analyse réalisée dans ce travail, mais cette fois en considérant pour chaque matériau un scénario de fin de vie réaliste.

Plusieurs suites pourraient être envisagées pour ce travail.

Premièrement, comme nous l'avons expliqué lors de l'analyse de sensibilité, une suite à ce travail pourrait être de reprendre le bâtiment étudié dans ce TFE, mais de refaire toute l'analyse concernant la détermination des compositions des parois, en considérant cette fois une autre certification énergétique (la RT 2005 française par exemple). Cela permettrait de faire une comparaison entre la réglementation thermique belge (PEB) et cette autre réglementation considérée. Notons toutefois que si on pousse l'analyse jusqu'à refaire l'ACV du « nouveau » bâtiment, une autre réglementation implique un autre pays et donc un autre mix énergétique. Il faudrait donc être prudent au moment de l'analyse des résultats.

Ensuite, lors de la phase d'inventaire du cycle de vie, nous avons considéré pour chaque matériau (ou presque) la base de données EcoInvent. Il pourrait être intéressant de refaire l'analyse complète du bâtiment, en considérant cette fois une autre base de données, ce qui permettrait de comparer ces différentes bases de données entre elles.

De plus, les résultats obtenus étant propres aux divers scénarios que nous avons considérés dans Pleiades, on pourrait envisager d'approfondir l'analyse à ce niveau-là, en modifiant les divers scénarios et en regardant ensuite ce que cela implique sur les résultats finaux.

Pour finir, une autre suite à ce travail pourrait être de reprendre toujours ce même bâtiment, mais en y apportant les modifications nécessaires pour qu'il soit passif.

## XII. TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Classification des bâtiments en fonction de la consommation d'énergie primaire (source : <a href="http://www.concept-bio.eu">http://www.concept-bio.eu</a> ) .....	13
Figure 2 : Phases de l'ACV avec approche itérative (source : [11]) .....	15
Figure 3 : Phases de l'ACV d'un bâtiment (source : <a href="http://www.epa.gov">www.epa.gov</a> ) .....	18
Figure 4 : Plan du rez-de-chaussée (longueurs en [cm]) .....	27
Figure 5 : Plan de l'étage (longueurs en [cm]).....	28
Figure 6 : Coupe (longueurs en [cm]) .....	29
Figure 7 : Représentations du vide technique (source : [28]) .....	30
Figure 8 : Représentation 2D du profilé (MULTI)BEAM (source : [28]) .....	30
Figure 9 : Représentation 3D du profilé (MULTI)BEAM (source : [28]) .....	30
Figure 10 : Plan définitif du rez-de-chaussée (longueurs en [cm]).....	31
Figure 11 : Plan définitif de l'étage (longueurs en [cm]) .....	32
Figure 12 : Coupe définitive (longueurs en [cm]) .....	32
Figure 13 : Emboîtement des profilés (source : [28]) .....	35
Figure 14 : Espacement des profilés pour le mur extérieur (source : [28]).....	35
Figure 15 : Panneau de laine de bois 1 (source : <a href="http://www.habitat-ecologique.be">http://www.habitat-ecologique.be</a> ) .....	36
Figure 16 : Panneau de laine de bois 2 (source : <a href="http://www.isolation-et-chauffage.com">http://www.isolation-et-chauffage.com</a> ) .....	36
Figure 17 : Panneau de polystyrène expansé (source : <a href="http://www.polydec.com">http://www.polydec.com</a> ).....	36
Figure 18 : Panneau OSB (source : <a href="http://www.castorama.fr">http://www.castorama.fr</a> ).....	36
Figure 19 : Plaque de plâtre (source : <a href="http://www.gyproc.be">http://www.gyproc.be</a> ) .....	37
Figure 20 : Fixation des panneaux Trespa avec ossature secondaire bois (source : [29]).....	37
Figure 21 : Détail fixation des panneaux Trespa.....	37
Figure 22 : Représentation mur extérieur maison acier/trespa.....	38
Figure 23 : Forme de la toiture (source : <a href="http://philippe.berger2.free.fr/Bois/Cours/Charpentes">http://philippe.berger2.free.fr/Bois/Cours/Charpentes</a> ).....	39
Figure 24 : Ardoise <b>40 cm × 27 cm</b> (source : [30]) .....	39
Figure 25 : Placement des ardoises <b>40 cm × 27 cm</b> par recouvrement double (source : [30]) .....	39
Figure 26 : Eléments acier de forme W (source : [28]).....	40
Figure 27 : Représentation du lattage et du contre-lattage.....	40
Figure 28 : Représentation toiture maison acier/trespa .....	41
Figure 29 : Espacement des profilés pour le plancher intermédiaire (source : [28]) .....	41
Figure 30 : Représentation plancher 1 maison acier/trespa .....	42
Figure 31 : Bac acier de coffrage (source : <a href="http://www.arcelormittal.com">http://www.arcelormittal.com</a> ) .....	42
Figure 32 : Représentation plancher 2 maison acier/trespa .....	43
Figure 33 : Panneau de polyuréthane (source : <a href="http://www.efisol.com">http://www.efisol.com</a> ) .....	44
Figure 34 : Représentation dalle 1 maison acier/trespa .....	44
Figure 35 : Sections de béton de la dalle de sol dans les 2 directions.....	45
Figure 36 : Représentation dalle 2 maison acier/trespa .....	46
Figure 37 : Cloison avec ossature acier et finition en plaques de plâtre (source : <a href="http://www.gyproc.be">http://www.gyproc.be</a> ) .....	46
Figure 38 : Représentation cloison normale maison acier/trespa .....	47

Figure 39 : Représentation cloison bauge maison acier/trespa.....	48
Figure 40 : Profil de la lame de bardage acier – dimensions en <b>mm</b> (source : [32]) .....	48
Figure 41 : Fixation des lames de bardage acier avec lisses acier (source : [32]).....	49
Figure 42 : Représentation mur extérieur maison acier/acier .....	49
Figure 43 : Représentation mur extérieur maison acier/brique .....	50
Figure 44 : Parpaing creux <b>20 × 20 × 50 cm</b> (source : <a href="http://www.sainthimat.com">http://www.sainthimat.com</a> ).....	51
Figure 45 : Représentation mur extérieur maison mixte acier/maçonnerie.....	52
Figure 46 : Représentation toiture maison traditionnelle.....	53
Figure 47 : Hourdis en béton avec chape de compression (source : <a href="http://www.hellopro.fr">http://www.hellopro.fr</a> ) .....	53
Figure 48 : Représentation plancher 1 maison traditionnelle.....	54
Figure 49 : Représentation plancher 2 maison traditionnelle.....	55
Figure 50 : Arbre de décision de la PEB (source : <a href="http://energie.wallonie.be">http://energie.wallonie.be</a> ) .....	57
Figure 51 : Exigences de la PEB pour bâtiments neufs (source : <a href="http://energie.wallonie.be">http://energie.wallonie.be</a> ) .....	58
Figure 52 : Exigences de la PEB pour valeurs <b>U</b> des parois (source : <a href="http://energie.wallonie.be">http://energie.wallonie.be</a> ).....	58
Figure 53 : Valeurs des coefficients <b>Ri</b> et <b>Re</b> en <b>m<sup>2</sup>K/W</b> (source : [36]).....	61
Figure 54 : U pour mur extérieur, avec structure acier, maison acier/trespa, donné par Therm.....	63
Figure 55 : Therm pour mur extérieur maison acier/trespa.....	63
Figure 56 : U pour mur extérieur, sans structure acier, maison acier/trespa, donné par Therm .....	64
Figure 57 : U pour mur extérieur, avec structure acier, maison acier/acier, donné par Therm .....	64
Figure 58 : Therm pour mur extérieur maison acier/acier .....	64
Figure 59 : U pour mur extérieur, avec structure acier, maison acier/brique, donné par Therm .....	65
Figure 60 : Therm pour mur extérieur maison acier/brique .....	65
Figure 61 : U pour toiture, avec structure acier, maison acier/trespa acier/acier acier/brique mixte/maçonnerie, donné par Therm .....	66
Figure 62 : Therm pour toiture maison acier/trespa acier/acier acier/brique et mixte/maçonnerie.....	66
Figure 63 : U pour toiture, avec structure bois, maison traditionnelle, donné par Therm.....	67
Figure 64 : Therm pour toiture maison traditionnelle.....	67
Figure 65 : Création d'un projet PEB (source : [35]).....	72
Figure 66 : Températures moyennes mensuelles à Uccle en °C (source : <a href="http://www.meteo.be">http://www.meteo.be</a> ) .....	73
Figure 67 : Détermination de l'inclinaison des parois (source : [35]).....	74
Figure 68 : Détermination de l'orientation des parois (source : [35]).....	75
Figure 69 : Détermination de la classe de masse thermique (source : [35]).....	76
Figure 70 : Réseaux de gaz naturel en Belgique (source : <a href="http://www.fluxys.com">http://www.fluxys.com</a> ) .....	77
Figure 71 : Coquille isolante de tuyaux (source : <a href="http://www.isover.fr">http://www.isover.fr</a> ).....	78
Figure 72 : Fonctionnement de Building Ecodesign Tool (source : [40]).....	80
Figure 73 : Plan Alcyone RDC.....	83
Figure 74 : Plan Alcyone 1 <sup>er</sup> étage .....	84
Figure 75 : Plan Alcyone toiture .....	85
Figure 76 : Représentation 3D d'Alcyone de la maison étudiée .....	86
Figure 77 : Représentation du pare-soleil de la porte-fenêtre dans Pleiades.....	96
Figure 78 : Résultats de Bees pour le GWP relatif au panneau Trespa (source : [47]).....	102
Figure 79 : Résultats de Bees pour le CED relatif au panneau Trespa (source : [44]) .....	103

Figure 80 : Résumé des exigences pour le bâtiment étudié (source : [35]) .....	109
Figure 81 : Poids total de matériaux des 6 cas étudiés .....	131
Figure 82 : GWP total des 6 cas étudiés .....	132
Figure 83 : CED total des 6 cas étudiés .....	133
Figure 84 : Impacts GWP et CED totaux des 6 cas étudiés, en pourcent de la valeur minimale.....	134
Figure 85 : Impacts GWP et CED de l'embodied energy des 6 cas étudiés, en pourcent de la valeur minimale .....	135
Figure 86 : Evolution du GWP sur toute la durée de vie, pour la maison acier/trespa .....	137
Figure 87 : Evolution du CED sur toute la durée de vie, pour la maison acier/trespa .....	138
Figure 88 : Répartition des impacts GWP et CED par phases du cycle de vie pour la maison acier/trespa .....	140
Figure 89 : Distribution du poids par type de matériaux, pour les 6 cas étudiés .....	142
Figure 90 : Distribution du GWP par type de matériaux, pour les 6 cas étudiés .....	144
Figure 91 : Distribution du CED par type de matériaux, pour les 6 cas étudiés .....	145
Figure 92 : Distribution du poids suivant l'emplacement des matériaux dans le bâtiment, pour les 6 cas étudiés .....	147
Figure 93 : Distribution du GWP suivant l'emplacement des matériaux dans le bâtiment, pour les 6 cas étudiés .....	148
Figure 94 : Distribution du poids suivant l'emplacement des matériaux dans le bâtiment, pour les 6 cas étudiés .....	149
Figure 95 : Demandes de chauffage pour les 3 températures de consigne étudiées .....	152
Figure 96 : Comparaison de l'impact GWP total avec changement de la température de consigne.....	153
Figure 97 : Comparaison de l'impact CED total avec changement de la température de consigne .....	153
Figure 98 : Comparaison de l'impact GWP total avec changement des distances de transport .....	155
Figure 99 : Comparaison de l'impact GWP total avec changement des distances de transport .....	155
Figure 100 : Demande de chauffage pour les 2 sites de construction Uccle et Ostende.....	158
Figure 101 : Comparaison des impacts GWP et CED totaux avec changement du climat Ostende.....	159
Figure 102 : Demande de chauffage et de climatisation pour les 2 sites de construction Uccle et Nice ...	160
Figure 103 : Comparaison des impacts GWP et CED totaux avec changement du climat Nice .....	162
Figure 104 : Pourcentages des différents moyens de production d'électricité pour la France en 2007 (source : <a href="http://www.eia.doe.gov/">http://www.eia.doe.gov/</a> ) .....	163
Figure 105 : Pourcentages des différents moyens de production d'électricité pour la Belgique en 2007 (source : <a href="http://www.eia.doe.gov/">http://www.eia.doe.gov/</a> ) .....	163
Figure 106 : Ecart des émissions de CO2 entre différentes sources, pour produire la même quantité d'énergie ( <b>4000 kWh</b> ici) – unité : <b>kg C eq = 3,7 kg CO2 eq</b> (source : <a href="http://www.mountainriders.org">http://www.mountainriders.org</a> ) .....	164
Figure 107 : Evolution des GWP et CED au cours de la vie du bâtiment pour les 2 sites de construction Uccle et Nice .....	165
Figure 108 : Répartition des impacts GWP et CED par phases du cycle de vie pour la maison acier/trespa à Uccle et à Nice.....	166
Figure 109 : Caractéristiques techniques des profilés (MULTI)BEAM (source : [24]) .....	178
Figure 110 : Dimensions standard des panneaux Trespa (source : [25]).....	179

Figure 111 : Maison faite avec de la bauge (source : <a href="http://www.ecohabitation.com">http://www.ecohabitation.com</a> ) .....	180
Figure 112 : Préparation de la bauge 1 (source : <a href="http://www.bretagne-racines.ac-rennes.fr">http://www.bretagne-racines.ac-rennes.fr</a> ) .....	180
Figure 113 : Préparation de la bauge 2 (source : <a href="http://www.bretagne-racines.ac-rennes.fr">http://www.bretagne-racines.ac-rennes.fr</a> ) .....	181
Figure 114 : Préparation de la bauge 3 (source : <a href="http://www.bretagne-racines.ac-rennes.fr">http://www.bretagne-racines.ac-rennes.fr</a> ) .....	181
Figure 115 : Préparation de la bauge 4 (source : <a href="http://www.bretagne-racines.ac-rennes.fr">http://www.bretagne-racines.ac-rennes.fr</a> ) .....	181
Figure 116 : Préparation de la bauge 5 (source : <a href="http://www.bretagne-racines.ac-rennes.fr">http://www.bretagne-racines.ac-rennes.fr</a> ) .....	181
Figure 117 : Scénarios conventionnels de la RT 2005 – 1 ([43]).....	190
Figure 118 : Scénarios conventionnels de la RT 2005 – 2 ([43]).....	191
Figure 119 : Scénario d’occupation hebdomadaire pour les zones entrée et salle de bains.....	192
Figure 120 : Scénario d’occupation hebdomadaire pour la zone salon .....	193
Figure 121 : Scénario d’occupation hebdomadaire pour la zone chambre double .....	194
Figure 122 : Scénario d’occupation hebdomadaire pour la zone chambres simples.....	195
Figure 123 : Scénario d’occupation annuel pour toutes les zones (avec leur scénario hebdomadaire associé) .....	196
Figure 124 : Scénario de ventilation hebdomadaire pour la zone entrée.....	197
Figure 125 : Scénario de ventilation annuel pour toutes les zones (avec leur scénario hebdomadaire associé) .....	198
Figure 126 : Scénario de puissance dissipée hebdomadaire pour toutes les zones sauf le salon .....	199
Figure 127 : Scénario de puissance dissipée hebdomadaire pour la zone salon .....	200
Figure 128 : Scénario de puissance dissipée annuel pour toutes les zones .....	201
Figure 129 : Scénario de chauffage de l’air hebdomadaire pour toutes les zones .....	202
Figure 130 : Scénario de chauffage de l’air annuel pour toutes les zones .....	203
Figure 131 : Compositions et multi-composition pour le mur extérieur de la maison acier/trespa.....	211
Figure 132 : Compositions et multi-composition pour la toiture de la maison acier/trespa .....	212
Figure 133 : Compositions et multi-composition pour le plancher 1 de la maison acier/trespa .....	212
Figure 134 : Compositions et multi-composition pour le plancher 2 de la maison acier/trespa .....	213
Figure 135 : Compositions et multi-composition pour la dalle 1 de la maison acier/trespa .....	214
Figure 136 : Compositions et multi-composition pour la dalle 2 de la maison acier/trespa .....	214
Figure 137 : Compositions et multi-composition pour la cloison normale de la maison acier/trespa .....	215
Figure 138 : Compositions et multi-composition pour la cloison en bauge de la maison acier/trespa.....	215
Figure 139 : Compositions et multi-composition pour le mur extérieur de la maison acier/acier .....	216
Figure 140 : Compositions et multi-composition pour le mur extérieur de la maison acier/brique .....	217
Figure 141 : Compositions et multi-composition pour la toiture de la maison acier/brique.....	218
Figure 142 : Compositions et multi-composition pour le mur extérieur de la maison mixte acier/maçonnerie .....	218
Figure 143 : Compositions et multi-composition pour la toiture de la maison traditionnelle.....	219
Figure 144 : Compositions et multi-composition pour le plancher 1 de la maison traditionnelle.....	220
Figure 145 : Compositions et multi-composition pour le plancher 2 de la maison traditionnelle.....	220
Figure 146 : Evolution du GWP et du CED sur toute la durée de vie, pour les 6 cas étudiés.....	223

### XIII. TABLE DES TABLEAUX

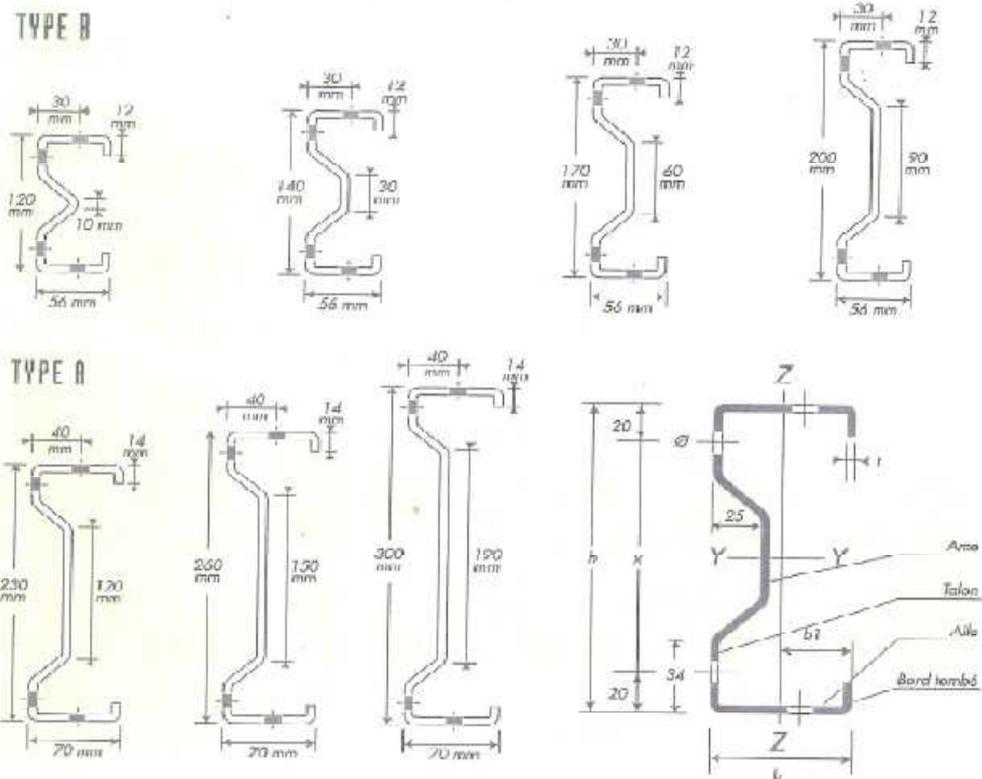
Tableau 1: Consommations relatives à certaines certifications (valeurs provenant de <a href="http://www.minergie.fr">http://www.minergie.fr</a> , <a href="http://energie.wallonie.be/">http://energie.wallonie.be/</a> , <a href="http://www.rt-batiment.fr">http://www.rt-batiment.fr</a> , <a href="http://www.concept-bio.eu">http://www.concept-bio.eu</a> ) .....	13
Tableau 2 : Exigences de la PEB pour la ventilation .....	59
Tableau 3 : Valeurs de <b>R</b> des lames d'air en fonction de l'épaisseur (source : <a href="http://herve.silve.pagesperso-orange.fr/deperditions/deperd_rt2000.htm">http://herve.silve.pagesperso-orange.fr/deperditions/deperd_rt2000.htm</a> ) .....	63
Tableau 4 : Déperditions par ventilations mensuelles .....	74
Tableau 5 : Massivité des parois du bâtiment pour les différents cas .....	76
Tableau 6 : Récapitulatif des surfaces et volumes des différentes zones .....	86
Tableau 7 : Horaire hebdomadaire d'occupation (source : [43]) .....	90
Tableau 8 : Précisions pour les scénarios d'occupation hebdomadaire des différentes zones .....	91
Tableau 9 : Horaire hebdomadaire de ventilation (source : [43]) .....	92
Tableau 10 : Horaire hebdomadaire de puissance dissipée (éclairage) (source : [43]) .....	93
Tableau 11 : Puissance de chauffage dans chaque zone de la maison .....	96
Tableau 12 : GWP et CED du transport de <b>1 tonne.km</b> .....	106
Tableau 13 : Inventaire pour la maison acier/trespa .....	110
Tableau 14 : Impacts liés aux phases de production et de fin de vie pour la maison acier/trespa .....	111
Tableau 15 : Impacts liés au chauffage pour la maison acier/trespa .....	111
Tableau 16 : Impacts liés au fonctionnement des équipements électriques pour la maison acier/trespa .....	111
Tableau 17 : Impacts liés aux transports pour la maison acier/trespa .....	112
Tableau 18 : Impacts totaux pour la maison acier/trespa .....	112
Tableau 19 : Inventaire pour la maison acier/acier .....	113
Tableau 20 : Impacts liés aux phases de production et de fin de vie pour la maison acier/acier .....	114
Tableau 21 : Impacts liés au chauffage pour la maison acier/acier .....	114
Tableau 22 : Impacts liés au fonctionnement des équipements électriques pour la maison acier/acier .....	114
Tableau 23 : Impacts liés aux transports pour la maison acier/acier .....	115
Tableau 24 : Impacts totaux pour la maison acier/acier .....	115
Tableau 25 : Inventaire pour la maison acier/brique .....	116
Tableau 26 : Impacts liés aux phases de production et de fin de vie pour la maison acier/brique .....	117
Tableau 27 : Impacts liés au chauffage pour la maison acier/brique .....	117
Tableau 28 : Impacts liés au fonctionnement des équipements électriques pour la maison acier/brique .....	117
Tableau 29 : Impacts liés aux transports pour la maison acier/brique .....	118
Tableau 30 : Impacts totaux pour la maison acier/brique .....	118
Tableau 31 : Inventaire pour la maison mixte acier/maçonnerie .....	119
Tableau 32 : Impacts liés aux phases de production et de fin de vie pour la maison mixte acier/maçonnerie .....	120
Tableau 33 : Impacts liés au chauffage pour la maison mixte acier/maçonnerie .....	120

Tableau 34 : Impacts liés au fonctionnement des équipements électriques pour la maison mixte acier/maçonnerie .....	120
Tableau 35 : Impacts liés aux transports pour la maison mixte acier/maçonnerie .....	121
Tableau 36 : Impacts totaux pour la maison mixte acier/maçonnerie.....	121
Tableau 37 : Inventaire pour la maison traditionnelle .....	122
Tableau 38 : Impacts liés aux phases de production et de fin de vie pour la maison traditionnelle .....	123
Tableau 39 : Impacts liés au chauffage pour la maison traditionnelle.....	123
Tableau 40 : Impacts liés au fonctionnement des équipements électriques pour la maison traditionnelle .....	123
Tableau 41 : Impacts liés aux transports pour la maison traditionnelle .....	124
Tableau 42 : Impacts totaux pour la maison traditionnelle .....	124
Tableau 43 : Inventaire pour la maison acier/trespa sans bauge.....	125
Tableau 44 : Impacts liés aux phases de production et de fin de vie pour la maison acier/trespa sans bauge .....	126
Tableau 45 : Impacts liés au chauffage pour la maison acier/trespa sans bauge .....	126
Tableau 46 : Impacts liés au fonctionnement des équipements électriques pour la maison acier/trespa sans bauge.....	126
Tableau 47 : Impacts liés aux transports pour la maison acier/trespa sans bauge.....	127
Tableau 48 : Impacts totaux pour la maison acier/trespa sans bauge.....	127
Tableau 49 : Impact GWP pour les différents cas.....	128
Tableau 50 : Impact CED pour les différents cas .....	129
Tableau 51 : Electricity mix pour la Belgique et la France (source : EcoInvent).....	162
Tableau 52 : Récapitulatif des matériaux utilisés dans les compositions des parois (source : [34]).....	189
Tableau 53 : Récapitulatif des pièces et parois du bâtiment .....	206
Tableau 54 : Origine des données du datapool (GWP et CED).....	208
Tableau 55 : Détermination de la consommation d'électricité dans la maison étudiée.....	210

## XIV. ANNEXES

### A. Caractéristiques techniques des profils MULTI(BEAM)

#### CARACTERISTIQUES TECHNIQUES : Profils Multibeam



#### Caractéristiques brutes des profils

Multibeam Type	h mm	b mm	t mm	x mm	a	b1 mm	Section cm <sup>2</sup>	Masse kg/m	I <sub>y</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>y</sub> cm <sup>3</sup>	I <sub>x</sub> cm <sup>4</sup>	I <sub>x</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>x</sub> cm <sup>3</sup>	I <sub>z</sub> cm <sup>4</sup>
B120/150*	120	56	1.50	60	14	35.4	3.60	3.10	82.18	13.50	4.67	12.29	3.48	1.73
B140/150	140	56	1.50	100	14	35.0	4.15	3.34	118.96	16.67	6.94	12.99	3.54	1.73
D170/155	170	56	1.55	130	14	34.1	4.75	3.82	194.77	22.00	6.41	12.97	3.75	1.85
R210/160	200	56	1.60	160	14	34.5	5.37	4.31	288.04	28.56	7.45	13.52	3.96	1.69
A230/180	230	70	1.60	190	14	44.0	6.41	5.14	490.00	42.60	8.75	26.10	5.33	2.02
A250/180	230	70	1.80	190	14	44.1	7.16	5.74	543.85	46.25	8.72	27.72	6.28	1.97
A250/180	230	70	1.80	220	14	44.0	7.87	6.18	749.45	57.65	8.75	28.79	6.48	1.91
A250/200	260	70	2.00	220	14	44.2	8.55	6.85	812.68	61.84	9.75	30.90	6.89	1.90
A250/240	260	70	2.40	220	14	44.8	10.30	8.22	977.01	74.88	9.74	37.59	8.38	1.91
A260/270	260	70	2.70	220	14	45.2	11.61	9.25	1100.04	84.48	9.74	42.60	8.42	1.92
A280/320	280	70	3.20	220	14	45.8	13.79	10.98	1304.17	100.20	9.70	51.08	11.14	1.92
A300/180	300	70	1.80	260	14	44.8	8.59	6.74	1059.67	70.65	11.10	29.80	6.48	1.83
A300/240	300	70	2.40	260	14	45.0	11.26	8.55	1394.00	92.40	11.08	37.80	8.40	1.83
A300/270	300	70	2.70	260	14	45.2	12.67	9.95	1557.00	104.00	11.08	42.60	9.42	1.83
A300/320*	300	70	3.20	260	14	45.8	15.00	11.62	1870.00	125.00	11.14	51.08	11.30	1.86

\*sur demande



Figure 109 : Caractéristiques techniques des profils (MULTI)BEAM (source : [28])

## B. Panneau Trespa

Qu'est-ce qu'un panneau Trespa exactement ?

Ces informations ont été tirées de la documentation que nous avons trouvée sur le concept Trespa ([29]).

Précisons tout d'abord que le nom exact du revêtement est Trespa Meteon, c'est-à-dire la solution Trespa pour un usage en extérieur, comme c'est le cas dans ce travail.

Trespa Meteon est un panneau rectangulaire plan homogène et massif à base de résines thermodurcissables, renforcées de façon homogène par des fibres de bois et fabriqué sous haute pression et à haute température. Le panneau présente, sur une ou sur ses 2 faces, une couche de résine synthétique décorative pigmentée dans la masse. En version standard, les panneaux sont disponibles en divers coloris et textures.

Les dimensions standard des panneaux sont les suivantes :

	Longueur (mm)	Largueur (mm)	Épaisseur (mm)			
Dimensions	3050	1530	6,0	8,0	10,0	13,0
	2550	1860	6,0	8,0	10,0	13,0
	3650	1860	6,0	8,0	10,0	13,0
Tolérances	+5,0	+5,0	+0,40	+0,50	+0,50	+0,60
	-0	-0	-0,40	-0,50	-0,50	-0,60

Figure 110 : Dimensions standard des panneaux Trespa (source : [29])

Dans notre cas, nous considérerons une épaisseur de panneau égale à 10 mm.

Les propriétés physiques du panneau Trespa sont les suivantes ([29]) :

- masse volumique :  $1400 \text{ kg/m}^3$
- conductivité thermique :  $0,3 \text{ W/m/K}$

En ce qui concerne la chaleur spécifique du panneau, aucune information n'était fournie dans la documentation du fabricant. Nous avons donc procédé de la manière suivante pour la déterminer : le panneau étant constitué à 70 % de fibres de bois tendre et à 30 % de liant (résine) [29] :

- chaleur spécifique du bois :  $2400 \text{ J/kg/K}$
- chaleur spécifique de la résine thermodurcissable :  $1500 \text{ J/kg/K}$

Et donc :

- chaleur spécifique du panneau Trespa :  $0,7 * 2400 + 0,3 * 1500 = 2130 \text{ J/kg/K}$

## C. Bauge

Qu'est-ce que le matériau bauge ?

La bauge est une technique de construction avec de la terre crue ; il s'agit d'un mélange de terre crue et de paille, cette dernière permettant d'améliorer la cohésion et la résistance. Un mur fait de bauge peut être un mur porteur. La figure suivante montre une habitation construite avec de la bauge.



Figure 111 : Maison faite avec de la bauge (source : <http://www.ecohabitation.com>)

Quels sont les avantages d'un mur comme celui-là ? Et bien, ces avantages sont ceux de la terre :

- la terre absorbe et restitue l'humidité
- la terre régule la température par inertie thermique
- la terre est un très bon isolant phonique

Un très gros inconvénient relatif à la technique de construction en bauge est qu'elle nécessite beaucoup de main d'œuvre – notamment au niveau de la fabrication de la bauge, et que donc l'installation des murs est très longue.

Pour remédier à ce problème, une technique de fabrication mécanisée de blocs de bauge a été mise au point par Jean GUILLOREL. Voici cette technique :

- verser la terre dans le malaxeur



Figure 112 : Préparation de la bauge 1 (source : <http://www.bretagne-racines.ac-rennes.fr>)

- mouiller la terre et ajouter de la paille



Figure 113 : Préparation de la bauge 2 (source : <http://www.bretagne-racines.ac-rennes.fr>)

- remuer
- ajouter 5% de ciment (pour renforcer la résistance mécanique du futur bloc)
- déverser la bauge dans des moules aux dimensions extrêmement variées suivant le type de commande



Figure 114 : Préparation de la bauge 3 (source : <http://www.bretagne-racines.ac-rennes.fr>)

- démouler après 24 heures



Figure 115 : Préparation de la bauge 4 (source : <http://www.bretagne-racines.ac-rennes.fr>)

- stocker le bloc pour son séchage



Figure 116 : Préparation de la bauge 5 (source : <http://www.bretagne-racines.ac-rennes.fr>)

La mise en œuvre des blocs de bauge se fait ensuite selon les techniques de la maçonnerie traditionnelle.

Les propriétés physiques des blocs de bauge sont les suivantes (ces valeurs proviennent de la base de données du logiciel COCON ([48]) :

- masse volumique :  $1800 \text{ kg/m}^3$
- conductivité thermique :  $0,65 \text{ W/m/K}$
- chaleur spécifique :  $1008 \text{ J/kg/K}$

## D. Compositions thermiques « intermédiaires » des parois

Le terme « intermédiaire » fait référence au fait qu'à ce niveau du travail, les épaisseurs d'isolant de certaines parois ne sont pas encore déterminées ; il reste donc des indéterminations dans ces compositions.

- Mur extérieur
  - Maison acier/trespa

La composition thermique du mur extérieur de la maison à bardage Trespa est la suivante :

		Epaisseur	Conductivité thermique $\lambda$ [ $W/m/K$ ]
Extérieur	Panneau Trespa	1 cm	0,3
	Vide d'air	4 cm	0,25
	Isolant extérieur éventuel : polystyrène expansé		0,039
	Panneau OSB	1,8 cm	0,13
	Vide d'air éventuel en fonction de l'épaisseur d'isolant interne		
	Remplissage isolant laine de bois		0,042
	Vide d'air	6 cm	0,469
Intérieur	Plaque de plâtre	1,25 cm	0,32

- Maison acier/acier

La composition thermique du mur extérieur de la maison à bardage acier est la suivante :

		Epaisseur	Conductivité thermique $\lambda$ [ $W/m/K$ ]
Extérieur	Lame bardage acier	0,15 cm	46
	Vide d'air	7,85 cm	0,491
	Isolant extérieur éventuel : polystyrène expansé		0,039
	Panneau OSB	1,8 cm	0,13
	Vide d'air éventuel en fonction de l'épaisseur d'isolant interne		
	Remplissage isolant laine de bois		0,042
	Vide d'air	6 cm	0,469
Intérieur	Plaque de plâtre	1,25 cm	0,32

Remarque : vu le profil de la lame de bardage en acier (Figure 40), on ne traverse qu'une épaisseur d'acier égale à l'épaisseur de la tôle (= 0,15 cm) ; vient ensuite une lame d'air de  $4 + (4 - 0,15) = 7,85$  cm (4 cm de fixation et (4 - 0,15) cm de « bardage »).

– Maison acier/brique

Dans le cas de la maison à parement brique, la composition thermique du mur extérieur est la suivante :

		Epaisseur	Conductivité thermique $\lambda$ [ <i>W/m/K</i> ]
Extérieur	Brique pleine de terre cuite	5,5 <i>cm</i>	1,1
	Vide d'air	3 <i>cm</i>	0,188
	Isolant extérieur éventuel : polystyrène expansé		0,039
	Panneau OSB	1,8 <i>cm</i>	0,13
	Vide d'air éventuel en fonction de l'épaisseur d'isolant interne		
	Remplissage isolant laine de bois		0,042
	Vide d'air	6 <i>cm</i>	0,469
Intérieur	Plaque de plâtre	1,25 <i>cm</i>	0,32

– Maisons mixte/maçonnerie et traditionnelle

Les maisons mixte/maçonnerie et traditionnelle ont exactement la même composition pour le mur extérieur, y compris du point de vue thermique. Celle-ci est la suivante :

		Epaisseur	Conductivité thermique $\lambda$ [ <i>W/m/K</i> ]
Extérieur	Brique pleine de terre cuite	5,5 <i>cm</i>	1,1
	Vide d'air	3 <i>cm</i>	0,188
	Isolant polystyrène expansé		0,039
	Parpaing	20 <i>cm</i>	1,05
Intérieur	Plaque de plâtre	1,25 <i>cm</i>	0,32

○ Toiture

– Maisons acier/trespa, acier/acier, acier/brique, mixte/maçonnerie

La composition thermique de la toiture dans le cas des maisons à structure en acier est la suivante :

		Epaisseur	Conductivité thermique $\lambda$ [ W/m/K]
Extérieur	Ardoises	0,8 cm	2,1
	Vide d'air	5,2 cm	0,325
	Isolant extérieur éventuel : polystyrène expansé		0,039
	Panneau OSB	1,8 cm	0,13
	Vide d'air	3 cm	0,1875
	Vide d'air éventuel en fonction de l'épaisseur d'isolant interne		
	Remplissage isolant laine de bois		0,042
	Vide d'air	3 cm	0,1875
Intérieur	Plaque de plâtre	1,25 cm	0,32

- Maison traditionnelle

Dans le cas de la maison traditionnelle, où l'on considère une toiture faite avec des fermes en bois, la composition thermique de la toiture est la suivante :

		épaisseur	Conductivité thermique $\lambda$ [ W/m/K]
Extérieur	Ardoises	0,8 cm	2,1
	Vide d'air	4,4 cm	0,275
	Isolant extérieur éventuel : polystyrène expansé		0,039
	Remplissage isolant polystyrène expansé		0,039
	Vide d'air	2,2 cm	0,138
Intérieur	Plaque de plâtre	1,25 cm	0,32

- Plancher 1 – finition parquet

- Maisons acier/trespa, acier/acier, acier/brique et mixte/maçonnerie

La composition thermique du plancher 1 dans le cas des maisons avec structure en acier est la suivante :

		épaisseur	Conductivité thermique $\lambda$ [ W/m/K]
Dessous	Plaque de plâtre	1,25 cm	0,32
	Vide d'air	3 cm	0,1875
	Remplissage isolant laine de bois		0,042
	Vide d'air éventuel en fonction de l'épaisseur d'isolant interne		
	Panneau OSB	3,6 cm	0,13
Dessus	Parquet bois massif	2 cm	0,23

– Maison traditionnelle

La composition thermique du plancher 1 dans le cas de la maison traditionnelle (hourdis en béton) est la suivante :

		épaisseur	Conductivité thermique $\lambda$ [ W/m/K]
Dessous	Plaque de plâtre	1,25 cm	0,32
	Vide d'air	3 cm	0,188
	Hourdis béton	12 cm	1,09
	Chape de compression	7 cm	1,15
	Vide d'air	4 cm	0,25
Dessus	Parquet bois massif	2 cm	0,23

○ Plancher 2 – finition carrelage

La différence entre les compositions des planchers 1 et 2 se situe au niveau de la finition.

– Maisons acier/trespa, acier/acier, acier/brique et mixte/maçonnerie

La composition thermique du plancher 2 dans le cas des maisons avec structure en acier est la suivante :

		Epaisseur	Conductivité thermique $\lambda$ [ W/m/K]
Dessous	Plaque de plâtre	1,25 cm	0,32
	Vide d'air	3 cm	0,1875
	Remplissage isolant laine de bois		0,042
	Vide d'air éventuel en fonction de l'épaisseur d'isolant interne		
	Bac métallique coffrage	0,5 cm	46
	Chape mortier	4 cm	1,15
Dessus	Carrelage	1 cm	1,7

– Maison traditionnelle

La composition thermique du plancher 2 dans le cas de la maison traditionnelle (hourdis en béton) est la suivante :

		Epaisseur	Conductivité thermique $\lambda$ [ W/m/K]
Dessous	Plaque de plâtre	1,25 cm	0,32
	Vide d'air	3 cm	0,188
	Hourdis béton	12 cm	1,09
	Chape de compression	7 cm	1,15
Dessus	Carrelage	1 cm	1,7

- Dalle de sol 1 – finition parquet

La dalle de sol est la même pour tous les cas étudiés. Sa composition thermique, dans le cas de la finition parquet est la suivante :

		Epaisseur	Conductivité thermique $\lambda$ [ W/m/K]
Extérieur	Béton lourd	20 cm	1,75
	Isolant polyuréthane		0,03
	Panneau OSB	3,6 cm	0,13
Intérieur	Parquet bois massif	2 cm	0,23

- Dalle de sol 2 – finition carrelage

La composition thermique de la dalle de sol, dans le cas de la finition carrelage est la suivante :

		Epaisseur	Conductivité thermique $\lambda$ [ W/m/K]
Extérieur	Béton lourd	20 cm	1,75
	Isolant polyuréthane		0,03
	Chape mortier	4 cm	1,15
Intérieur	Carrelage	1 cm	1,7

- Cloison intérieure normale

La composition thermique des cloisons de type normale est la suivante :

	Epaisseur	Conductivité thermique $\lambda$ [ W/m/K]
Plaque de plâtre	2,5 cm	0,32
Plaque de plâtre	2,5 cm	0,32

- Cloison intérieure en bauge

La composition thermique de la cloison faite en bauge est la suivante :

	Epaisseur	Conductivité thermique $\lambda$ [ <i>W/m/K</i> ]
Plaque de plâtre	1,25 <i>cm</i>	0,32
Bloc de bauge	24 <i>cm</i>	0,65
Plaque de plâtre	1,25 <i>cm</i>	0,32

**E. Récapitulatif des matériaux utilisés dans les compositions des parois**

Classe (Pleiades)	Groupe (Arcelor)	Nom (Pleiades)	Densité (kg/m <sup>3</sup> ) ou surface de vitrage (m <sup>2</sup> )	Conductivité thermique λ (W/m/K)	Chaleur spécifique C (J/kg/K)	Unité de référence	GWP (kg CO2_eq/unit)	CED (MJ_eq/unit)	Durée de vie (années)
Pierres et bétons	Pierres et bétons	Ardoise	2700	2.1	750	kg	0.26	8.42	100
Pierres et bétons	Pierres et bétons	Béton lourd	2300	1.75	920	m3	317.5052	1801.75	100
Bois et végétaux	Bois et végétaux	Bois lourd	650	0.23	2400	m3	1361	10895	100
Blocs	Pierres et bétons	Brique pleine de 5.5 cm	1700			kg	0.2534	3.13	100
Pierres et bétons	Pierres et bétons	Carrelage	2300	1.7	700	kg	0.7921	14.868	0
Fenêtres	Fenêtres, portes et portes-fenêtres	Fen bat bois DV CLIMAPLUS N 6.12.6	1			m2	72.7632	1935.57	30
Blocs	Pierres et bétons	Hourdis de 12 en béton	1300	1.09		kg	0.1341	1.127	100
Isolants et plastiques	Isolants et plastiques	Laine de bois	140	0.042	2100	kg	0.06	1.25	50
Mortiers et plâtres	Mortiers et plâtres	Mortier	2000	1.15	840	kg	0.2041	1.43	50
Bois et végétaux	Bois et végétaux	Panneau OSB	650	0.13	1700	m3	494.8125	6658.44	100
Blocs	Pierres et bétons	Parpaing de 20	1300			kg	0.1341	1.127	100
Panneaux	Mortiers et plâtres	Placoplatre BA 13	850	0.32	799	kg	0.1673	3.4038	50
Isolants et plastiques	Isolants et plastiques	Polystyrène expansé	25	0.039	1380	kg	4.21	106.08	50
Isolants et plastiques	Isolants et plastiques	Polyuréthane	35	0.03	837	kg	4.31	102.56	50
Portes	Portes	Porte bois intérieure	1			m2	44.1621	1821.86	100
Portes	Portes	Porte bois isolante performante	1			m2	90.2025	1932.96	100
Verres et métaux	Acier	Steel (Hot Dip Galvanised) usage extérieur	7850	46	490	kg	1.0798	18.331	50
Verres et métaux	Acier	Steel (Hot Dip Galvanised) usage intérieur	7850	46	490	kg	1.0798	18.331	100
Verres et métaux	Acier	Steel (Organic coated)	7850	46	490	kg	1.0344	19.401	50
Verres et métaux	Acier	Steel (Rebars)	7850	50	490	kg	1.3067	16.485	100
Pierres et bétons	Pierres et bétons	Bauge	1800	0.65	1008	m3	33	396	100
Panneaux	Bois et végétaux	Panneaux trespa	1400	0.3	2130	m3	2813	79556	50
Lames d'Air	Autres	Lame d'air ... cm	1	xx <sup>26</sup>	1000	kg	0	0	0

Tableau 52 : Récapitulatif des matériaux utilisés dans les compositions des parois (source : [38])

<sup>26</sup> La conductivité thermique d'une lame d'air de ... cm d'épaisseur se détermine sur base du Tableau 3.

## F. Scénarios conventionnels de la RT 2005

**Réglementation Thermique 2005**  
 Méthode de calcul Th-CE - Méthode Th-C - Chapitre VI : Les scénarios conventionnels

Chapitre VI

Les scénarios conventionnels

### 6.1 Généralités et types d'usage

Un bâtiment est découpé en zones ayant des usages différents. Chaque usage définit un scénario de chauffage et un scénario de refroidissement, caractérisés par des températures de consigne et des horaires de maintien en température conventionnels.

Le tableau 3 indique les différents types de zones.

Pour certains types de zones la méthode de calcul néglige les consommations d'énergie pour l'eau chaude sanitaire. Le tableau 36 indique les types de zones pour lesquelles ces consommations sont négligées ou ne sont pas calculées.

Types d'usage	Horaires d'occupation	Niveau de température
Établissements sanitaires avec hébergement	Longs	Élevé
Logements Hôtels et autres hébergements Locaux où il n'est pas possible pour des raisons de conservation des objets entreposés de laisser dériver sensiblement la température	Longs	Moyen
Établissements sanitaires sans hébergement	Moyens	Élevé
Enseignement Bureaux Salles de spectacle, de conférences Commerces Restauration plusieurs repas par jour Locaux non compris dans une autre catégorie	Moyens	Moyen
Établissement sportif Stockage Industrie Transport	Moyens	Réduit
Restauration un repas par jour	Courts	Moyen

Tableau 3 : Types de zones

On définit une zone différente pour chacun des types d'usage représentés dans le bâtiment.

Le tableau 4 indique le type d'horaires de maintien en température et le niveau de température de consigne conventionnelle.

Tableau 4 : Horaires de maintien en température et niveau de température

DB-V-2006-1

Figure 117 : Scénarios conventionnels de la RT 2005 – 1 ([43])

## 6.2 Définition des scénarios

Conventionnellement, les scénarios d'occupation, de consignes de température, de ventilation et d'utilisation possible de l'éclairage correspondent aux catégories définies au paragraphe précédent sont les suivantes.

Horaires d'occupation	Heures par jour	Jours par semaine
Longs	16 (de 0 h à 10 h et de 18 h à 24 h)	5 (lundi au vendredi)
	24 h	Samedi et dimanche
Moyens	10 (8 h à 18 h)	5 (lundi au vendredi)
Courts	5 (9 h à 14 h)	5 (lundi au vendredi)

Tableau 5 : Scénarios d'occupation

Niveau de température	Occupation	Réduction de chauffage de moins de 48 h	Réduction de chauffage de plus de 48 h
Élevé	21 °C	18 °C	7 °C
Moyen	19 °C	16 °C	7 °C
Réduit	15 °C	7 °C	7 °C

Tableau 6 : Températures de consigne conventionnelles en chauffage

Occupation en logements	Occupation autres cas	Réduction de refroidissement de moins de 48 h	Réduction de refroidissement de plus de 48 h
28 °C	26 °C	30 °C	30 °C

Tableau 7 : Températures de consigne conventionnelles en refroidissement

Les vacances sont prises en compte uniquement pour les zones d'enseignement ainsi que pour les zones d'hébergement et de restauration qui leur sont associées. On considère que pendant ces périodes les températures de consigne sont les mêmes que pendant les week-ends.

On considère les périodes de vacances suivantes:

Mois	Nombre de jours de vacances $n_{vac}$
Février	15
Avril	15
Juillet	31
Août	31
Novembre	8
Décembre	16

Tableau 8 : Périodes de vacances pour l'usage enseignement

Horaires d'occupation	Heures par jour	Jours par semaine
Longs	permanent	7
Moyens	10 (8 h à 18 h)	5 (lundi au vendredi)
Moyens cuisines	4 (11 h à 13 h et 18 h à 20 h)	5 (lundi au vendredi)
Courts	5 (9 h à 14 h)	5 (lundi au vendredi)

Tableau 9 : Scénarios d'utilisation de la ventilation

Horaires d'occupation	Heures par jour	Jours par semaine
Longs	5 (de 7 h à 9 h et de 19 h à 22 h)	lundi au vendredi
	15 (de 7 h à 22 h)	samedi et dimanche
Moyens	10 (8 h à 18 h)	5 (lundi au vendredi)
Courts	5 (9 h à 14 h)	5 (lundi au vendredi)

Tableau 10 : Scénarios d'utilisation de l'éclairage artificiel

## 6.3 Apports internes

Conventionnellement, les apports de chaleur et d'humidité uniformément répartis en période d'occupation sont les suivants.

Type d'usage	Horaires de maintien en température	W/m <sup>2</sup> en occupation	kg/h/m <sup>2</sup> en occupation
Établissements sanitaires avec hébergement	Longs	5	0,006
Logements	Longs	5	0,002
Hôtels et autres hébergements	Longs	3	0,004
Locaux où il n'est pas possible pour des raisons de conservation des objets entreposés de laisser varier sensiblement la température	Longs	3	0,004
Établissements sanitaires sans hébergement	Moyens	7	0,004
Enseignement	Moyens	7	0,004
Bureaux	Moyens	14	0,006
Salles de spectacle et conférences	Courts	28	0,012
Commerces	Moyens	14	0,005
Restauration plusieurs repas par jour	Moyens	14	0,005
Locaux non compris dans une autre catégorie	Moyens	7	0,004
Établissements sportifs	Moyens	2	0,002
Stockage	Moyens	2	0,002
Industrie	Moyens	2	0,002
Transport	Moyens	2	0,002
Restauration un repas par jour	Courts	14	0,005

Tableau 11 : Valeurs correspondant aux différents usages des zones

### Hypothèse

La production de vapeur d'eau en cuisines, WC et salles de bains n'intervient pas dans le bilan hydrique car l'extraction est considérée comme directe.

## G. Scénarios : représentation dans Pleiades



Figure 119 : Scénario d'occupation hebdomadaire pour les zones entrée et salle de bains

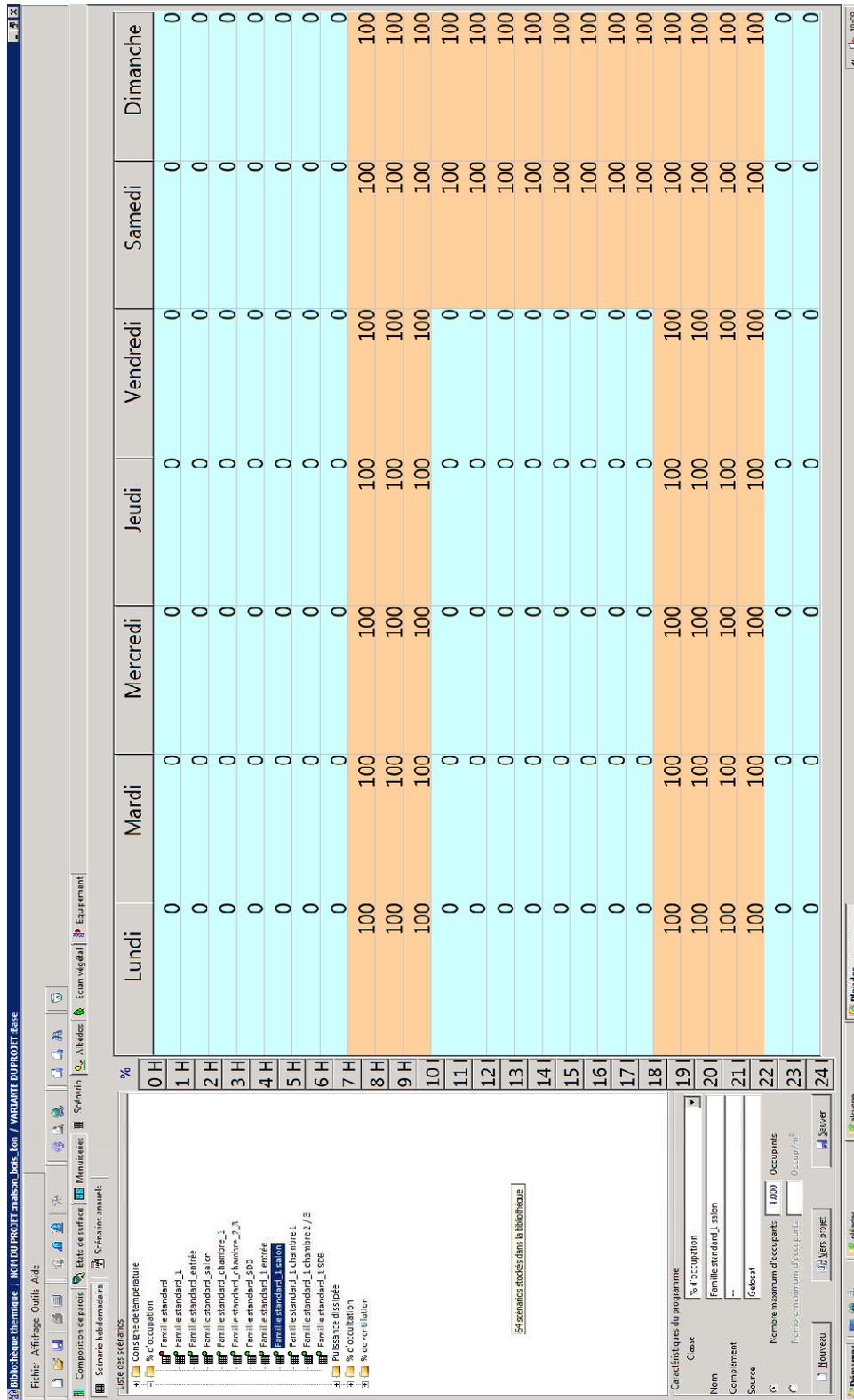


Figure 120 : Scénario d'occupation hebdomadaire pour la zone salon



Figure 121 : Scénario d’occupation hebdomadaire pour la zone chambre double

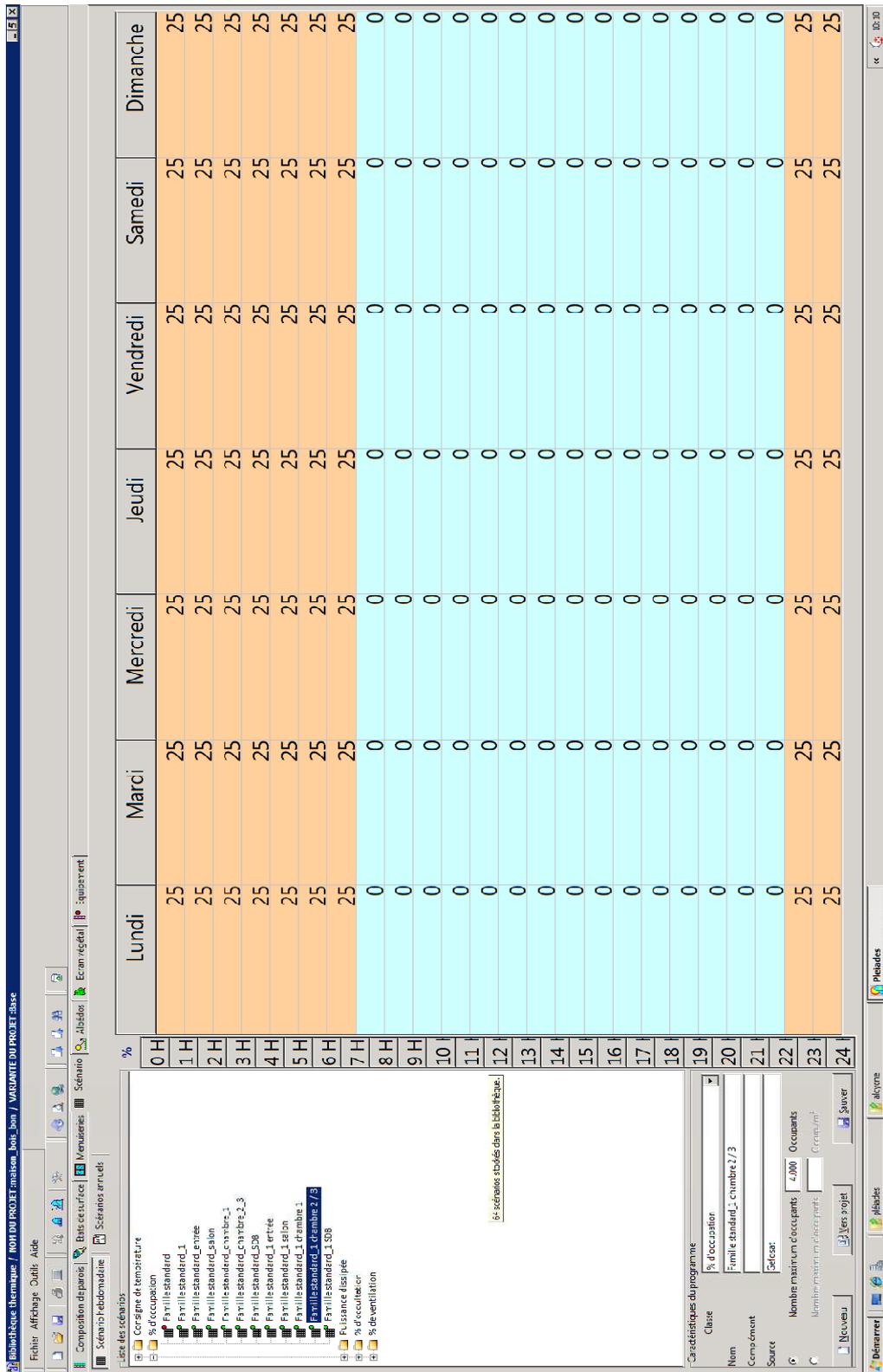


Figure 122 : Scénario d’occupation hebdomadaire pour la zone chambres simples



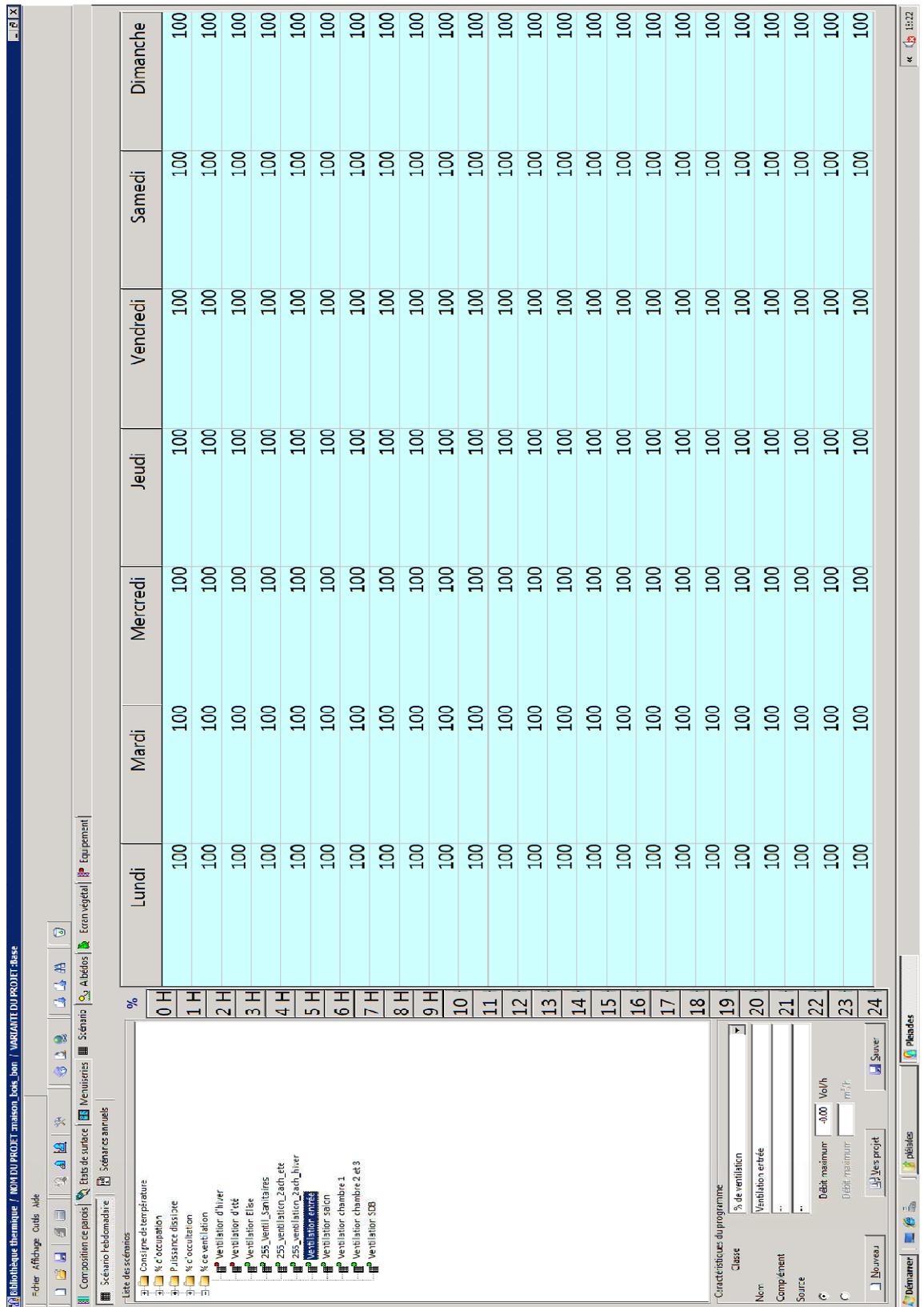


Figure 124 : Scénario de ventilation hebdomadaire pour la zone entrée



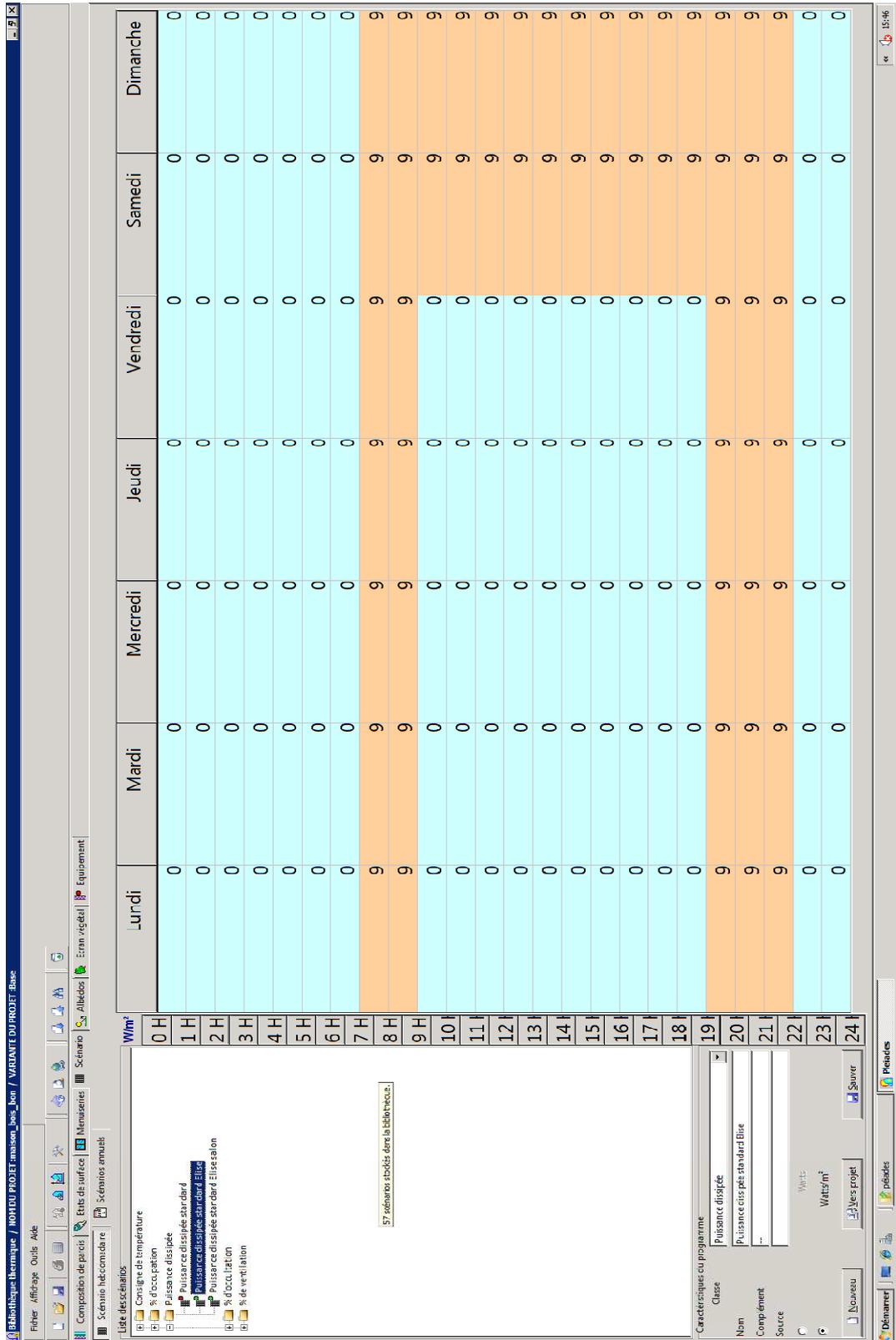


Figure 126 : Scénario de puissance dissipée hebdomadaire pour toutes les zones sauf le salon

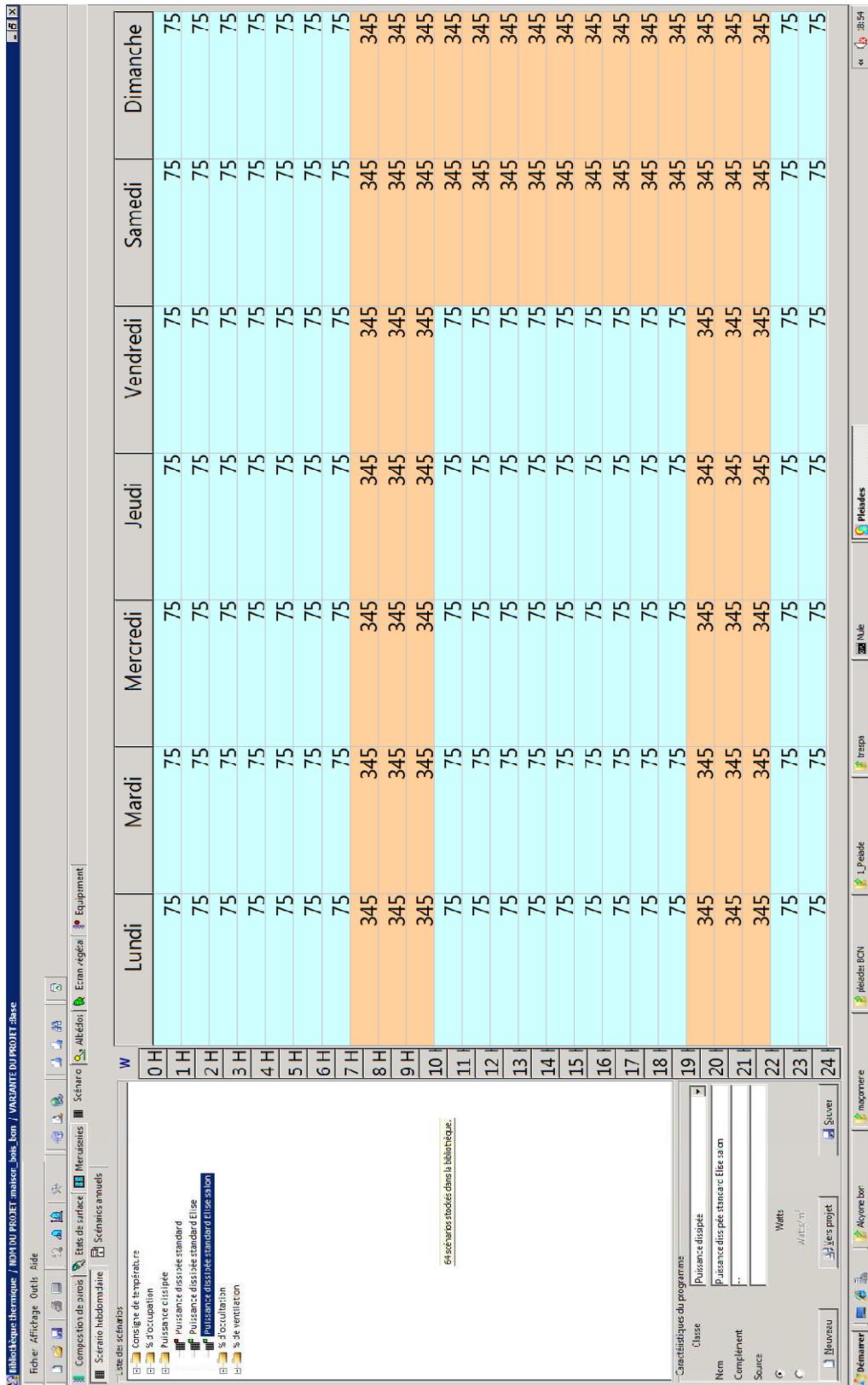


Figure 127 : Scénario de puissance dissipée hebdomadaire pour la zone salon

Bibliothèque thermique / NOM DU PROJET : mission\_bois\_bur / VARIANTE DU PROJET : bois

Fichier : Affichage Outil Aide

Composition de parois : Scénario : Menuiseries : Ecran végétal : Equipement :

Scénario hétérométrique : Scénario annuel :

Liste des scénarios hétérométriques :

- Consigne de température
- % d'occupation
- Puissance dissipée
- Puissance dissipée standard
- Puissance dissipée standard d'Eté
- Puissance dissipée standard d'Eté saison
- % d'occupation
- % de ventilation

Liste des scénarios annuels :

- Consigne de température
- % d'occupation
- Puissance dissipée
- Puissance dissipée standard
- Puiss. Diss. Annual Stand
- % de ventilation

27 scénarios stockés dans la bibliothèque.

Classe : Puissance dissipée  
Nom : Puiss. Diss. Annual Stand  
Complément de nom :  
Origine :

Afficher le détail de scénarios survolé

1	Puissance dissipée standard Eté	14	Puissance dissipée standard Eté	40	Puissance dissipée standard Eté
2	1 Janvier au 7 Janvier	15	2 Avril au 8 Avril	41	1 Octobre au 7 Octobre
3	8 Janvier au 14 Janvier	16	9 Avril au 15 Avril	42	8 Octobre au 14 Octobre
4	15 Janvier au 21 Janvier	17	16 Avril au 22 Avril	43	15 Octobre au 21 Octobre
5	22 Janvier au 28 Janvier	18	23 Avril au 29 Avril	44	22 Octobre au 28 Octobre
6	29 Janvier au 4 Février	19	30 Avril au 6 Mai	45	29 Octobre au 4 Novembre
7	5 Février au 11 Février	20	7 Mai au 13 Mai	46	5 Novembre au 11 Novembre
8	12 Février au 18 Février	21	14 Mai au 20 Mai	47	12 Novembre au 18 Novembre
9	19 Février au 25 Février	22	21 Mai au 27 Mai	48	19 Novembre au 25 Novembre
10	26 Février au 4 Mars	23	28 Mai au 3 Juin	49	26 Novembre au 2 Décembre
11	5 Mars au 11 Mars	24	4 Juin au 10 Juin	50	3 Décembre au 9 Décembre
12	12 Mars au 18 Mars	25	11 Juin au 17 Juin	51	10 Décembre au 16 Décembre
13	19 Mars au 25 Mars	26	18 Juin au 24 Juin	52	17 Décembre au 23 Décembre
14	26 Mars au 1 Avril	27	25 Juin au 1 Juillet		

Devenir | Aide | Pesées | Nouveaux | Importer un fichier | Voir projet | Sauver

15:54

Figure 128 : Scénario de puissance dissipée annuel pour toutes les zones

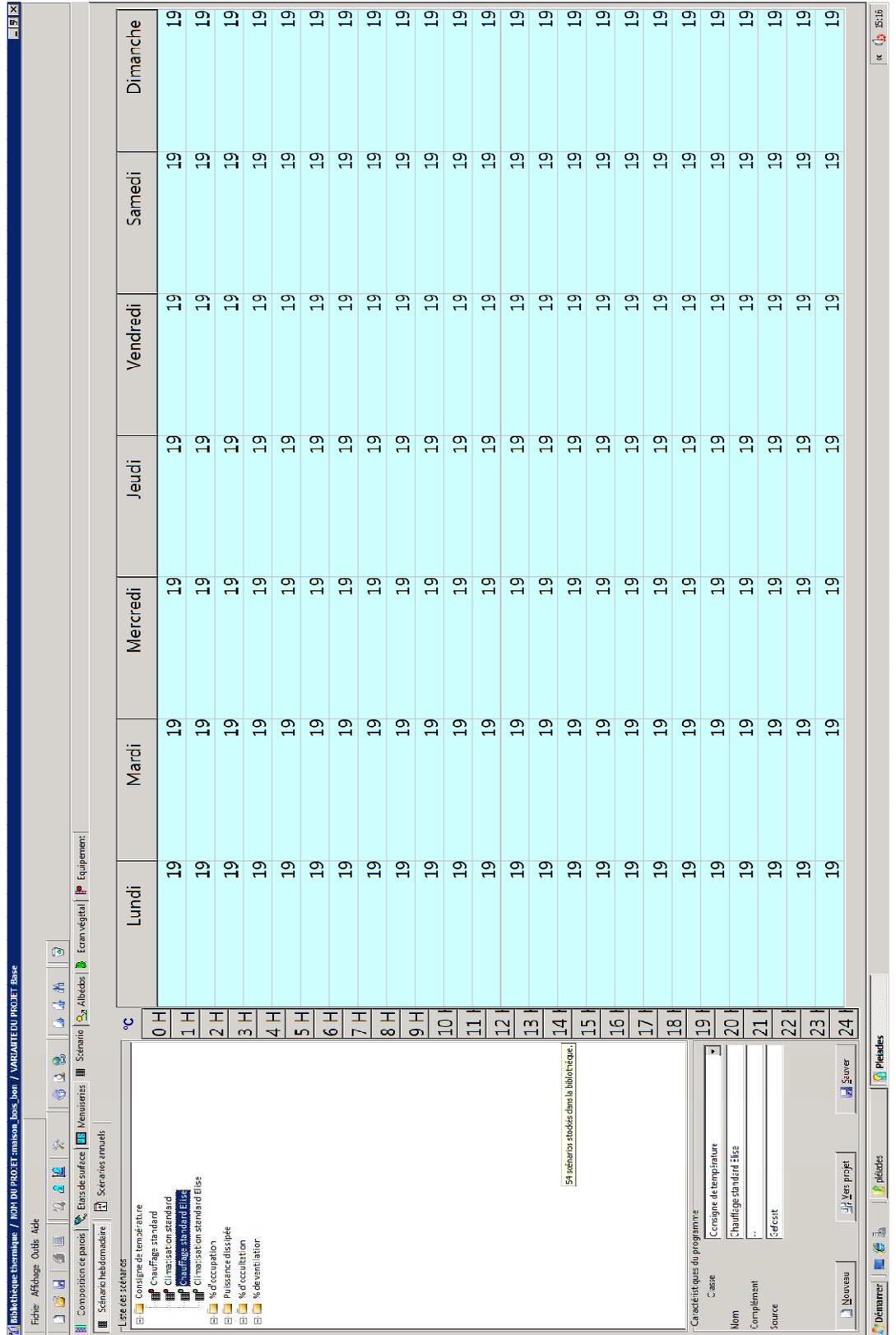


Figure 129 : Scénario de chauffage de l'air hebdomadaire pour toutes les zones

Bibliothèque thématique / NON DU PROJET / maison\_bon / VARIANTE DU PROJET - Base

Fichier Affichage Outils Aide

Composition de projets États descriptifs Scénarios annuels

Scénario hétéromodulaire Scénarios annuels

Liste des scénarios hétéromodulaires

- Consigne de température
- Chauffage standard
- Climatisation standard
- Chauffage standard Elise
- Climatisation standard Elise
- % d'occupation
- Puissance dissipée
- % d'occupation
- % de ventilation

Liste des scénarios annuels

- Consigne de température
- Heating Annual Stand
- Cooling annual Stand
- % d'occupation
- Puissance dissipée
- % de ventilation

Menuiseries Scénario Ecran végétal Équipement

Classe  
Nom  
Compément de nom  
Origine

Consigne de température  
Heating Annual Stand

Afficher le détail du scénario annuel

1	Chauffage standard Elise 1 Janvier au 7 Janvier	14	Chauffage standard Elise 2 Avril au 8 Avril	27	2 juillet au 8 juillet	40	Chauffage standard Elise 1 Octobre au 7 Octobre
2	Chauffage standard Elise 8 Janvier au 4 Janvier	15	Chauffage standard Elise 9 Avril au 15 Avril	28	9 juillet au 13 juillet	41	Chauffage standard Elise 8 Octobre au 14 Octobre
3	Chauffage standard Elise 13 Janvier au 21 Janvier	16	Avril au 22 Avril	29	16 juillet au 22 juillet	42	Chauffage standard Elise 15 Octobre au 21 Octobre
4	Chauffage standard Elise 22 Janvier au 28 Janvier	17	Avril au 29 Avril	30	23 juillet au 28 juillet	43	Chauffage standard Elise 22 Octobre au 28 Octobre
5	Chauffage standard Elise 29 Janvier au 4 Février	18	Avril au 6 Mai	31	30 juillet au 5 Août	44	Chauffage standard Elise 29 Octobre au 4 Novembre
6	Chauffage standard Elise 5 Février au 11 Février	19	Mai au 13 Mai	32	6 Août au 12 Août	45	Chauffage standard Elise 5 Novembre au 11 Novembre
7	Chauffage standard Elise 12 Février au 18 Février	20	Mai au 20 Mai	33	13 Août au 19 Août	46	Chauffage standard Elise 12 Novembre au 18 Novembre
8	Chauffage standard Elise 19 Février au 25 Février	21	Mai au 27 Mai	34	20 Août au 26 Août	47	Chauffage standard Elise 19 Novembre au 25 Novembre
9	Chauffage standard Elise 26 Février au 4 Mars	22	Mai au 3 Juin	35	27 Août au 2 Septembre	48	Chauffage standard Elise 26 Novembre au 2 Décembre
10	Chauffage standard Elise 5 Mars au 11 Mars	23	4 Juin au 10 Juin	36	3 Septembre au 5 Septembre	49	Chauffage standard Elise 3 Décembre au 9 Décembre
11	Chauffage standard Elise 12 Mars au 18 Mars	24	11 Juin au 17 Juin	37	16 Septembre au 16 Septembre	50	Chauffage standard Elise 10 Décembre au 16 Décembre
12	Chauffage standard Elise 19 Mars au 25 Mars	25	18 Juin au 24 Juin	38	Chauffage standard Elise 17 Septembre au 23 Septembre	51	Chauffage standard Elise 17 Décembre au 23 Décembre
13	Chauffage standard Elise 30 Mars au 1 Avril	26	25 Juin au 1 juillet	39	Chauffage standard Elise 24 Septembre au 30 Septembre	52	Chauffage standard Elise 24 Décembre au 30 Décembre

Revenir Importer un fichier liste Sauver

Planudes

15:16

Figure 130 : Scénario de chauffage de l'air annuel pour toutes les zones

## H. Récapitulatif des pièces et parois du bâtiment étudié

Remarque : la composition « STANDARD » fait référence à la composition du mur extérieur.

Nom de la pièce	Nom de la paroi	Contact	Surface	Orientation	Incli.	F	Composition
RDC - 1 - salon/salle à manger/cuisine	Plancher 1/1	Sol	29.88	0	180	0	dalle_2
	Plafond Int.1/2	R+1 - 6 - chambre_3 / Plancher Int.6/1	12.2	0	0	0	plancher_int_1
	Plafond Int.1/3	R+1 - 11 - hall_étage/dressing / Plancher Int.11/1	5.4	0	0	0	plancher_int_1
	Plafond Int.1/4	R+1 - 13 - chambre_2 / Plancher Int.13/1	12.2	0	0	0	plancher_int_1
	Paroi 1/5	Extérieur	10.56	-110	90	1	STANDARD
	Paroi 1/6	RDC - 2 - entrée / Paroi 2/9	3.03	-110	90	0	cloison_bauge
	Paroi 1/7	RDC - 5 - escalier_RDC / Paroi 5/6	8.31	160	90	0	cloison_bauge
	Paroi 1/8	Extérieur	13.57	70	90	1	STANDARD
	Paroi 1/9	Extérieur	15.3	-20	90	1	STANDARD
RDC - 2 - entrée	Plancher 2/1	Sol	6.49	0	180	0	dalle_2
	Plafond Int.2/2	R+1 - 8 - SDB / Plancher Int.8/1	1.8	0	0	0	plancher_int_2
	Plafond Int.2/3	R+1 - 10 - douche / Plancher Int.10/1	0.6	0	0	0	plancher_int_2
	Toiture 2/4	Extérieur	0.1	0	0	0	toit
	Paroi 2/5	Extérieur	8.82	-110	90	1	STANDARD
	Paroi 2/6	RDC - 3 - toilette_RDC / Paroi 3/6	5.58	160	90	1	cloison_norm
	Paroi 2/7	RDC - 4 - chambre_1 / Paroi 4/11	2.78	-110	90	1	cloison_norm
	Paroi 2/8	RDC - 5 - escalier_RDC / Paroi 5/3	1.15	160	90	0	cloison_norm
	Paroi 2/9	RDC - 1 - salon/salle à manger/cuisine / Paroi 1/6	3.03	70	90	0	cloison_bauge
RDC - 3 - toilette_RDC	Plancher 3/1	Sol	2.37	0	180	0	dalle_2
	Plafond Int.3/2	R+1 - 8 - SDB / Plancher Int.8/2	2.4	0	0	0	plancher_int_2
	Paroi 3/3	Extérieur	2.78	-110	90	0	STANDARD
	Paroi 3/4	RDC - 4 - chambre_1 / Paroi 4/13	5.58	160	90	0	cloison_norm
	Paroi 3/5	RDC - 4 - chambre_1 / Paroi 4/12	2.78	-110	90	0	cloison_norm
	Paroi 3/6	RDC - 2 - entrée / Paroi 2/6	5.58	-20	90	1	cloison_norm
RDC - 4 - chambre_1	Plancher 4/1	Sol	14.9	0	180	0	dalle_1
	Plafond Int.4/2	R+1 - 8 - SDB / Plancher Int.8/3	2.1	0	0	0	plancher_int_2
	Plafond Int.4/3	R+1 - 9 - toilette_étage / Plancher Int.9/1	1.1	0	0	0	plancher_int_2
	Plafond Int.4/4	R+1 - 10 - douche / Plancher Int.10/2	0.3	0	0	0	plancher_int_2
	Plafond Int.4/5	R+1 - 11 - hall_étage/dressing / Plancher Int.11/2	6.4	0	0	0	plancher_int_1
	Plafond Int.4/6	R+1 - 12 - buanderie / Plancher Int.12/1	5	0	0	0	plancher_int_2
	Paroi 4/7	Extérieur	2.81	-110	90	0	STANDARD
	Paroi 4/8	Extérieur	15.3	160	90	2	STANDARD
	Paroi 4/9	Extérieur	8.36	70	90	0	STANDARD
	Paroi 4/10	RDC - 5 - escalier_RDC / Paroi 5/4	9.72	-20	90	0	cloison_norm
	Paroi 4/11	RDC - 2 - entrée / Paroi 2/7	2.78	70	90	1	cloison_norm
	Paroi 4/12	RDC - 3 - toilette_RDC / Paroi 3/5	2.78	70	90	0	cloison_norm
	Paroi 4/13	RDC - 3 - toilette_RDC / Paroi 3/4	5.58	-20	90	0	cloison_norm

RDC - 5 - escalier_RDC	Plancher 5/1	Sol	5.03	0	180	0	dalle_1
	Plafond Int.5/2	R+1 - 11 - hall_étage/dressing / Plancher Int.11/3	1.3	0	0	0	plancher_int_1
	Paroi 5/3	RDC - 2 - entrée / Paroi 2/8	1.15	-20	90	0	cloison_norm
	Paroi 5/4	RDC - 4 - chambre_1 / Paroi 4/10	9.72	160	90	0	cloison_norm
	Paroi 5/5	Extérieur	3.01	70	90	0	STANDARD
	Paroi 5/6	RDC - 1 - salon/salle à manger/cuisine / Paroi 1/7	8.31	-20	90	0	cloison_bauge
R+1 - 6 - chambre_3	Plancher Int.6/1	RDC - 1 - salon/salle à manger/cuisine / Plafond Int.1/2	12.2	180	180	0	plancher_int_1
	Toiture 6/2	Extérieur	14.66	-110	34	0	toit
	Paroi 6/3	Extérieur	7.94	-110	90	1	STANDARD
	Paroi 6/4	R+1 - 7 - escalier_étage/vidé_hall / Paroi 7/12	4.18	160	90	0	cloison_norm
	Paroi 6/5	R+1 - 11 - hall_étage/dressing / Paroi 11/14	4.7	70	90	1	cloison_norm
	Paroi 6/6	R+1 - 13 - chambre_2 / Paroi 13/3	16.08	-110	90	0	cloison_norm
	Paroi 6/7	Extérieur	8.88	-20	90	1	STANDARD
R+1 - 7 - escalier_étage/vidé_hall	Toiture 7/1	Extérieur	6.73	-110	34	1	toit
	Toiture 7/2	Extérieur	2.65	70	34	0	toit
	Paroi 7/3	Extérieur	4.76	-110	90	0	STANDARD
	Paroi 7/4	R+1 - 8 - SDB / Paroi 8/11	3.82	160	90	0	cloison_norm
	Paroi 7/5	R+1 - 10 - douche / Paroi 10/6	3.2	70	90	0	cloison_norm
	Paroi 7/6	R+1 - 12 - buanderie / Paroi 12/11	1.82	-110	90	0	cloison_norm
	Paroi 7/7	R+1 - 12 - buanderie / Paroi 12/10	3.78	-110	90	0	cloison_norm
	Paroi 7/8	R+1 - 11 - hall_étage/dressing / Paroi 11/9	2.49	-110	90	0	cloison_norm
	Paroi 7/9	R+1 - 11 - hall_étage/dressing / Paroi 11/8	2.21	-110	90	0	cloison_bauge
	Paroi 7/10	R+1 - 11 - hall_étage/dressing / Paroi 11/7	1.57	-110	90	0	cloison_bauge
	Paroi 7/11	R+1 - 11 - hall_étage/dressing / Paroi 11/6	1.49	-110	90	0	cloison_norm
	Paroi 7/12	R+1 - 6 - chambre_3 / Paroi 6/4	4.18	-20	90	0	cloison_norm
R+1 - 8 - SDB	Plancher Int.8/1	RDC - 2 - entrée / Plafond Int.2/2	1.8	180	180	0	plancher_int_2
	Plancher Int.8/2	RDC - 3 - toilette_RDC / Plafond Int.3/2	2.4	180	180	0	plancher_int_2
	Plancher Int.8/3	RDC - 4 - chambre_1 / Plafond Int.4/2	2.1	180	180	0	plancher_int_2
	Toiture 8/4	Extérieur	7.45	-110	34	0	toit
	Paroi 8/5	Extérieur	4.23	-110	90	1	STANDARD
	Paroi 8/6	R+1 - 9 - toilette_étage / Paroi 9/5	2.9	70	90	0	cloison_norm
	Paroi 8/7	Extérieur	4.77	160	90	1	STANDARD
	Paroi 8/8	R+1 - 12 - buanderie / Paroi 12/6	3.92	-110	90	0	cloison_norm
	Paroi 8/9	R+1 - 12 - buanderie / Paroi 12/5	1.38	70	90	0	cloison_norm
	Paroi 8/10	R+1 - 10 - douche / Paroi 10/4	2.8	70	90	0	cloison_norm
	Paroi 8/11	R+1 - 7 - escalier_étage/vidé_hall / Paroi 7/4	3.82	160	90	0	cloison_norm
R+1 - 9 - toilette_étage	Plancher Int.9/1	RDC - 4 - chambre_1 / Plafond Int.4/3	1.1	180	180	0	plancher_int_2
	Toiture 9/2	Extérieur	1.32	-110	34	0	toit
	Paroi 9/3	Extérieur	2.15	-110	90	0	STANDARD
	Paroi 9/4	Extérieur	2.26	160	90	0	STANDARD
	Paroi 9/5	R+1 - 8 - SDB / Paroi 8/6	2.9	70	90	0	cloison_norm

R+1 - 10 - douche	Plancher Int.10/1	RDC - 2 - entrée / Plafond Int.2/3	0.6	180	180	0	plancher_int_2
	Plancher Int.10/2	RDC - 4 - chambre_1 / Plafond Int.4/4	0.3	180	180	0	plancher_int_2
	Toiture 10/3	Extérieur	1.08	-110	34	0	toit
	Paroi 10/4	R+1 - 8 - SDB / Paroi 8/10	2.8	70	90	0	cloison_norm
	Paroi 10/5	R+1 - 12 - buanderie / Paroi 12/4	3.41	-110	90	0	cloison_norm
	Paroi 10/6	R+1 - 7 - escalier_étage/vidé_hall / Paroi 7/5	3.2	70	90	0	cloison_norm
R+1 - 11 - hall_étage/dressing	Plancher Int.11/1	RDC - 1 - salon/salle à manger/cuisine / Plafond Int.1/3	5.4	180	180	0	plancher_int_1
	Plancher Int.11/2	RDC - 4 - chambre_1 / Plafond Int.4/5	6.4	180	180	0	plancher_int_1
	Plancher Int.11/3	RDC - 5 - escalier_RDC / Plafond Int.5/2	1.3	180	180	0	plancher_int_1
	Toiture 11/4	Extérieur	2.04	-110	34	0	toit
	Toiture 11/5	Extérieur	13.71	70	34	0	toit
	Paroi 11/6	R+1 - 7 - escalier_étage/vidé_hall / Paroi 7/11	1.49	70	90	0	cloison_norm
	Paroi 11/7	R+1 - 7 - escalier_étage/vidé_hall / Paroi 7/10	1.57	70	90	0	cloison_bauge
	Paroi 11/8	R+1 - 7 - escalier_étage/vidé_hall / Paroi 7/9	2.21	70	90	0	cloison_bauge
	Paroi 11/9	R+1 - 7 - escalier_étage/vidé_hall / Paroi 7/8	2.49	70	90	0	cloison_norm
	Paroi 11/10	R+1 - 12 - buanderie / Paroi 12/9	10.62	-110	90	1	cloison_norm
	Paroi 11/11	Extérieur	5.04	160	90	0	STANDARD
	Paroi 11/12	Extérieur	11.13	70	90	2	STANDARD
	Paroi 11/13	R+1 - 13 - chambre_2 / Paroi 13/4	8.82	160	90	1	cloison_norm
	Paroi 11/14	R+1 - 6 - chambre_3 / Paroi 6/5	4.7	-110	90	1	cloison_norm
R+1 - 12 - buanderie	Plancher Int.12/1	RDC - 4 - chambre_1 / Plafond Int.4/6	5	180	180	0	plancher_int_2
	Toiture 12/2	Extérieur	1.92	-110	34	0	toit
	Toiture 12/3	Extérieur	4.09	70	34	0	toit
	Paroi 12/4	R+1 - 10 - douche / Paroi 10/5	3.41	70	90	0	cloison_norm
	Paroi 12/5	R+1 - 8 - SDB / Paroi 8/9	1.38	-110	90	0	cloison_norm
	Paroi 12/6	R+1 - 8 - SDB / Paroi 8/8	3.92	70	90	0	cloison_norm
	Paroi 12/7	Extérieur	1.82	160	90	0	STANDARD
	Paroi 12/8	Extérieur	3.78	160	90	1	STANDARD
	Paroi 12/9	R+1 - 11 - hall_étage/dressing / Paroi 11/10	10.62	70	90	1	cloison_norm
	Paroi 12/10	R+1 - 7 - escalier_étage/vidé_hall / Paroi 7/7	3.78	70	90	0	cloison_norm
Paroi 12/11	R+1 - 7 - escalier_étage/vidé_hall / Paroi 7/6	1.82	70	90	0	cloison_norm	
R+1 - 13 - chambre_2	Plancher Int.13/1	RDC - 1 - salon/salle à manger/cuisine / Plafond Int.1/4	12.2	180	180	0	plancher_int_1
	Toiture 13/2	Extérieur	14.67	70	34	0	toit
	Paroi 13/3	R+1 - 6 - chambre_3 / Paroi 6/6	16.08	70	90	0	cloison_norm
	Paroi 13/4	R+1 - 11 - hall_étage/dressing / Paroi 11/13	8.82	-20	90	1	cloison_norm
	Paroi 13/5	Extérieur	7.94	70	90	1	STANDARD
	Paroi 13/6	Extérieur	8.82	-20	90	1	STANDARD

Tableau 53 : Récapitulatif des pièces et parois du bâtiment

Nom (Pleiades)	Reference unit	Data source - Production	PROD (kg CO <sub>2</sub> eq) / Reference Unit	PROD (MJe) / Reference unit	EoL scenario	Data source - EoL	EoL (kg CO <sub>2</sub> eq) / Reference Unit	EoL (MJe) / Reference Unit	TOTAL (kg CO <sub>2</sub> eq) / Reference Unit	TOTAL (MJe) / Reference Unit
Ardoise	kg	Ecoinvent database - natural stone plate, cut, at regional storage	0.26	8.42	Assumption: this material is considered as remaining on the ground, on site, after building destruction, to be used as fill material	/	0	0	0.26	8.42
Béton lourd	m <sup>3</sup>	Ecoinvent database - concrete, exacting, at plant.	310.2	1687.4	Scenario C	Ecoinvent database - disposal, building, concrete gravel, to final disposal	32.36	707.62	342.61	2395.04
Bois lourd	m <sup>3</sup>	Ecoinvent database - plywood, indoor use, at plant	501.08	32847.79	Scenario C	Ecoinvent database - disposal, building, fibre board, to final disposal	154.53	222.69	655.61	33070.48
Brique pleine de 5.5 cm	kg	Ecoinvent database - brick, at plant	0.24	2.83	Scenario C	Ecoinvent database - disposal, building, concrete gravel, to final disposal	0.01	0.3	0.25	3.13
Cadre bois	m <sup>2</sup>	Ecoinvent - Window frame, wood, U=1.5 W/m <sup>2</sup> K, at plant/RER U	131.14	4740.47	Scenario C	Ecoinvent database - disposal, building, window frame, wood, to final disposal/CH S	19.23	28.56	150.37	4769.03
Carrelage	kg	Ecoinvent database - ceramic tiles, at regional storage	0.78	14.67	Assumption : 100% of materials are sent to final disposal	Ecoinvent database - disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill	0.01	0.2	0.79	14.87
Fen bat bois DV CLIMAPLUS N 6.12.6	m <sup>2</sup>	Proportional mix of production of glass and frame ("Fenêtre 66% double vitrage, 34% cadre bois")	65.13	1921.78		Proportional mix of EoL of glass and frame ("Fenêtre 66% double vitrage, 34% cadre bois")	7.63	13.79	72.76	1935.57
Hourdis de 12 en béton	kg	Ecoinvent database - autoclaved aerated concrete block	0.41	3.43	Scenario C	Ecoinvent database - disposal, building, concrete gravel, to final disposal	0.01	0.31	0.43	3.74
Laine de bois	kg	Ecoinvent database - wood wool, u=20%, at plant	0.06	19.82	Scenario C	Ecoinvent database - disposal, wood untreated, 20% water, to municipal incineration	0.01	0.17	0.07	19.99
Mortier	kg	Ecoinvent database - cement mortar, at plant	0.19	1.51	Scenario C	Ecoinvent database - disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal	0.01	0.31	0.20	1.82
Panneau OSB	m <sup>3</sup>	Ecoinvent database - oriented strand board, at plant	266.04	18304.78	Scenario C	Ecoinvent database - disposal, building, fibre board, to final disposal	131.35	189.29	397.39	18494.06

## I. Origine des données du datapool (GWP et CED)

Tableau 54 : Origine des données du datapool (GWP et CED)

Nom (Pleiades)	Reference unit	Data source - Production	PROD (kg CO <sub>2</sub> eq) / Reference Unit	PROD (MJe <sub>q</sub> ) / Reference unit	EoL scenario	Data source - EOL	EoL (kg CO <sub>2</sub> eq) / Reference Unit	EoL (MJe <sub>q</sub> ) / Reference Unit	TOTAL (kg CO <sub>2</sub> eq) / Reference Unit	TOTAL (MJe <sub>q</sub> ) / Reference Unit
Parpaing de 20	kg	Ecoinvent database - autoclaved aerated concrete block	0.41	3.43	Scenario C	Ecoinvent database - disposal, building, concrete gravel, to final disposal	0.01	0.31	0.43	3.74
Placoplatre BA 13	m <sup>2</sup>	www.inies.fr - FDES Plaque Placoplatre® BA13 - Société Placoplatre - Février 2006	0.17	3.4	The EOL impacts are taken into account in production LCI data	/	/	/	0.17	3.40
Polystyrène expansé	kg	Ecoinvent database - polystyrene foam slab, at plant	4.21	106.08	Scenario C	Ecoinvent database - disposal, building, polystyrene isolation, flame-retardant, to final disposal	3.15	0.27	7.36	106.35
Polyuréthane	kg	Ecoinvent database - polyurethane, rigid foam, at plant	4.31	102.56	Ecoinvent considers that polyurethane can not be sorted.	Ecoinvent database - disposal, building, polyurethane foam, to final disposal	2.47	1.36	6.78	103.92
Porte bois intérieure	m <sup>2</sup>	Ecoinvent database - door, inner, wood, at plant	33.88	1807.1		Ecoinvent database - Disposal, building, door, inner, wood, to final disposal/CH S	7.28	14.76	44.16	1821.86
Porte bois isolante performante	m <sup>2</sup>	Ecoinvent database - door, outer, wood-aluminium, at plant	87.01	1900.47		Ecoinvent database - Disposal, building, door, outer, wood-aluminium, to final disposal/CH S	3.19	32.5	90.20	1932.97
Steel (Hot Dip Galvanised) exterior and interior	kg	Worldsteel Association	1.08	18.33	European average Recycling rate: 95%	See Worldsteel reports - Production data were given directly by ArcelorMittal	"credits" from recycling rate are determined with the MSR method and are already included in the data for production impacts - see ArcelorMittal Maizières Environment, Materials and Life-Cycle cluster; and/or Worldsteel reports for more details		1.08	18.33
Steel (Organic coated)	kg	Worldsteel Association	1.03	19.4	European average Recycling rate: 95%	See Worldsteel reports - Production data were given directly by ArcelorMittal			1.03	19.4
Steel (Rebars)	kg	Worldsteel Association	1.31	16.49	World average Recycling rate: 65%	See Worldsteel reports - Production data were given directly by ArcelorMittal			1.31	16.49
Double vitrage	m <sup>2</sup>	Ecoinvent - glazing, double (2-IV), U<1.1 W/m <sup>2</sup> K, at plant	31.13	469.73	Ecoinvent assumes this product will not be recycled or sorted and so recommends scenario C	Ecoinvent - disposal, building, glazing 2-IV, U<1,1W/m <sup>2</sup> K, to final disposal	1.65	6.18	32.78	475.91

## J. Consommation d'électricité – tableau récapitulatif des appareils et de leur consommation

Appareil	Etat	Puissance instantanée [W]	Temps d'utilisation en heures/jour	Temps d'utilisation en jours/semaine	Temps d'utilisation en semaines/an	Consommation [kWh]
Grille pain	marche	1300	0.25	1	52	16.9
Ecran ordinateur	marche	25	2	6	52	15.6
Ordinateur	marche	120	2	6	52	74.88
Baffles	éteints	6.84	22	6	52	46.94976
	marche	9	2	6	52	5.616
Appareil à croques	marche	631	0.5	1	26	16.406
Frigido/congélateur	marche	130	24	7	52	1135.68
Micro ondes	marche	3050	0.5	3.5	52	277.55
Four	marche	3000	0.5	3.57	52	273
Taques électriques	marche	1500	0.5	7	52	273
Hotte	marche	95	1	7	52	34.58
Lave vaisselle	marche	73	1	7	52	26.572
Aspirateur	marche	550	0.5	2	52	28.6
Fer à repasser	marche	2140	4	1	52	445.12
Machine à laver	veille	0				
	marche à plein régime (1/4 du temps)	2100	0.375 <sup>27</sup>	2	52	81.9
	marche sans chauffer la résistance (3/4 du temps)	80	1.125	2	52	9.36
Sèche linge	veille	6	10	2	52	6.24
	marche	1930	1	2	52	200.72
Imprimante	allumée sans imprimer	18.4	1	5	52	4.784
	en impression	340	0.5	5	52	44.2
Réveil	marche	0				0
Lampe bureau 1	éteinte en été	2.5	23.5	5	26	7.6375
	allumée en été	40	0.5	5	26	2.795
	éteinte en hiver	2.5	22.5	5	26	7.3125
	allumée en hiver	40	1.5	5	26	8.385
Lampe bureau 2	éteinte en été	2.5	23.5	5	26	7.6375
	allumée en été	40	0.5	5	26	2.795
	éteinte en hiver	2.5	22.5	5	26	7.3125
	allumée en hiver	40	1.5	5	26	8.385
Télévision	veille (du lundi au vendredi)	9	21	5	52	49.14
	marche (du lundi au vendredi)	60	3	5	52	46.8
	veille (le w-e)	9	19	2	52	17.784
	marche (le w-e)	60	5	2	52	31.2

<sup>27</sup> 2 machines d'1h30 par semaine, dont 1/4 en plein régime; idem pour le sèche linge avec 2 séchoirs d'1h par semaine (en état « marche »)

Brosse à dents électrique	chargement	0				0
Chargeur GSM	chargement	0				0
Machine à café	éteinte	7	23	7	52	58.604
	marche en plein régime	1300	0.25	7	52	118.3
	marche pas en plein régime	700	0.5	7	52	127.4
Lampe Cuisine en hiver	allumée	225	2	7	26	163.8
Lampe Cuisine en été	allumée	225	0.5	7	26	40.95
Lampe Salle à manger	allumée	375	2	7	52	273
Lampe Salon	allumée	300	2	7	52	218.4
Lampe Hall	allumée	380	0.5	7	52	69.16
Lampe Chambre 1	allumée	210	2	2	52	152.88
Lampe Chambre 2	allumée	105	2	7	52	76.44
Lampe Chambre 3	allumée	105	1	7	52	38.22
Lampe Salle de bains	allumée	300	1.5	7	52	163.8
Lampe Dressing	allumée	9	1	7	52	3.276
Lampe Toilettes	allumée	9	1	7	52	3.276
						4722.34776

Tableau 55 : Détermination de la consommation d'électricité dans la maison étudiée

## K. Compositions et multi-composition des parois

Nous allons ici mettre les compositions et multi-composition de toutes les parois du bâtiment, et ce pour les différentes alternatives étudiées.

- Maison acier peau tresa, avec et sans cloison en bauge
  - Mur extérieur

<p>Classe: Murs</p> <p>Nom: mur_ext_therm_bois</p> <p>Complément: --</p> <p>Origine: --</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Composants</th> <th>T</th> <th>cm</th> <th>kg/m<sup>2</sup></th> <th>λ</th> <th>R</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>panneaux tresa</td> <td>E</td> <td>1.0</td> <td>14</td> <td>0.299</td> <td>0.03</td> <td rowspan="8">Extérieur ↓ Intérieur</td> </tr> <tr> <td>Lame d'air 4 cm</td> <td>E</td> <td>4.0</td> <td>0</td> <td>0.250</td> <td>0.16</td> </tr> <tr> <td>Polystyrène expansé</td> <td>M</td> <td>8.0</td> <td>2</td> <td>0.039</td> <td>2.05</td> </tr> <tr> <td>Panneau OSB</td> <td>M</td> <td>1.8</td> <td>12</td> <td>0.130</td> <td>0.14</td> </tr> <tr> <td>Laine de bois</td> <td>M</td> <td>8.2</td> <td>11</td> <td>0.042</td> <td>1.95</td> </tr> <tr> <td>Lame d'air 6 cm</td> <td>E</td> <td>6.0</td> <td>0</td> <td>0.375</td> <td>0.16</td> </tr> <tr> <td>Placoplatre BA 13</td> <td>E</td> <td>1.3</td> <td>11</td> <td>0.320</td> <td>0.04</td> </tr> <tr> <td><b>Total</b></td> <td></td> <td><b>30.3</b></td> <td><b>50</b></td> <td></td> <td><b>4.53</b></td> </tr> </tbody> </table>	Composants	T	cm	kg/m <sup>2</sup>	λ	R		panneaux tresa	E	1.0	14	0.299	0.03	Extérieur ↓ Intérieur	Lame d'air 4 cm	E	4.0	0	0.250	0.16	Polystyrène expansé	M	8.0	2	0.039	2.05	Panneau OSB	M	1.8	12	0.130	0.14	Laine de bois	M	8.2	11	0.042	1.95	Lame d'air 6 cm	E	6.0	0	0.375	0.16	Placoplatre BA 13	E	1.3	11	0.320	0.04	<b>Total</b>		<b>30.3</b>	<b>50</b>		<b>4.53</b>	<p>Classe: Murs</p> <p>Nom: mur_ext_LCA_bois</p> <p>Complément: --</p> <p>Origine: --</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Composants</th> <th>T</th> <th>cm</th> <th>kg/m<sup>2</sup></th> <th>λ</th> <th>R</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>panneaux tresa</td> <td>E</td> <td>1.0</td> <td>14</td> <td>0.299</td> <td>0.03</td> <td rowspan="8">Extérieur ↓ Intérieur</td> </tr> <tr> <td>Bois lourd</td> <td>M</td> <td>0.9</td> <td>6</td> <td>0.230</td> <td>0.04</td> </tr> <tr> <td>Polystyrène expansé</td> <td>M</td> <td>8.0</td> <td>2</td> <td>0.039</td> <td>2.05</td> </tr> <tr> <td>Panneau OSB</td> <td>M</td> <td>1.8</td> <td>12</td> <td>0.130</td> <td>0.14</td> </tr> <tr> <td>Laine de bois</td> <td>M</td> <td>14.0</td> <td>20</td> <td>0.042</td> <td>3.33</td> </tr> <tr> <td>Placoplatre BA 13</td> <td>E</td> <td>1.3</td> <td>11</td> <td>0.320</td> <td>0.04</td> </tr> <tr> <td><b>Total</b></td> <td></td> <td><b>27.0</b></td> <td><b>65</b></td> <td></td> <td><b>5.63</b></td> </tr> </tbody> </table>	Composants	T	cm	kg/m <sup>2</sup>	λ	R		panneaux tresa	E	1.0	14	0.299	0.03	Extérieur ↓ Intérieur	Bois lourd	M	0.9	6	0.230	0.04	Polystyrène expansé	M	8.0	2	0.039	2.05	Panneau OSB	M	1.8	12	0.130	0.14	Laine de bois	M	14.0	20	0.042	3.33	Placoplatre BA 13	E	1.3	11	0.320	0.04	<b>Total</b>		<b>27.0</b>	<b>65</b>		<b>5.63</b>
Composants	T	cm	kg/m <sup>2</sup>	λ	R																																																																																																						
panneaux tresa	E	1.0	14	0.299	0.03	Extérieur ↓ Intérieur																																																																																																					
Lame d'air 4 cm	E	4.0	0	0.250	0.16																																																																																																						
Polystyrène expansé	M	8.0	2	0.039	2.05																																																																																																						
Panneau OSB	M	1.8	12	0.130	0.14																																																																																																						
Laine de bois	M	8.2	11	0.042	1.95																																																																																																						
Lame d'air 6 cm	E	6.0	0	0.375	0.16																																																																																																						
Placoplatre BA 13	E	1.3	11	0.320	0.04																																																																																																						
<b>Total</b>		<b>30.3</b>	<b>50</b>		<b>4.53</b>																																																																																																						
Composants	T	cm	kg/m <sup>2</sup>	λ	R																																																																																																						
panneaux tresa	E	1.0	14	0.299	0.03	Extérieur ↓ Intérieur																																																																																																					
Bois lourd	M	0.9	6	0.230	0.04																																																																																																						
Polystyrène expansé	M	8.0	2	0.039	2.05																																																																																																						
Panneau OSB	M	1.8	12	0.130	0.14																																																																																																						
Laine de bois	M	14.0	20	0.042	3.33																																																																																																						
Placoplatre BA 13	E	1.3	11	0.320	0.04																																																																																																						
<b>Total</b>		<b>27.0</b>	<b>65</b>		<b>5.63</b>																																																																																																						
<p>Classe: Murs</p> <p>Nom: mur_ext_struct_bois</p> <p>Complément: --</p> <p>Origine: --</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Composants</th> <th>T</th> <th>cm</th> <th>kg/m<sup>2</sup></th> <th>λ</th> <th>R</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Steel (Hot Deep Galvanised)</td> <td>M</td> <td>0.1</td> <td>8</td> <td>46.000</td> <td>0.00</td> <td rowspan="8">Extérieur ↓ Intérieur</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td><b>Total</b></td> <td></td> <td><b>0.1</b></td> <td><b>8</b></td> <td></td> <td><b>0.00</b></td> </tr> </tbody> </table>	Composants	T	cm	kg/m <sup>2</sup>	λ		R		Steel (Hot Deep Galvanised)	M	0.1	8	46.000	0.00	Extérieur ↓ Intérieur																																					<b>Total</b>		<b>0.1</b>	<b>8</b>		<b>0.00</b>	<p>Classe: Mur_ext</p> <p>Nom: mur_ext_bois</p> <p>Complément: --</p> <p>Source: --</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Composition</th> <th>%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>mur_ext_therm_bois</td> <td>50.0</td> </tr> <tr> <td>mur_ext_struct_bois</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>mur_ext_LCA_bois</td> <td>49.7</td> </tr> <tr> <td>toiture défaut</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>plancher défaut</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>cloison défaut</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>autre défaut</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td><b>Total</b></td> <td><b>100.0</b></td> </tr> </tbody> </table>	Composition	%	mur_ext_therm_bois	50.0	mur_ext_struct_bois	0.3	mur_ext_LCA_bois	49.7	toiture défaut	0.0	plancher défaut	0.0	cloison défaut	0.0	autre défaut	0.0	<b>Total</b>	<b>100.0</b>																															
Composants	T	cm	kg/m <sup>2</sup>	λ	R																																																																																																						
Steel (Hot Deep Galvanised)	M	0.1	8	46.000	0.00	Extérieur ↓ Intérieur																																																																																																					
<b>Total</b>		<b>0.1</b>	<b>8</b>		<b>0.00</b>																																																																																																						
Composition	%																																																																																																										
mur_ext_therm_bois	50.0																																																																																																										
mur_ext_struct_bois	0.3																																																																																																										
mur_ext_LCA_bois	49.7																																																																																																										
toiture défaut	0.0																																																																																																										
plancher défaut	0.0																																																																																																										
cloison défaut	0.0																																																																																																										
autre défaut	0.0																																																																																																										
<b>Total</b>	<b>100.0</b>																																																																																																										

Figure 131 : Compositions et multi-composition pour le mur extérieur de la maison acier/tresa

- Toiture

<p>Classe: Toitures</p> <p>Nom: toit_therm</p> <p>Complément: --</p> <p>Origine: --</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Composants</th> <th>T</th> <th>cm</th> <th>kg/m<sup>2</sup></th> <th>λ</th> <th>R</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Ardoise</td> <td>M</td> <td>0.8</td> <td>22</td> <td>2.100</td> <td>0.00</td> <td rowspan="10">Extérieur ↓ Intérieur</td> </tr> <tr> <td>Lame d'air spéciale 2</td> <td>E</td> <td>8.2</td> <td>0</td> <td>0.256</td> <td>0.32</td> </tr> <tr> <td>Polystyrène expansé</td> <td>M</td> <td>6.0</td> <td>2</td> <td>0.039</td> <td>1.54</td> </tr> <tr> <td>Panneau OSB</td> <td>M</td> <td>1.8</td> <td>12</td> <td>0.130</td> <td>0.14</td> </tr> <tr> <td>Laine de bois</td> <td>M</td> <td>13.8</td> <td>19</td> <td>0.042</td> <td>3.29</td> </tr> <tr> <td>Lame d'air 3 cm</td> <td>E</td> <td>3.0</td> <td>0</td> <td>0.188</td> <td>0.16</td> </tr> <tr> <td>Placoplatre BA 13</td> <td>E</td> <td>1.3</td> <td>11</td> <td>0.320</td> <td>0.04</td> </tr> <tr> <td><b>Total</b></td> <td></td> <td><b>34.9</b></td> <td><b>66</b></td> <td></td> <td><b>5.49</b></td> </tr> </tbody> </table>	Composants	T	cm	kg/m <sup>2</sup>	λ	R		Ardoise	M	0.8	22	2.100	0.00	Extérieur ↓ Intérieur	Lame d'air spéciale 2	E	8.2	0	0.256	0.32	Polystyrène expansé	M	6.0	2	0.039	1.54	Panneau OSB	M	1.8	12	0.130	0.14	Laine de bois	M	13.8	19	0.042	3.29	Lame d'air 3 cm	E	3.0	0	0.188	0.16	Placoplatre BA 13	E	1.3	11	0.320	0.04	<b>Total</b>		<b>34.9</b>	<b>66</b>		<b>5.49</b>	<p>Classe: Toitures</p> <p>Nom: toit_LCA</p> <p>Complément: --</p> <p>Origine: --</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Composants</th> <th>T</th> <th>cm</th> <th>kg/m<sup>2</sup></th> <th>λ</th> <th>R</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Ardoise</td> <td>M</td> <td>0.8</td> <td>22</td> <td>2.100</td> <td>0.00</td> <td rowspan="10">Extérieur ↓ Intérieur</td> </tr> <tr> <td>Steel (Hot Deep Galvanised)</td> <td>M</td> <td>0.1</td> <td>8</td> <td>46.000</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>Bois lourd</td> <td>M</td> <td>0.2</td> <td>1</td> <td>0.230</td> <td>0.01</td> </tr> <tr> <td>Polystyrène expansé</td> <td>M</td> <td>6.0</td> <td>2</td> <td>0.039</td> <td>1.54</td> </tr> <tr> <td>Panneau OSB</td> <td>M</td> <td>1.8</td> <td>12</td> <td>0.130</td> <td>0.14</td> </tr> <tr> <td>Laine de bois</td> <td>M</td> <td>20.0</td> <td>28</td> <td>0.042</td> <td>4.76</td> </tr> <tr> <td>Placoplatre BA 13</td> <td>E</td> <td>1.3</td> <td>11</td> <td>0.320</td> <td>0.04</td> </tr> <tr> <td><b>Total</b></td> <td></td> <td><b>30.2</b></td> <td><b>84</b></td> <td></td> <td><b>6.49</b></td> </tr> </tbody> </table>	Composants	T	cm	kg/m <sup>2</sup>	λ	R		Ardoise	M	0.8	22	2.100	0.00	Extérieur ↓ Intérieur	Steel (Hot Deep Galvanised)	M	0.1	8	46.000	0.00	Bois lourd	M	0.2	1	0.230	0.01	Polystyrène expansé	M	6.0	2	0.039	1.54	Panneau OSB	M	1.8	12	0.130	0.14	Laine de bois	M	20.0	28	0.042	4.76	Placoplatre BA 13	E	1.3	11	0.320	0.04	<b>Total</b>		<b>30.2</b>	<b>84</b>		<b>6.49</b>
Composants	T	cm	kg/m <sup>2</sup>	λ	R																																																																																																												
Ardoise	M	0.8	22	2.100	0.00	Extérieur ↓ Intérieur																																																																																																											
Lame d'air spéciale 2	E	8.2	0	0.256	0.32																																																																																																												
Polystyrène expansé	M	6.0	2	0.039	1.54																																																																																																												
Panneau OSB	M	1.8	12	0.130	0.14																																																																																																												
Laine de bois	M	13.8	19	0.042	3.29																																																																																																												
Lame d'air 3 cm	E	3.0	0	0.188	0.16																																																																																																												
Placoplatre BA 13	E	1.3	11	0.320	0.04																																																																																																												
<b>Total</b>		<b>34.9</b>	<b>66</b>		<b>5.49</b>																																																																																																												
Composants	T	cm	kg/m <sup>2</sup>	λ	R																																																																																																												
Ardoise	M	0.8	22	2.100	0.00		Extérieur ↓ Intérieur																																																																																																										
Steel (Hot Deep Galvanised)	M	0.1	8	46.000	0.00																																																																																																												
Bois lourd	M	0.2	1	0.230	0.01																																																																																																												
Polystyrène expansé	M	6.0	2	0.039	1.54																																																																																																												
Panneau OSB	M	1.8	12	0.130	0.14																																																																																																												
Laine de bois	M	20.0	28	0.042	4.76																																																																																																												
Placoplatre BA 13	E	1.3	11	0.320	0.04																																																																																																												
<b>Total</b>		<b>30.2</b>	<b>84</b>		<b>6.49</b>																																																																																																												

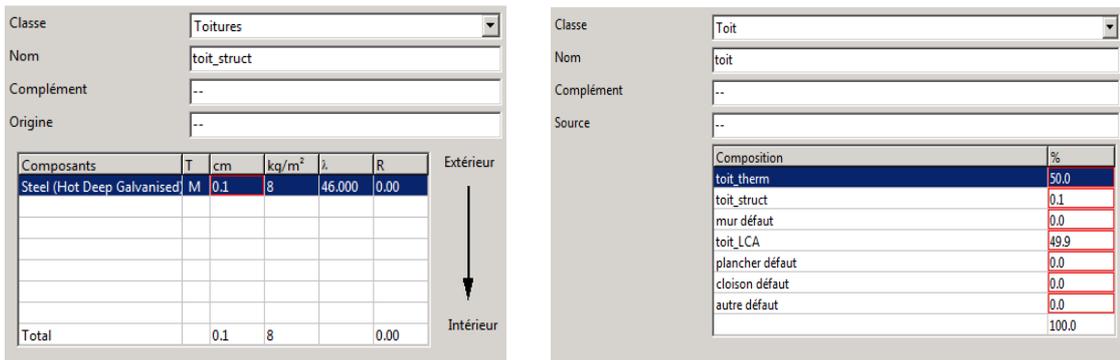


Figure 132 : Compositions et multi-composition pour la toiture de la maison acier/trespa

– Plancher\_1

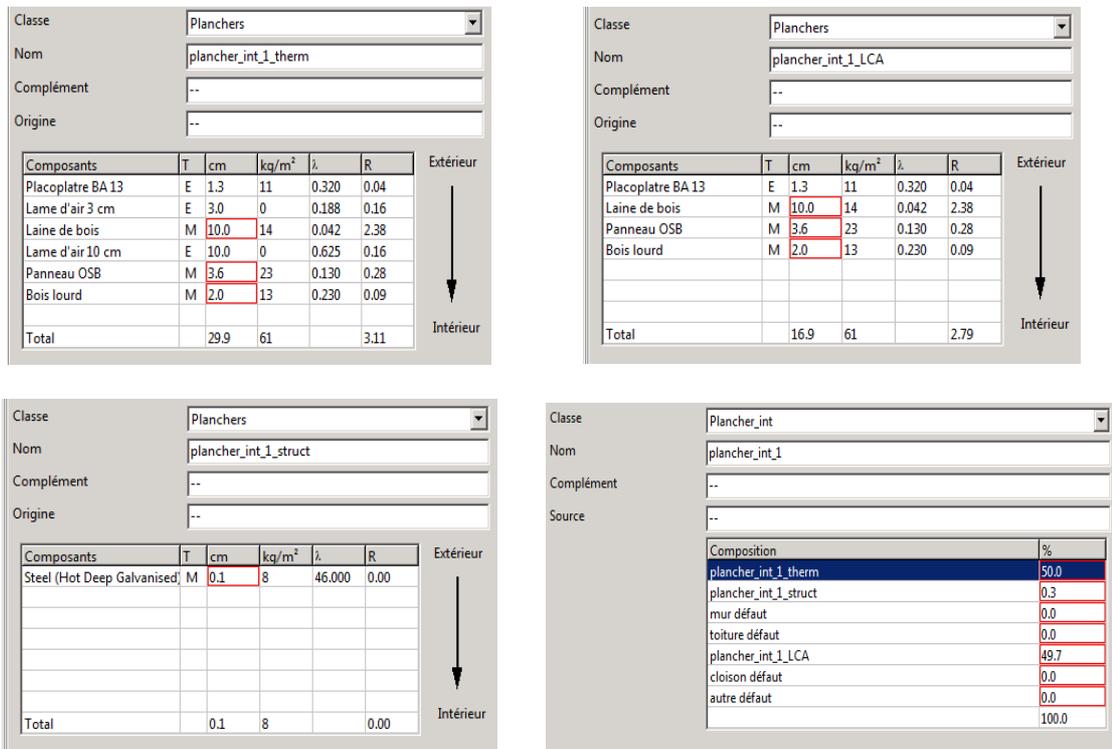


Figure 133 : Compositions et multi-composition pour le plancher 1 de la maison acier/trespa

– Plancher\_2

Classe: Planchers  
 Nom: plancher\_int\_2\_therm  
 Complément: --  
 Origine: --

Composants	T	cm	kg/m <sup>2</sup>	λ	R
Placoplatre BA 13	E	1.3	11	0.320	0.04
Lame d'air 3 cm	E	3.0	0	0.188	0.16
Laine de bois	M	10.0	14	0.042	2.38
Lame d'air 10 cm	E	10.0	0	0.625	0.16
Steel (Hot Deep Galvanised)	M	0.5	39	46.000	0.00
Mortier	M	4.0	80	1.150	0.03
Carrelage	M	1.0	23	1.700	0.01
<b>Total</b>		<b>29.8</b>	<b>167</b>		<b>2.78</b>

Extérieur ↓ Intérieur

Classe: Planchers  
 Nom: plancher\_int\_2\_LCA  
 Complément: --  
 Origine: --

Composants	T	cm	kg/m <sup>2</sup>	λ	R
Placoplatre BA 13	E	1.3	11	0.320	0.04
Laine de bois	M	10.0	14	0.042	2.38
Steel (Hot Deep Galvanised)	M	0.5	39	46.000	0.00
Mortier	M	4.0	80	1.150	0.03
Carrelage	M	1.0	23	1.700	0.01
<b>Total</b>		<b>16.8</b>	<b>167</b>		<b>2.46</b>

Extérieur ↓ Intérieur

Classe: Planchers  
 Nom: plancher\_int\_2\_struct  
 Complément: --  
 Origine: --

Composants	T	cm	kg/m <sup>2</sup>	λ	R
Steel (Hot Deep Galvanised)	M	0.1	8	46.000	0.00
<b>Total</b>		<b>0.1</b>	<b>8</b>		<b>0.00</b>

Extérieur ↓ Intérieur

Classe: Plancher\_int  
 Nom: plancher\_int\_2  
 Complément: --  
 Source: --

Composition	%
plancher_int_2_therm	50.0
plancher_int_2_struct	0.3
mur défaut	0.0
toiture défaut	0.0
plancher_int_2_LCA	49.7
cloison défaut	0.0
autre défaut	0.0
<b>Total</b>	<b>100.0</b>

Figure 134 : Compositions et multi-composition pour le plancher 2 de la maison acier/trespa

– Dalle\_1

Classe: Planchers  
 Nom: dalle\_1\_therm  
 Complément: --  
 Origine: --

Composants	T	cm	kg/m <sup>2</sup>	λ	R
Béton lourd	M	20.0	460	1.750	0.11
Steel (Rebars)	M	0.2	16	50.000	0.00
Polyuréthane	M	5.0	2	0.030	1.67
Panneau OSB	M	3.6	23	0.130	0.28
Bois lourd	M	2.0	13	0.230	0.09
<b>Total</b>		<b>30.8</b>	<b>514</b>		<b>2.15</b>

Extérieur ↓ Intérieur

Classe: Planchers  
 Nom: dalle\_1\_LCA  
 Complément: --  
 Origine: --

Composants	T	cm	kg/m <sup>2</sup>	λ	R
Polyuréthane	M	5.0	2	0.030	1.67
Panneau OSB	M	3.6	23	0.130	0.28
Bois lourd	M	2.0	13	0.230	0.09
<b>Total</b>		<b>10.6</b>	<b>38</b>		<b>2.04</b>

Extérieur ↓ Intérieur

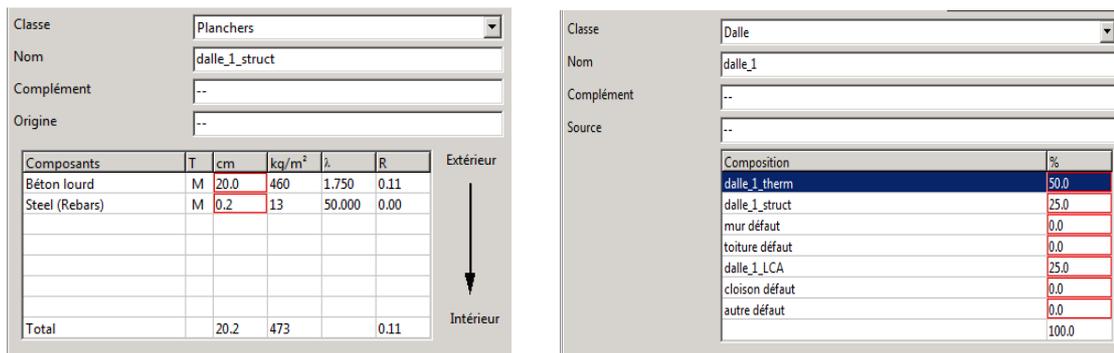


Figure 135 : Compositions et multi-composition pour la dalle 1 de la maison acier/trespa

– Dalle\_2

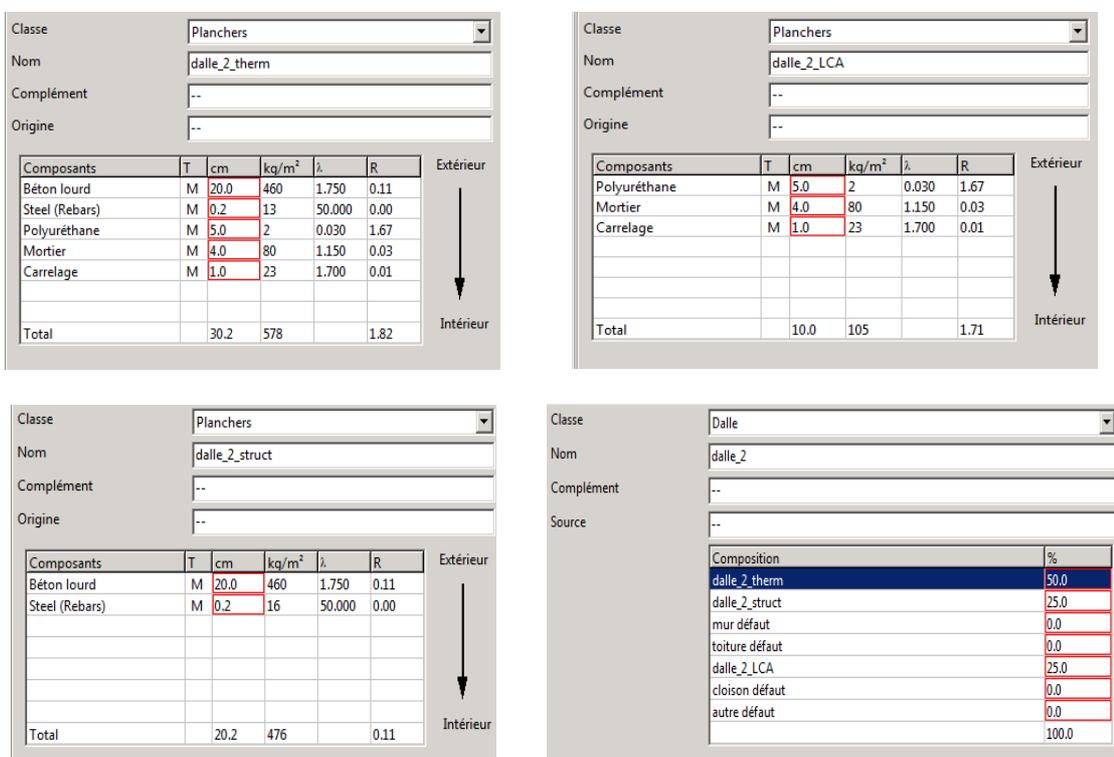


Figure 136 : Compositions et multi-composition pour la dalle 2 de la maison acier/trespa

– Cloison normale

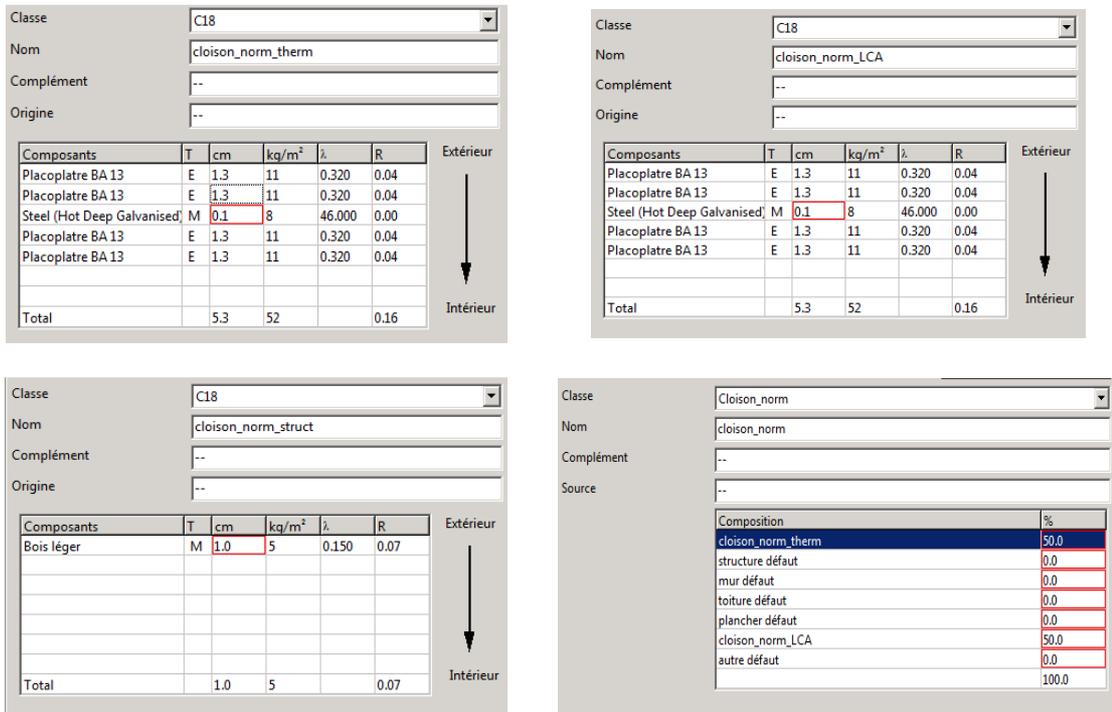


Figure 137 : Compositions et multi-composition pour la cloison normale de la maison acier/trespa

– Cloison bauge

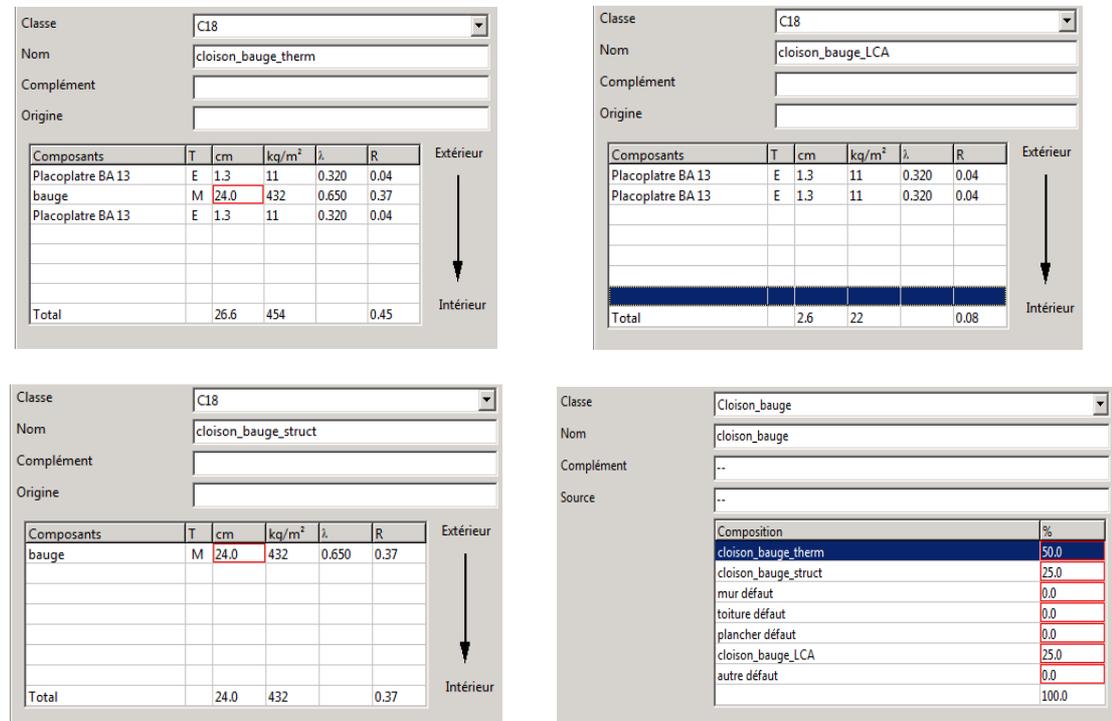


Figure 138 : Compositions et multi-composition pour la cloison en bauge de la maison acier/trespa

- Maison acier peau acier
  - Mur extérieur

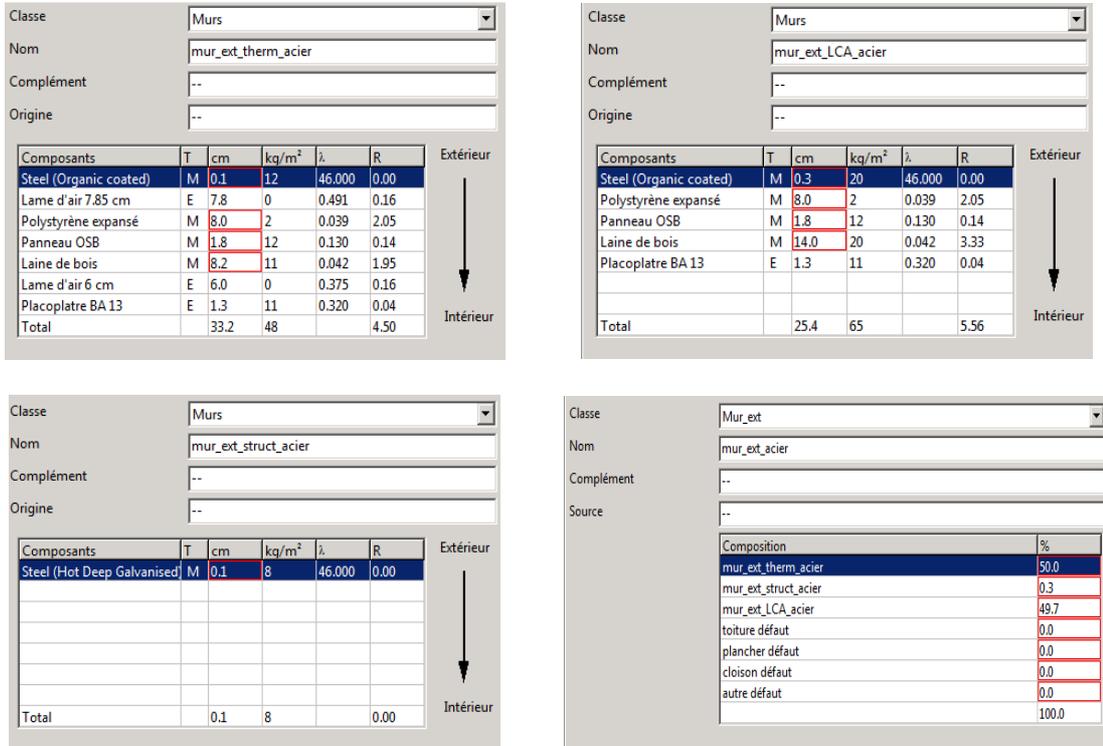


Figure 139 : Compositions et multi-composition pour le mur extérieur de la maison acier/acier

Pour les autres parois, se référer à celles du cas maison acier/trespa car ces parois sont identiques pour les 2 cas.

○ Maison acier peau brique

– Mur extérieur

Classe: Murs  
 Nom: mur\_ext\_therm\_brique  
 Complément: --  
 Origine: --

Composants	T	cm	kg/m <sup>2</sup>	λ	R
Brique pleine de 5.5 cm	E	5.5	94	1.100	0.05
Lame d'air 3 cm	E	3.0	0	0.188	0.16
Polystyrène expansé	M	8.0	2	0.039	2.05
Panneau OSB	M	1.8	12	0.130	0.14
Laine de bois	M	8.2	11	0.042	1.95
Lame d'air 6 cm	E	6.0	0	0.375	0.16
Placoplatre BA 13	E	1.3	11	0.320	0.04
<b>Total</b>		<b>33.8</b>	<b>130</b>		<b>4.55</b>

Extérieur ↓ Intérieur

Classe: Murs  
 Nom: mur\_ext\_LCA\_brique  
 Complément: --  
 Origine: --

Composants	T	cm	kg/m <sup>2</sup>	λ	R
Brique pleine de 5.5 cm	E	5.5	94	1.100	0.05
Polystyrène expansé	M	8.0	2	0.039	2.05
Panneau OSB	M	1.8	12	0.130	0.14
Laine de bois	M	14.0	20	0.042	3.33
Placoplatre BA 13	E	1.3	11	0.320	0.04
<b>Total</b>		<b>30.6</b>	<b>139</b>		<b>5.61</b>

Extérieur ↓ Intérieur

Classe: Murs  
 Nom: mur\_ext\_struct\_brique  
 Complément: --  
 Origine: --

Composants	T	cm	kg/m <sup>2</sup>	λ	R
Steel (Hot Deep Galvanised)	M	0.1	8	46.000	0.00
<b>Total</b>		<b>0.1</b>	<b>8</b>		<b>0.00</b>

Extérieur ↓ Intérieur

Classe: Mur\_ext  
 Nom: mur\_ext\_brique  
 Complément: --  
 Source: --

Composition	%
mur_ext_therm_brique	50.0
mur_ext_struct_brique	0.3
mur_ext_LCA_brique	49.7
toiture défaut	0.0
plancher défaut	0.0
cloison défaut	0.0
autre défaut	0.0
<b>Total</b>	<b>100.0</b>

Figure 140 : Compositions et multi-composition pour le mur extérieur de la maison acier/brique

– Toiture

Classe: Toitures  
 Nom: toit\_therm\_brique  
 Complément: --  
 Origine: --

Composants	T	cm	kg/m <sup>2</sup>	λ	R
Ardoise	M	0.8	22	2.100	0.00
Lame d'air spéciale 2	E	8.2	0	0.256	0.32
Polystyrène expansé	M	5.0	1	0.039	1.28
Panneau OSB	M	1.8	12	0.130	0.14
Laine de bois	M	13.8	19	0.042	3.29
Lame d'air 3 cm	E	3.0	0	0.188	0.16
Placoplatre BA 13	E	1.3	11	0.320	0.04
<b>Total</b>		<b>33.9</b>	<b>65</b>		<b>5.23</b>

Extérieur ↓ Intérieur

Classe: Toitures  
 Nom: toit\_LCA\_brique  
 Complément: --  
 Origine: --

Composants	T	cm	kg/m <sup>2</sup>	λ	R
Ardoise	M	0.8	22	2.100	0.00
Steel (Hot Deep Galvanised)	M	0.1	8	46.000	0.00
Bois lourd	M	0.2	1	0.230	0.01
Polystyrène expansé	M	5.0	1	0.039	1.28
Panneau OSB	M	1.8	12	0.130	0.14
Laine de bois	M	20.0	28	0.042	4.76
Placoplatre BA 13	E	1.3	11	0.320	0.04
<b>Total</b>		<b>29.2</b>	<b>83</b>		<b>6.23</b>

Extérieur ↓ Intérieur

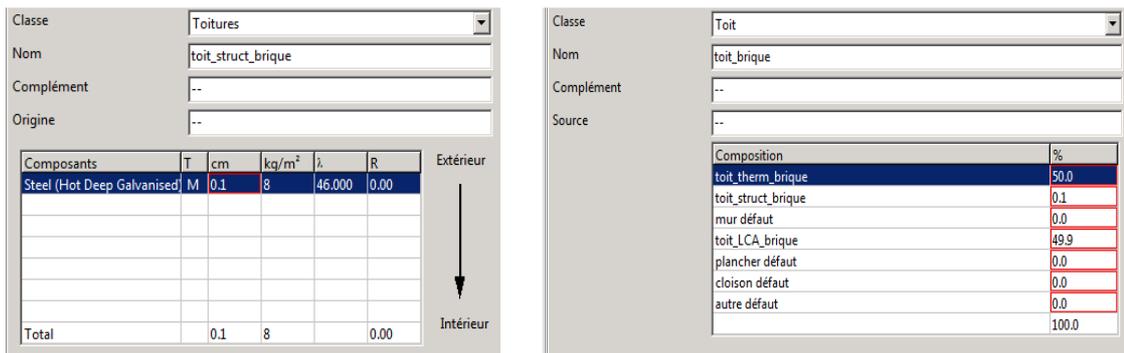


Figure 141 : Compositions et multi-composition pour la toiture de la maison acier/brique

De nouveau, se référer au premier cas pour le reste des parois.

- Maison mixte acier/maçonnerie peau brique

– Mur extérieur

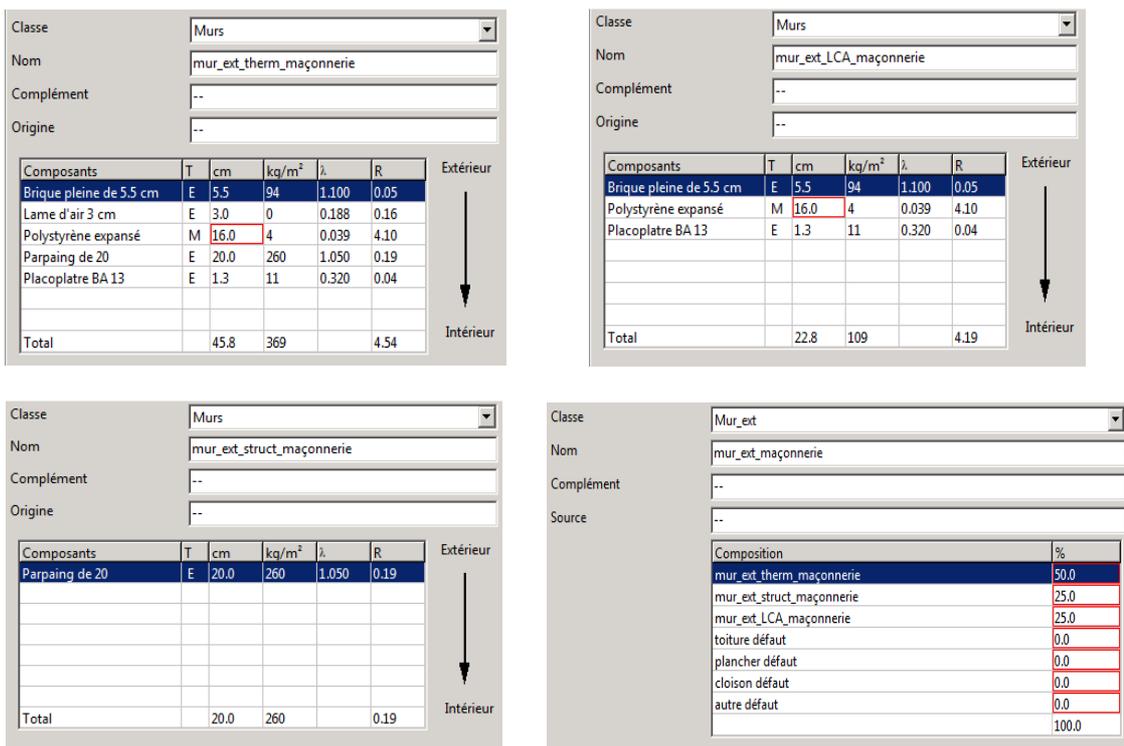


Figure 142 : Compositions et multi-composition pour le mur extérieur de la maison mixte acier/maçonnerie

Pour les autres parois, se référer à celles du premier cas, sauf pour la toiture qui est la même que celle du cas maison acier/brique.

○ Maison traditionnelle

Le mur extérieur est exactement le même que celui du cas maison mixte acier/maçonnerie (même épaisseur d'isolant).

– Toiture

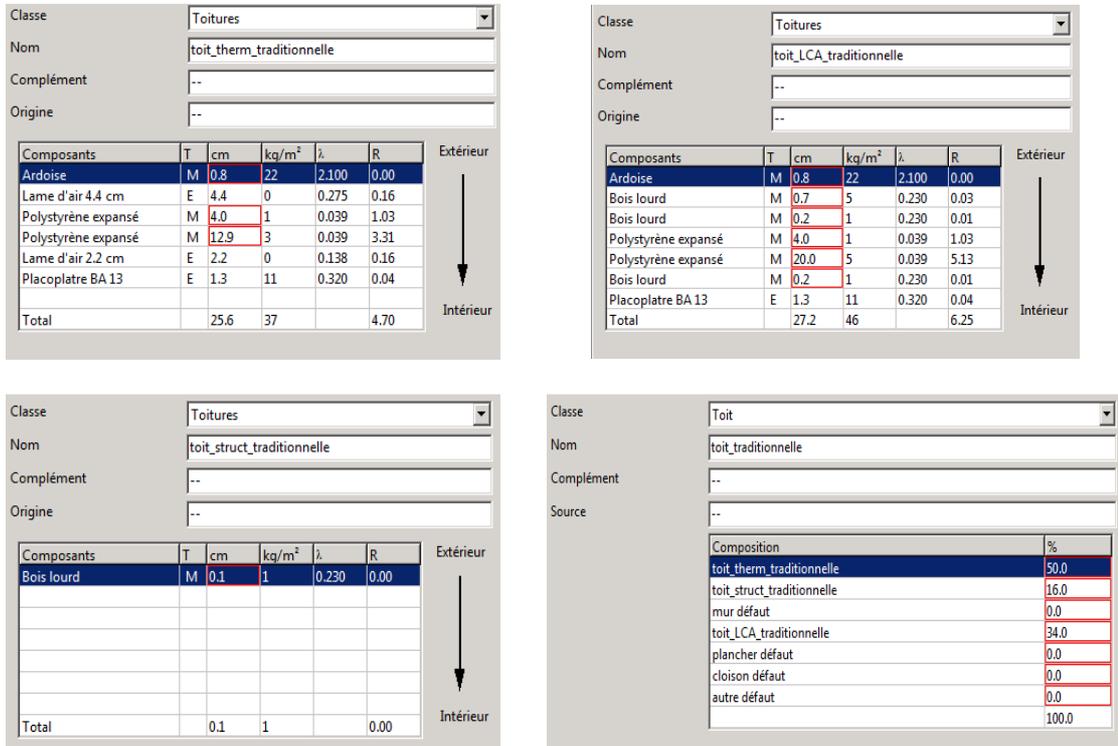
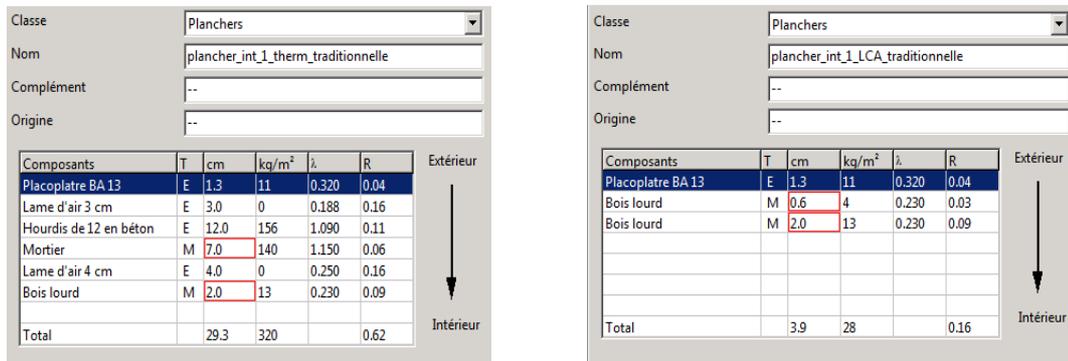


Figure 143 : Compositions et multi-composition pour la toiture de la maison traditionnelle

– Plancher\_1



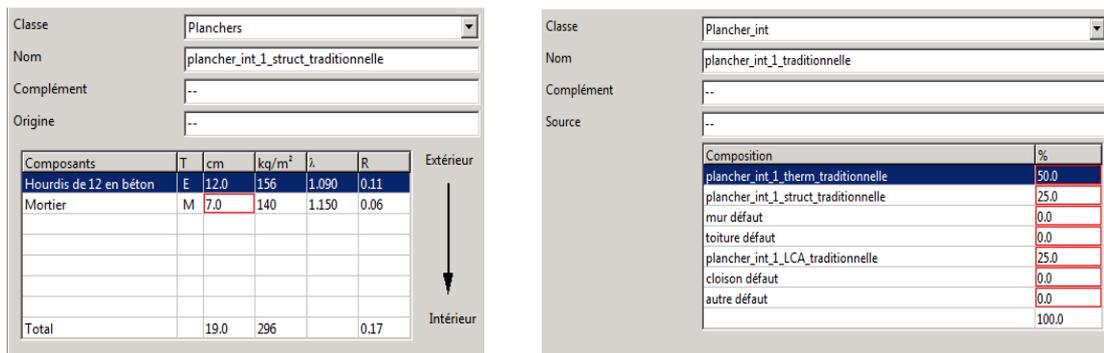


Figure 144 : Compositions et multi-composition pour le plancher 1 de la maison traditionnelle

### – Plancher\_2

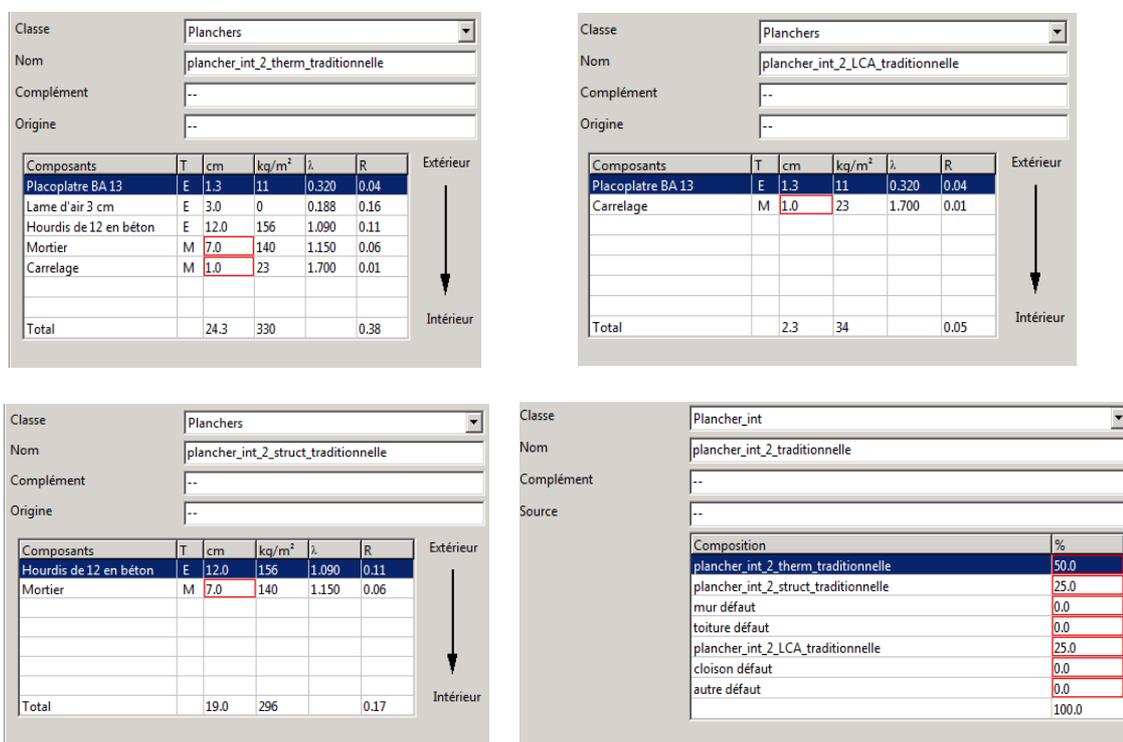
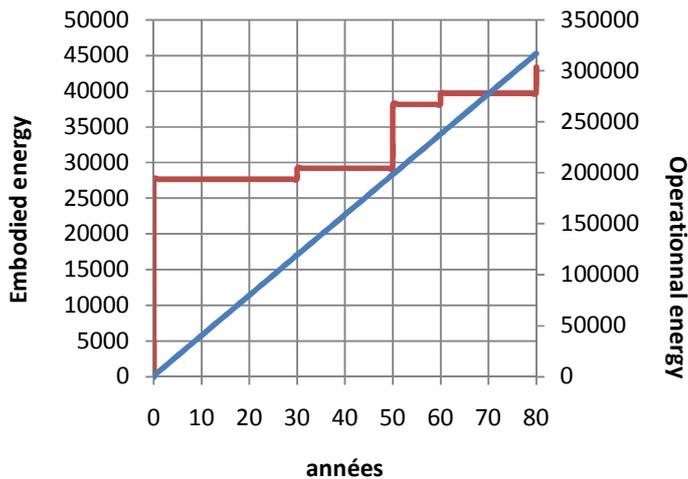


Figure 145 : Compositions et multi-composition pour le plancher 2 de la maison traditionnelle

Pour les autres parois (dalle et cloison), se référer à celles du cas maison acier/trespa.

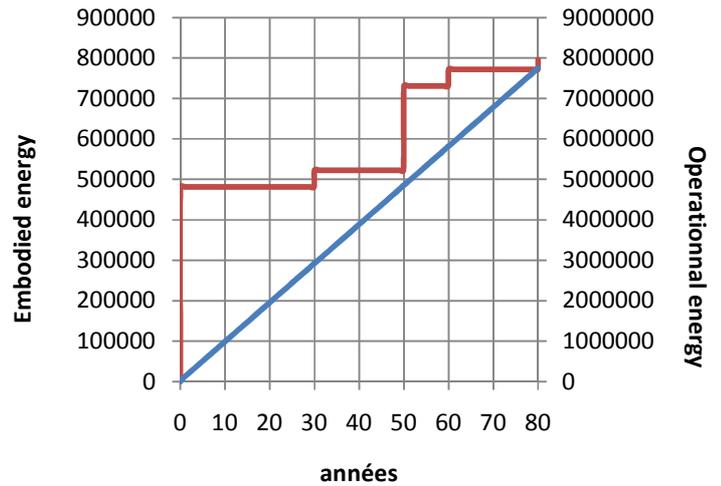
## L. Evolution du GWP et du CED sur toute la durée de vie du bâtiment, pour les 6 cas étudiés

**GWP maison acier/trespa**  
[kg CO2 eq]



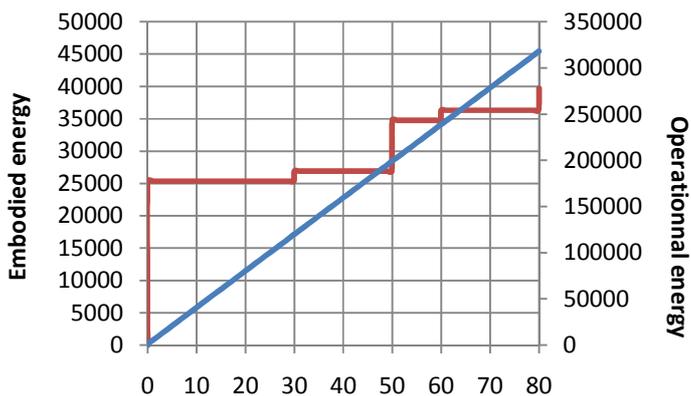
— embodied energy — operationnal energy

**CED maison acier/trespa**  
[MJ eq]



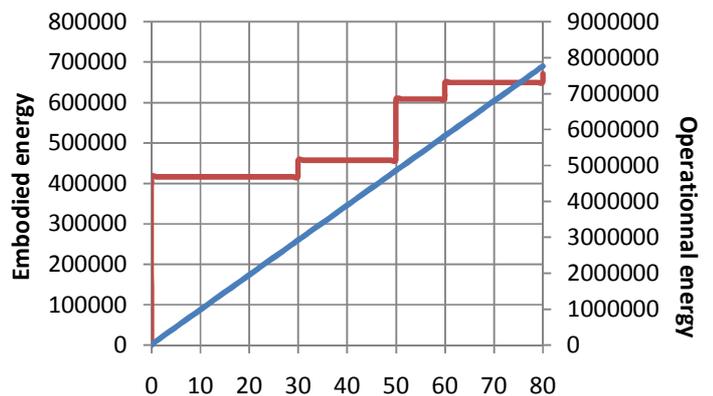
— embodied energy — operationnal energy

**GWP maison acier/acier**  
[kg CO2 eq]



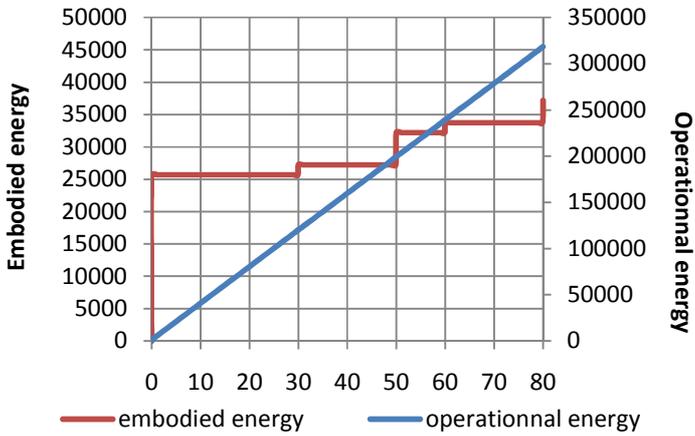
— embodied energy — operationnal energy

**CED maison acier/acier**  
[MJ eq]

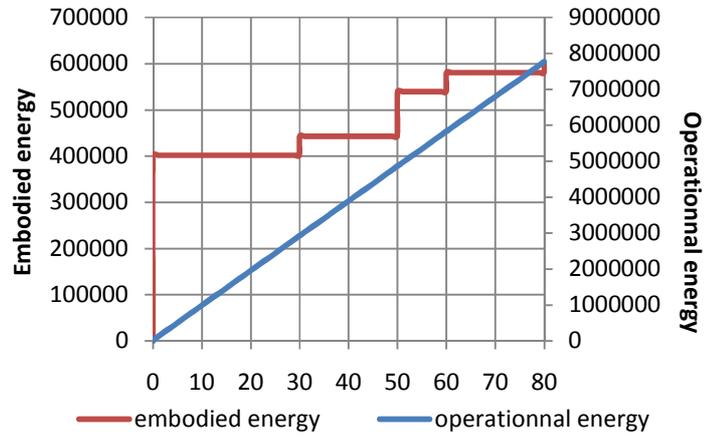


— embodied energy — operationnal energy

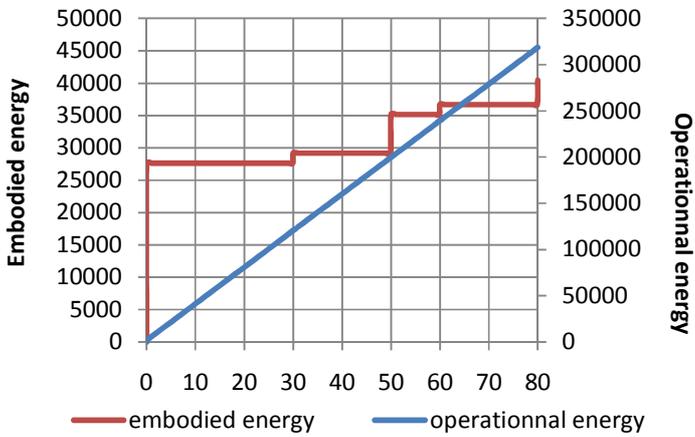
**GWP maison acier/brique**  
[kg CO2 eq]



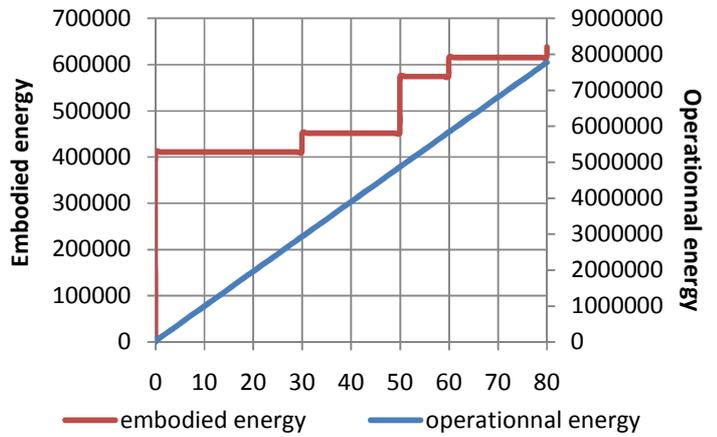
**CED maison acier/brique**  
[MJ eq]



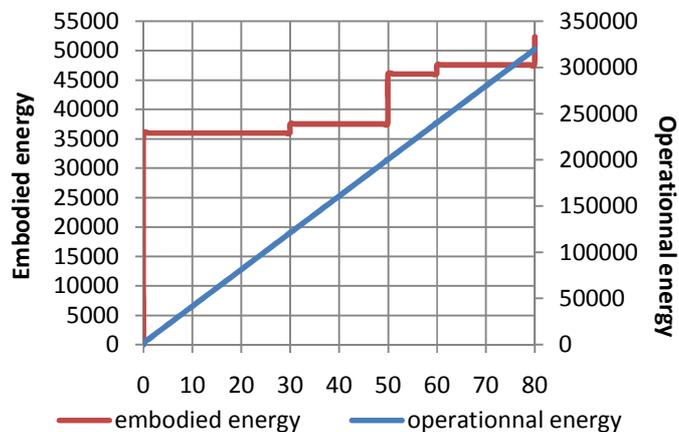
**GWP maison mixte acier/maçonnerie**  
[kg CO2 eq]



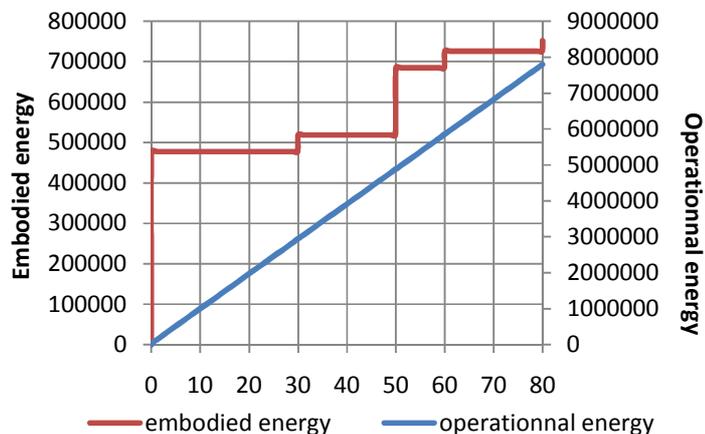
**CED maison mixte acier/maçonnerie**  
[MJ eq]



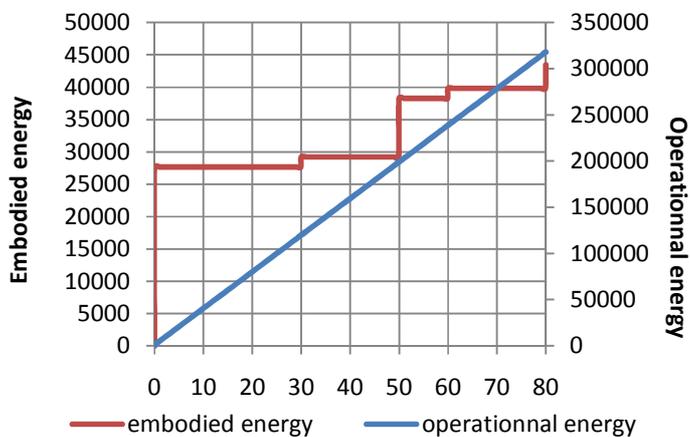
**GWP maison traditionnelle**  
[kg CO2 eq]



**CED maison traditionnelle**  
[MJ eq]



**GWP maison acier/trespa sans bauge**  
[kg CO2 eq]



**CED maison acier/trespa sans bauge**  
[MJ eq]

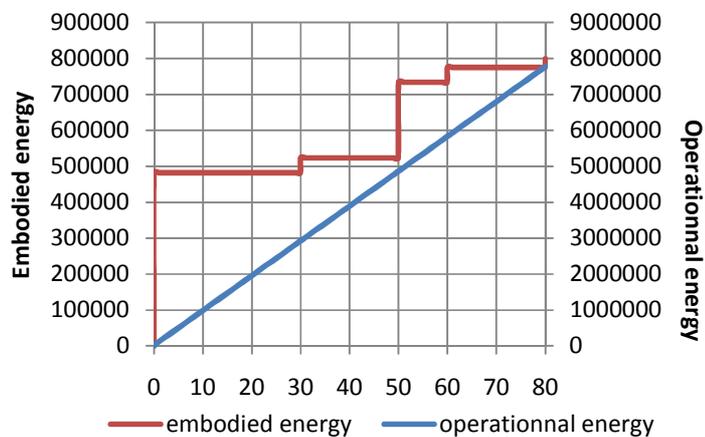


Figure 146 : Evolution du GWP et du CED sur toute la durée de vie, pour les 6 cas étudiés

## XV. RÉFÉRENCES

- [1] **Commission européenne – Climate Action.** Changement climatique. Mars 2011. Disponible sur : <http://ec.europa.eu>
- [2] **Wesselink B., Harmsen R. et Eichhammer W.** Energy Savings 2020 : how to triple the impact of energy saving policies in Europe, Executive Summary. Disponible sur : <http://www.roadmap2050.eu>
- [3] **European Commission.** What is the EU doing on climate change? Disponible sur : <http://ec.europa.eu>
- [4] **European Commission.** Energy Efficiency in Buildings. Disponible sur : <http://ec.europa.eu>
- [5] **Huet V., Carvallo Aceves A., Thomas, J.-S., Caroli G., Bridoux, D., Reiter, S.** Life Cycle Assessment of a labeled low energy building : case study of a semi-detached house based on a steel structure
- [6] **Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings.** Disponible sur : <http://ec.europa.eu>
- [7] **Association pour une Gestion Durable de l'Énergie.** Evaluation des besoins énergétiques de mon habitation. Disponible sur : <http://www.ageden.org/>
- [8] **van Egmond – de Wilde de Ligny E., Block R., Kahraman I.** Achieving sustainable building and construction – Sustainable construction industry versus sustainable building design. *Cost C25 – Sustainability of Constructions, integrated Approach to Life-time Structural Engineering: 298–316*
- [9] **Reiter S.** Life Cycle Assessment of Buildings – a review, *ArcelorMittal International Network in Steel Construction, In Sustainability Workshop and Third Plenary Meeting – ArcelorMittal International Scientific Network in Steel Construction.* 7 July 2010. Bruxelles.
- [10] **Xing S., Xu Z., Jun G.** Inventory analysis of LCA on steel- and concrete-construction office buildings. *Energy and Buildings 40 : 1188–1193*
- [11] **ISO (International Standardization Organization) 2006.** ISO 14040. Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre
- [12] **ISO (International Standardization Organization) 2006.** ISO 14044. Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices
- [13] **Blengini G. A. 2009.** Life cycle of buildings, demolition and recycling potential : a case study in Turin, Italy. *Building and Environment 44 : 319–330*
- [14] **Ortiz O., Castells F., Sonnemann G. 2009.** Sustainability in the construction industry : A review of recent developments based on LCA. *Construction and Buildings Materials 23(1) : 28-39*
- [15] **Gervasio H., Simoes da Silva L., Bragança L.** Towards sustainability : life cycle assessment of building products. *Cost C12 – Improvement of Buildings' Structural Quality by New Technologies : 615 – 619*
- [16] **Huijbregts M., Rombouts L., Hellweg S., Frischknecht R., Hendriks A., van de Meen D., Ragas A., Reijnders L., Struijs J. 2006.** Is Cumulative Fossil Energy Demand a Useful Indicator for the Environmental Performance of Products? *Environmental Science and Technology 40(3) : 641–648*

- [17] **Bragança L., Mateus R.** Comparative assessment of exterior walls construction solutions' sustainability. *Improvement of Buildings' Structural Quality by New Technologies*
- [18] **Cole R., Kernan P. 1996.** Life-cycle energy use in office buildings. *Building and Environment* 31(4) : 307-17
- [19] **Zabalza Bribian I., Aranda Uson A., Scarpellini S. 2009.** Life cycle assessment in buildings : State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement of building certification. *Building and Environment* 44 : 2510-2520
- [20] **Blengini G.A., Di Carlo T. 2010.** The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. *Energy and Buildings* 42 : 869-880
- [21] **Gerilla G.P., Teknomo K., Hokao K. 2007.** An environmental assessment of wood and steel reinforced concrete housing construction. *Building and Environment* 42 : 2778-2784
- [22] **Ciutina A., Ungureanu V., Grecea D., Dubina D.** Family house : cold-formed steel framing and OSB cladding vs. masonry – Case Study
- [23] **Massetto de Aquino L., Reiter S., Rossi B.** Comparative Study of the Life Cycle Profile of Residential Masonry and Steel Framed Buildings in Belgium. *International Conference Sustainability of Constructions – Towards a better built environment*
- [24] **Huberman N., Pearlmutter D. 2008.** A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert. *Energy and Buildings* 40 : 837-848
- [25] **Citherlet S., Defaux T. 2007.** Energy and environmental comparison of three variants of a family house during its whole life span. *Buildings and Environment* 42 : 591-598
- [26] **Peuportier B.L.P. 2001.** Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context. *Energy and Buildings* 33 : 443-450
- [27] **Ortiz-Rodriguez O., Castells F., Sonneman G. 2010.** Life cycle assessment of two dwellings: One is Spain, a developed country, and one in Columbia, a country under development. *Science of the Total Environment*
- [28] **Styltech.** Documentation technique : concepts généraux, spécifications techniques.
- [29] **Trespa.** Documentation Trespa Meteon : Description du concept Trespa, Fiche des caractéristiques techniques, Systèmes de fixation, Agrément Technique avec Certification des revêtements de façades. Disponible en partie sur : <http://www.trespa.com>
- [30] **Eternit.** Documentation Ardoises : Brochures produits, Données techniques, Textes pour cahier des charges
- [31] **Gyproc Saint-Gobain.** Cahier des charges. Cloisons Metal Stud sur ossature simple (#Metal Stud MS 150/2.100.2)
- [32] **ArcelorMittal – Hainonville - PAB.** Documentation Lames de façade : façade plane HAIRPLAN 300
- [33] **Arrêté du Gouvernement wallon avec annexes.** Méthode de calcul et exigences, agréments et sanctions applicables en matière de performance énergétique et de climat intérieur des bâtiments. 17 avril 2008. Disponible sur : <http://energie.wallonie.be>
- [34] **Région wallonne.** Brochure « Le point sur PEB ». Disponible sur : <http://energie.wallonie.be>
- [35] **Logiciel PEB.** Région wallonne. Outil de calcul pour appliquer la réglementation PEB. Version 2.5.2. Logiciel gratuit. Téléchargeable sur : <http://energie.wallonie.be>

- [36] **ISO (International Standardization Organization) 2007.** ISO 6946:2007 (E). Building Components and Building Elements – Thermal Resistance and Thermal Transmittance – Calculation Method
- [37] **Therm 6.3.** University of California Regents. Copyright 1995-2010. Logiciel gratuit. Téléchargeable sur : <http://windows.lbl.gov/software/therm>
- [38] **Pleiades + COMFIE.** IZUBA énergies. Copyright 2011. Logiciel payant. Disponible sur : <http://www.izuba.fr>
- [39] **Aralco.** Documentation Ventilation : Brochures produits, Données techniques, Liste de prix
- [40] **Building EcoDesing Tool.** Proof of concept (POC-BEST) User Manual. August 2010.
- [41] **Capsol.** Physibel Software. Logiciel payant. Pour plus d'informations : <http://www.physibel.be>
- [42] **Alcyone.** IZUBA énergies. Copyright 2011. Logiciel payant. Disponible sur : <http://www.izuba.fr>
- [43] **Réglementation Thermique 2005 (RT 2005). 2006.** Méthode de calcul Th-CE - Méthode Th-C - Chapitre VI : Les scénarios conventionnels.
- [44] **Région wallonne.** Brochure « L'éclairage efficace des logements. Guide pratique à destination du particulier ». Disponible sur : <http://energie.wallonie.be>
- [45] **Verbeeck G., Hens H. 2010.** Life cycle inventory of buildings : A calculation method. *Building and Environment* 45 : 1037—1041.
- [46] **Arrêté du Gouvernement wallon.** Arrêté interdisant la mise en centre d'enfouissement technique de certains déchets (M.B. 04.05.2004 - err. 30.06.2004 + err. 21.01.2010). 18 mars 2004. Disponible sur : <http://environnement.wallonie.be>
- [47] **Bees 4.0e.** National Institute of Standards and Technology – Building and Fire Research Laboratory. August 2007. Logiciel gratuit. Online version disponible sur : <http://www.nist.gov>
- [48] **Logiciel COCON (COMparaison de solutions CONstructives, de CONFort et d'émissions de CO2).** Logiciel payant. Disponible sur : <http://www.eosphere.fr>

#### ADRESSES INTERNET CONSULTÉES

[ec.europa.eu](http://ec.europa.eu)

[energie.wallonie.be](http://energie.wallonie.be)

[www.arcelormittal.com](http://www.arcelormittal.com)

[www.google.be](http://www.google.be)

[hwww.trespa.com](http://hwww.trespa.com)

[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)