

## **Bloc de béton de bois, une alternative au bloc traditionnel? - Étude des caractéristiques mécaniques, thermiques et écologiques d'un bloc de coffrage en béton de bois**

**Auteur :** Lamalle, Marie

**Promoteur(s) :** Courard, Luc; Attia, Shady

**Faculté :** Faculté des Sciences appliquées

**Diplôme :** Master en ingénieur civil architecte, à finalité approfondie

**Année académique :** 2015-2016

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/1283>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---

Université de Liège

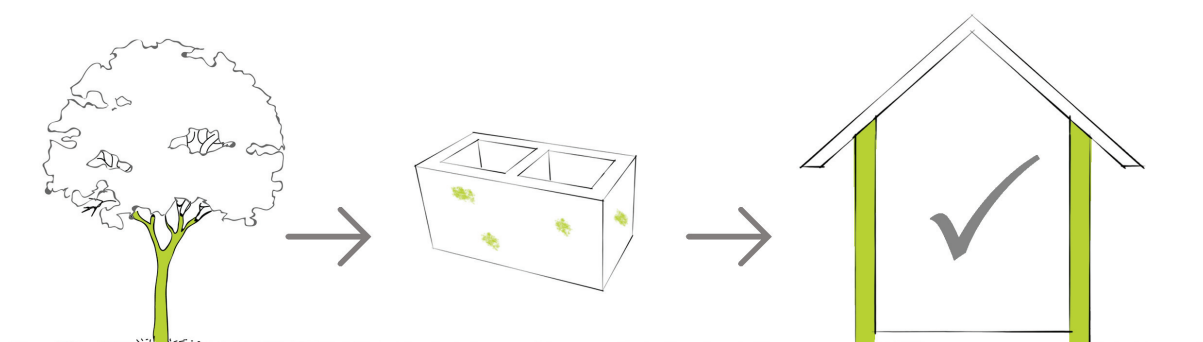
Faculté des Sciences Appliquées

Année académique 2015 – 2016



# BLOC DE BÉTON DE BOIS

UNE ALTERNATIVE AU BLOC TRADITIONNEL ?



Étude des caractéristiques mécaniques, thermiques et écologiques d'un bloc de coffrage en béton de bois

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de Master en  
Ingénieur Civil Architecte par **Marie LAMALLE**

Promoteur : Luc COURARD

Co-promoteur : Shady ATTIA



## **BLOC DE BETON DE BOIS**

### **UNE ALTERNATIVE AU BLOC TRADITIONNEL ?**

Université de Liège – Faculté des Sciences Appliquées

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de  
Master en Ingénieur Civil Architecte par **Marie LAMALLE**.

Année académique : ----- 2015 – 2016

Promoteur : ----- L. COURARD

Co-Promoteur : ----- S. ATTIA

Membres du jury : ----- S. BELBOOM

P. PORTIER

S. REITER

## **BLOC DE BETON DE BOIS, UNE ALTERNATIVE AU BLOC TRADITIONNEL ?**

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de Master en Ingénieur Civil  
Architecte par **Marie LAMALLE**.

Université de Liège – Faculté des Sciences Appliquées – 2015-2016

### **RÉSUMÉ**

Le béton de bois est un matériau relativement récent qui s'inscrit dans la tendance actuelle de l'utilisation des matériaux bio-sourcés pour la construction. Ce composite, formé d'un mélange de ciment, de copeaux de bois et d'eau, semble présenter des propriétés intéressantes. Dans ce travail, l'objectif principal est d'étudier la pertinence de l'utilisation d'un bloc de coffrage en béton de bois pour une paroi de bâtiment, en analysant ses propriétés thermiques, mécaniques et écologiques, afin de juger s'il peut constituer une alternative au bloc de béton classique. Cette étude fait, tout d'abord, le point sur les blocs existants à l'heure actuelle pour mieux cerner la place qu'occupe le bloc de béton de bois. Par la suite, une longue série d'essais sont menés au laboratoire sur des blocs en béton de bois fourni par la société Prefer. De ces expérimentations ressortent les constatations suivantes : le béton de bois, deux à trois fois plus légers que le béton traditionnel, a une capacité d'isolation thermique intéressante mais pas encore suffisante. Il est très perméable à la vapeur d'eau, ce qui permet d'offrir des murs respirants. La résistance en compression sur le bloc de coffrage rempli est tout à fait satisfaisante pour la construction de murs porteurs dans des bâtiments d'une hauteur modérée. La résistance en flexion des parois est suffisante pour reprendre les efforts pendant le banchage. Deux simulations informatiques sont également réalisées. Le logiciel WUFI Pro© révèle que le béton de bois présente une excellente qualité de régulation de l'humidité intérieure et qu'il n'existe pas de problème de dégradation par l'humidité. Enfin, l'analyse de cycle de vie sur le logiciel OpenLCA démontre que l'utilisation du béton de bois réduit les émissions de CO<sub>2</sub> comparé au bloc de béton traditionnel. En conclusion, le bloc de coffrage en béton de bois semble être effectivement une alternative prometteuse au bloc traditionnel.

### **ABSTRACT**

Wood-chipping concrete is new material that takes part in the current trend of using bio-based materials for construction. This composite, formed by a mix of cement, wood chips and water, seems to have interesting properties. In this thesis, the main goal is to study the pertinence of using a formwork wood-chipping block for a building wall, by analysing its thermal, mechanical and ecological properties, to judge whether it can be an alternative to conventional concrete block. First, this study make an inventory of existing blocks to better understand the place of wood-chipping concrete block. Thereafter, a long series of tests are executed in the laboratory on some wood-chipping concrete blocks provided by Prefer company. From these experiments emerge the following findings: the wood-chipping concrete, two or three times lighter than conventional concrete, has an interesting thermal insulation capacity but it is not yet sufficient. The wood-chipping concrete is very permeable to water vapour, providing breathable walls. The compressive strength of the filled formwork block is high enough for the construction of load-bearing walls in buildings of moderate height. The strength of block sides is sufficient to resist the forces during concrete casting. Two computer simulations are also performed. The WUFI Pro© software shows that the wood-chipping concrete has excellent capacity of indoor moisture regulation and that there is no problem of degradation by humidity. Finally, the life cycle analysis on the OpenLCA software demonstrates that the use of wood-chipping concrete block reduces CO<sub>2</sub> emissions compared with the traditional concrete block. In conclusion, the formwork wood-chipping block actually seems a promising alternative to traditional block.

## **REMERCIEMENTS**

Avant toute chose, je tiens particulièrement à remercier Monsieur Luc Courard, promoteur de ce travail, pour son encadrement, ses précieux conseils et la confiance qu'il m'a accordée au cours de l'élaboration de mon étude.

Je remercie également mon co-promoteur, Shady Attia, pour son suivi régulier, ainsi que l'ensemble des membres de mon jury, Sandra Belboom, Sigrid Reiter et Paul Portier pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail durant cette année.

Mes remerciements vont ensuite à toute l'équipe du personnel du Laboratoire des Matériaux de Construction pour leur convivialité et, sans laquelle, les expérimentations n'auraient pas pu avoir lieu. J'aimerais particulièrement remercier Amaury Daras pour son dévouement, ses conseils et le temps qu'il m'a accordé lors des nombreux essais au laboratoire.

J'aimerais aussi exprimer mes remerciements à René Bolle, Matthieu Rahier et Thomas Jehin de chez Prefer pour leur aide, leurs réponses à mes questions et la fourniture de nombreux documents.

Je souhaite maintenant souligner l'aide et les explications que j'ai reçues de la part de Benjamin Biot et Arnaud Evrard pour l'utilisation du logiciel WUFI Pro®.

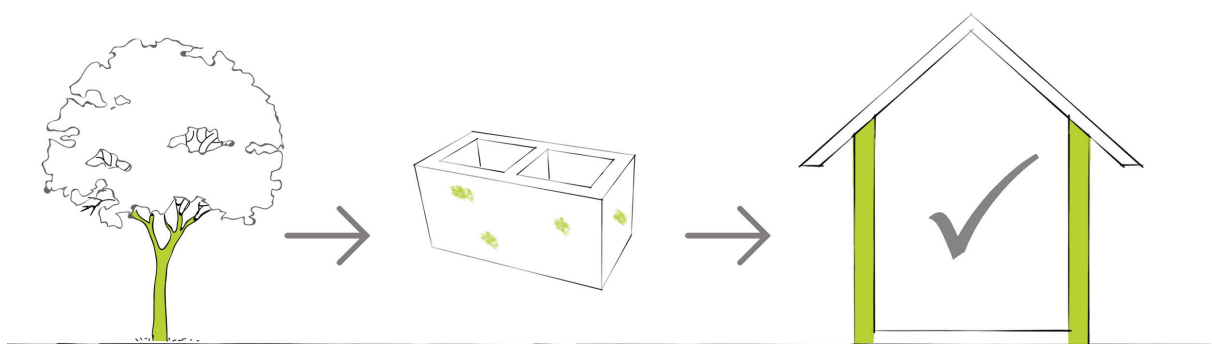
Finalement, je remercie mes proches pour leurs encouragements, leur patience et leur soutien tout au long de l'année ainsi que les membres de ma famille pour le temps qu'ils ont consacré à la relecture de ce travail.

# Table des matières

<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>4</b>
1.1 CONTEXTE DE L'ÉTUDE .....	4
1.2 PRÉSENTATION DE LA SOCIÉTÉ PREFER.....	4
1.3 OBJECTIFS ET HYPOTHÈSE DE TRAVAIL.....	5
1.4 LIMITATIONS .....	6
1.5 MÉTHODOLOGIE ET PLAN DU TRAVAIL .....	6
<b>2. ÉTAT DE L'ART .....</b>	<b>9</b>
2.1 NOTION DE PAROI DANS LE BÂTIMENT .....	9
2.2 NOTION D'ISOLATION DANS LE BÂTIMENT .....	10
2.3 LES EXIGENCES PEB .....	13
2.4 LES ISOLANTS DITS « ÉCOLOGIQUES ».....	16
2.5 MAÇONNERIES DE BLOCS DE BÉTON .....	18
2.5.1 BLOCS DE BÉTON TRADITIONNELS.....	18
2.5.2 BLOCS DE COFFRAGE .....	19
2.5.3 BLOCS À ISOLATION INTÉGRÉE .....	20
2.6 MAÇONNERIES ALLÉGÉES.....	22
2.6.1 MONOMURS DE TERRE CUITE .....	22
2.6.2 BLOCS DE BÉTON CELLULAIRE .....	23
2.6.3 BLOCS DE BÉTON À GRANULATS LÉGERS .....	24
2.7 MURS À ÉLÉMENTS BIO-SOURCÉS .....	26
2.7.1 DÉFINITION .....	26
2.7.2 OSSATURE BOIS – BOTTES DE PAILLE .....	27
2.7.3 BÉTON DE CHANVRE.....	27
2.7.4 BÉTON DE MISCANTHUS .....	29
2.8 BÉTON DE BOIS .....	30
2.8.1 COMPOSITION.....	30
2.8.2 CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET MÉCANIQUES.....	31
2.8.3 APPLICATIONS ACTUELLES.....	31
2.8.4 FOCUS SUR LE BLOC DE COFFRAGE ISOLANT .....	32
2.9 TABLEAU COMPARATIF.....	37
<b>3. EXPÉRIMENTATIONS.....</b>	<b>39</b>
3.1 INFORMATIONS PRÉALABLES.....	39
3.1.1 PLANIFICATION DES ESSAIS.....	39
3.1.2 CARACTÉRISTIQUES DES BLOCS ÉTUDIÉS .....	40
3.1.3 MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE .....	41
3.2 MASSE VOLUMIQUE APPARENTE .....	44
3.2.1 DÉFINITION DE LA GRANDEUR PHYSIQUE .....	44
3.2.2 PRINCIPE DE L'ESSAI ET PROTOCOLE .....	44
3.2.3 RÉSULTATS .....	47
3.2.4 DISCUSSION .....	49
3.3 MASSE VOLUMIQUE RÉELLE ET POROSITÉ DES COPEAUX DE BOIS MINÉRALISÉS.....	50
3.3.1 DÉFINITION DE LA GRANDEUR PHYSIQUE .....	50
3.3.2 PRINCIPE DE L'ESSAI ET PROTOCOLE .....	50
3.3.3 RÉSULTATS .....	52
3.3.4 DISCUSSION .....	52
3.4 PERMÉABILITÉ À LA VAPEUR D'EAU .....	53

3.4.1	DÉFINITION DE LA GRANDEUR PHYSIQUE .....	53
3.4.2	PRINCIPE DE L'ESSAI ET PROTOCOLE .....	53
3.4.3	RÉSULTATS .....	55
3.4.4	DISCUSSION .....	57
<b>3.5</b>	<b>COEFFICIENT DE CONDUCTIVITÉ THERMIQUE .....</b>	<b>58</b>
3.5.1	DÉFINITION DE LA GRANDEUR PHYSIQUE .....	58
3.5.2	PRINCIPE DE L'ESSAI ET PROTOCOLE .....	58
3.5.3	RÉSULTATS .....	61
3.5.4	DISCUSSION .....	61
<b>3.6</b>	<b>ADHÉRENCE PAR TRACTION DIRECTE .....</b>	<b>63</b>
3.6.1	DÉFINITION DE LA GRANDEUR PHYSIQUE .....	63
3.6.2	PRINCIPE DE L'ESSAI ET PROTOCOLE .....	63
3.6.3	RÉSULTATS .....	65
3.6.4	DISCUSSION .....	66
<b>3.7</b>	<b>RÉSISTANCE À LA COMPRESSION .....</b>	<b>68</b>
3.7.1	DÉFINITION DE LA GRANDEUR PHYSIQUE .....	68
3.7.2	PRINCIPE DE L'ESSAI ET PROTOCOLE .....	68
3.7.3	RÉSULTATS .....	69
3.7.4	DISCUSSION .....	71
<b>3.8</b>	<b>RÉSISTANCE À LA FLEXION DES PAROIS .....</b>	<b>72</b>
3.8.1	DÉFINITION DE LA GRANDEUR PHYSIQUE .....	72
3.8.2	PRINCIPE DE L'ESSAI ET PROTOCOLE .....	72
3.8.3	RÉSULTATS .....	73
3.8.4	DISCUSSION .....	74
<b>3.9</b>	<b>TABLEAU RÉCAPITULATIF DES EXPÉRIMENTATIONS .....</b>	<b>76</b>
<b>4.</b>	<b>SIMULATIONS .....</b>	<b>78</b>
<b>4.1</b>	<b>SIMULATION HYGROTHERMIQUE (WUFI®).....</b>	<b>78</b>
4.1.1	PRÉSENTATION DU LOGICIEL .....	78
4.1.2	CAS ÉTUDIÉS : MÉTHODOLOGIE ET HYPOTHÈSES.....	79
4.1.3	RÉSULTATS .....	82
4.1.4	DISCUSSION .....	86
<b>4.2</b>	<b>ANALYSE DU CYCLE DE VIE.....</b>	<b>89</b>
4.2.1	OBJECTIFS ET CHAMP DE L'ÉTUDE .....	90
4.2.2	ANALYSE DE L'INVENTAIRE.....	92
4.2.3	ÉVALUATION DES IMPACTS .....	93
4.2.4	INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS.....	95
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>101</b>
<b>6.</b>	<b>TABLE DES FIGURES .....</b>	<b>103</b>
<b>7.</b>	<b>TABLE DES TABLEAUX.....</b>	<b>105</b>
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>106</b>
<b>ANNEXES.....</b>		<b>114</b>

# CHAPITRE 1 – INTRODUCTION



# 1. Introduction

## 1.1 Contexte de l'étude

Les techniques et les matériaux employés dans le secteur de la construction sont en constante évolution.

Depuis de nombreuses années, une prise de conscience collective de l'impact de la pollution sur notre planète a contribué à révolutionner progressivement certains choix de matériaux utilisés dans la construction de bâtiments.

De plus, les réglementations en matière d'isolation thermique sont devenues de plus en plus exigeantes. Ces obligations, conjuguées à la demande des habitants en ce qui concerne le confort, le coût et le respect de l'environnement, ont encouragé le développement de matériaux à la fois plus performants et plus écologiques.

Ces matériaux primitifs, naturels et écologiques dits « bio-sourcés » proviennent de ressources renouvelables, et sont majoritairement plus isolants et plus respectueux de l'environnement que la plupart des matériaux utilisés actuellement. Peu polluants, ils offrent l'avantage de fournir un habitat sain et une bonne qualité de l'air aux usagers.

Les enjeux économiques pour les entreprises qui commercialisent ce type de matériaux novateurs sont importants. Plus qu'un phénomène de mode, les matériaux « écologiques » apparaissent comme un choix intelligent, raisonnable et respectueux de l'environnement. Ces critères avantageux sont largement utilisés comme arguments de vente.

L'utilisation de matériaux naturels prônée par certains concepteurs bouscule les habitudes traditionnelles et conservatrices du secteur de la construction.

Un des rôles influents de l'architecte est d'aider le client à effectuer des choix de matériaux appropriés pour la conception de son bâtiment et se doit donc d'intégrer cette nouvelle approche écologique à sa réflexion.

La présente étude s'inscrit dans cette tendance actuelle. L'objet de ce travail porte en effet sur le bloc de béton de bois, matériau composite qui semble rencontrer les exigences mentionnées ci-dessus. Ce travail tente de démontrer que le bloc de béton de bois se positionne comme un choix intéressant en raison de plusieurs critères en tant qu'alternative au bloc de béton traditionnel.

## 1.2 Présentation de la société Prefer

Ce mémoire est réalisé en collaboration avec la société Prefer, usine liégeoise de préfabrication faisant partie du Groupe « Gustave Portier Industries ». Prefer produit du béton sous plusieurs formes : des blocs de béton traditionnels, des traverses de chemin de fer, des pièces préfabriquées sur mesures et des hourdis. En plus de cela, ils fabriquent également des parois préfabriquées en béton de bois à base de copeaux de bois minéralisés (Prefer).

Prefer est une société qui a des projets innovants et souhaite étendre son marché au delà de la région liégeoise, notamment vers la France.

Afin de valoriser sa connaissance technique du béton de bois et d'optimiser l'utilisation de son outil de production de blocs, Prefer a eu l'idée de développer des blocs de coffrage en béton de bois, qui sont actuellement en cours d'étude mais pas encore commercialisés. D'autres entreprises européennes commercialisent cependant déjà ce type de blocs.

Les objectifs principaux de l'entreprise sont d'obtenir un produit doté d'une résistance mécanique suffisante, de performances thermiques et hygrométriques supérieures à celles des blocs traditionnels, pour une densité nettement inférieure à celle du béton classique. Ces objectifs rencontrent ceux qui sont à la base de ce travail.

### 1.3 Objectifs et hypothèse de travail

#### Objectif général

Étudier la pertinence de l'utilisation pour une paroi de bâtiment, d'un bloc de coffrage en béton de bois spécifique, en analysant ses propriétés thermiques, mécaniques et écologiques.

Ce travail permettra de déterminer :

- Les avantages à utiliser du béton de bois ;
- Les caractéristiques de résistance mécanique et d'isolation du nouveau bloc ;
- Les impacts du bloc sur l'environnement ;
- Les alternatives intéressantes de bétons de remplissage.

#### Hypothèse de recherche

Le bloc en béton de bois constitue un concurrent sérieux au bloc de maçonnerie traditionnel.

#### Caractère novateur de l'étude

La principale nouveauté dans cette étude est l'approche globale d'un matériau innovant, aussi bien d'un point de vue théorique grâce aux simulations que d'un point de vue pratique avec les expérimentations en laboratoire.

Le travail se concentre sur le bloc de béton de bois au sein de la paroi d'un bâtiment (échelle macroscopique) alors que les études précédentes étaient principalement focalisées sur la microstructure du béton de bois (Rosolen, 2010 ; Grimont, 2008).

Le travail va également aborder la possibilité d'utiliser d'autres bétons de remplissage (bétons plus légers et isolants) à la place du béton ordinaire utilisé pour remplir tous les blocs de coffrage qui existent actuellement sur le marché.

Concernant le positionnement de cette recherche par rapport à la littérature existante, on remarque que la plupart des documents publiés se contentent de vanter les mérites d'un ou plusieurs matériaux, en étudiant seulement un ou deux critères et sans comparaison étendue (Yang et al., 2003 ; Al-Jabri et al., 2005 ; Ünal et al., 2007 ; Coatanlem et al., 2006 ; Walker et al., 2014 ; Van den Heede et De Belie, 2012).

Le présent travail de recherche palie à ce constat en proposant un inventaire comparatif explicite des matériaux entre eux ainsi qu'une approche multicritères pour l'étude des blocs en béton de bois. Une récente étude applique ce même type d'approche pour les parois en paille (aPROpaille, 2016).



### Impact/destination

Cette étude est destinée aux divers acteurs de la construction et aux chercheurs. Ce mémoire s'adresse donc aux ingénieurs architectes, ingénieurs des constructions, architectes, entrepreneurs, constructeurs, fabricants et maitres d'ouvrages.

Grâce aux essais en laboratoire et aux simulations, ce travail va permettre d'élargir les connaissances actuelles dans ce domaine spécifique et apporter des recommandations pour les professionnels. Les données sorties pourront être exploitées par la suite dans de futurs travaux de recherche, pour compléter des bases de données ou dans des applications industrielles.

## 1.4 Limitations

Ce mémoire consiste en une étude paramétrique du nouveau bloc de coffrage en béton de bois. Il s'agit d'une étude basée sur plusieurs paramètres et non d'une étude complète du bloc. En effet, l'étude est réalisée sur une période de temps assez courte et n'a pas la prétention d'étudier tous les aspects du produit. Le travail se focalise sur l'analyse des paramètres suivants:

- ✓ Isolation ;
- ✓ Résistance mécanique ;
- ✓ Comportement hygrothermique ;
- ✓ Impacts environnementaux.

De nombreuses variables restent en dehors du champ de l'étude, comme par exemple :

- ✗ L'acoustique ;
- ✗ La résistance au feu ;
- ✗ Le coût ;
- ✗ La durabilité ;
- ✗ Les aspects commerciaux ;
- ✗ Les détails constructifs ;
- ✗ Les impacts économiques.

## 1.5 Méthodologie et plan du travail

Le présent travail vise à analyser le béton de bois selon une méthode quantitative au travers de nombreux essais en laboratoire mais également de façon qualitative en comparaison avec d'autres matériaux. On trouve donc, aussi bien, une approche théorique, grâce à des simulations sur logiciels informatiques, que pratique, grâce aux expérimentations concrètes. La **Figure 1** présente la structure suivie lors de ce travail.

La partie théorique se divise en deux parties.

La première comprend une description des notions de paroi et d'isolation dans le bâtiment afin de mieux cerner le contexte. Pour préciser le thème de l'isolation, un rappel des exigences PEB ainsi qu'un descriptif des isolants dits « écologiques » est présenté.

La seconde se compose d'un inventaire des techniques de parois en blocs utilisées dans le bâtiment réalisé afin de situer le bloc de béton de bois parmi ces matériaux. Pour terminer la

revue de la littérature, on trouve un chapitre spécifique sur le béton de bois et les blocs de coffrages isolants.

La partie pratique est dédiée aux expérimentations au laboratoire sur les blocs en béton de bois fournis par la société Prefer. Les caractéristiques des blocs y sont mesurées par une suite d'essais décrits précisément.

Le chapitre suivant se concentre sur la simulation du comportement hygrothermique du béton de bois grâce au logiciel WUFI Pro®. Plusieurs cas de parois sont modélisés afin de vérifier leur compatibilité avec des climats extérieur et intérieur.

Enfin, une analyse en cycle de vie est réalisée avec le logiciel OpenLCA pour évaluer les différents impacts environnementaux du nouveau bloc.

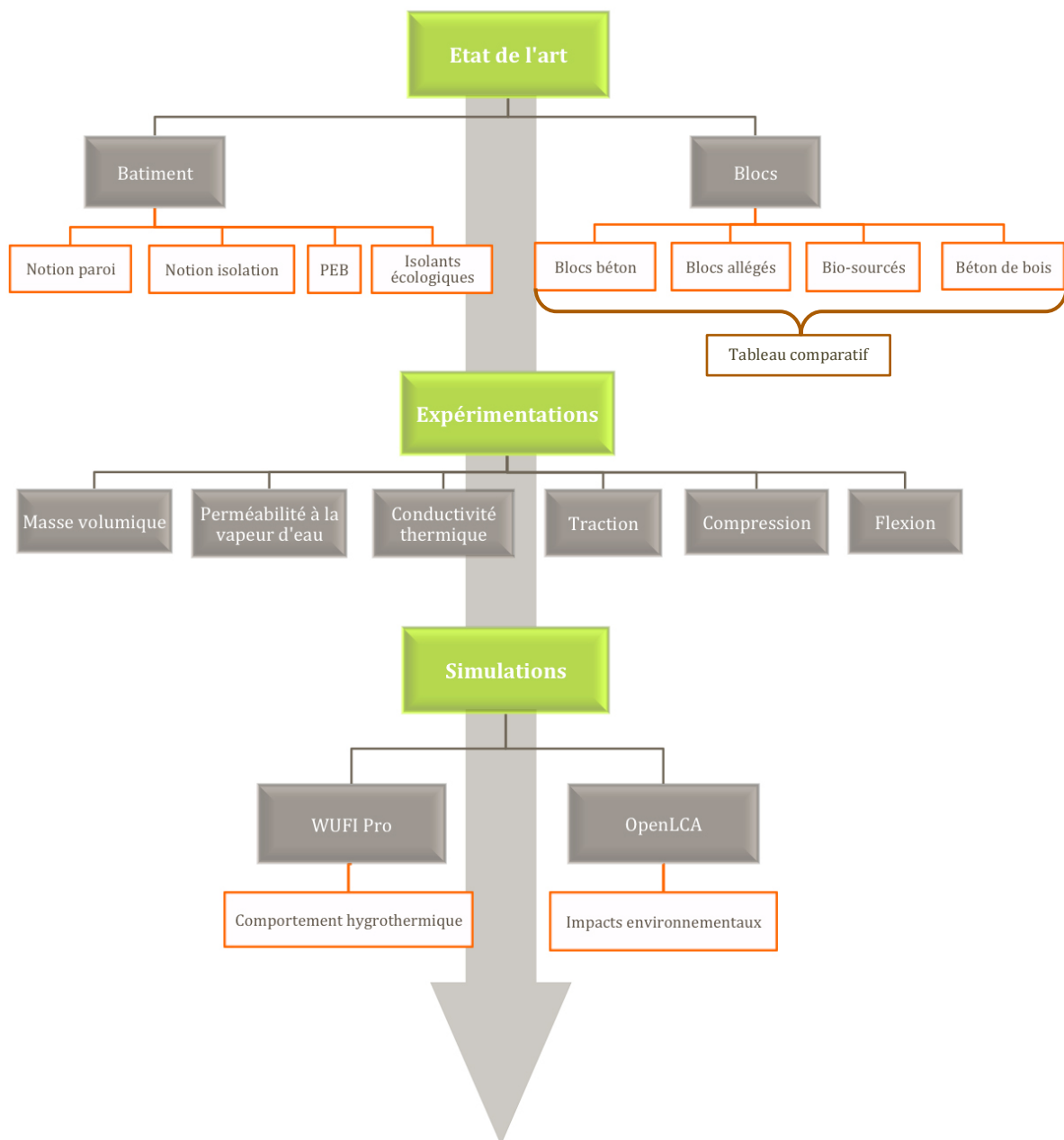
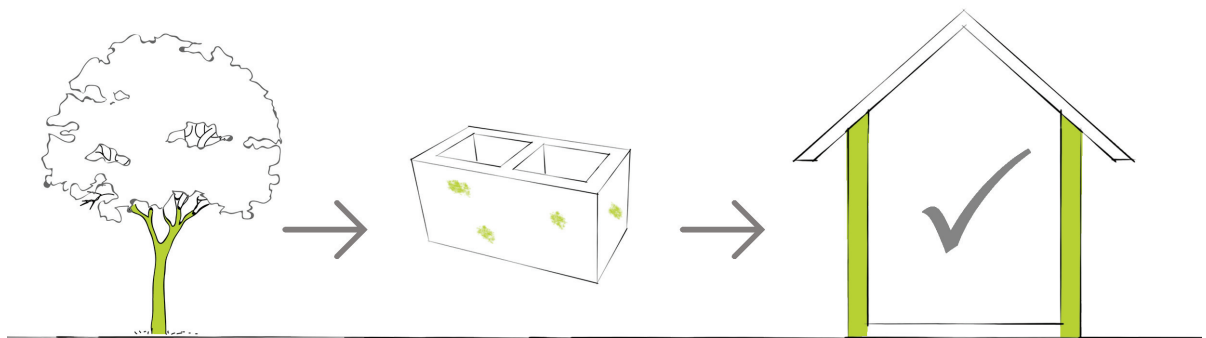


FIGURE 1 - STRUCTURE DE L'ÉTUDE

## CHAPITRE 2 – ÉTAT DE L'ART



## 2. État de l'art

Dans ce chapitre, un rappel de quelques notions de base et une revue de la littérature à propos des caractéristiques des blocs existants permettront au lecteur de comprendre comment se situe le bloc de béton de bois dans le domaine des matériaux de construction.

### 2.1 Notion de paroi dans le bâtiment

La présente étude se base principalement sur la partie **paroi** d'un bâtiment et non le bâtiment entier en tant que tel. C'est pourquoi, il est intéressant d'en rappeler sa définition et ses fonctions.

La paroi extérieure constitue une frontière, une délimitation de l'espace qu'on ne peut a priori pas traverser. Dans le contexte de l'habitat, la paroi forme une protection contre l'environnement extérieur qui peut potentiellement être perçu comme dangereux. L'intensité de la séparation de l'espace est directement liée à la hauteur du mur, sa transparence et son épaisseur (**Figure 2**). Une paroi assure aussi une fonction d'isolation vis-à-vis de l'extérieur (ou d'un autre espace intérieur) d'un point de vue visuel, olfactif ou sonore (Roosen, 2016).

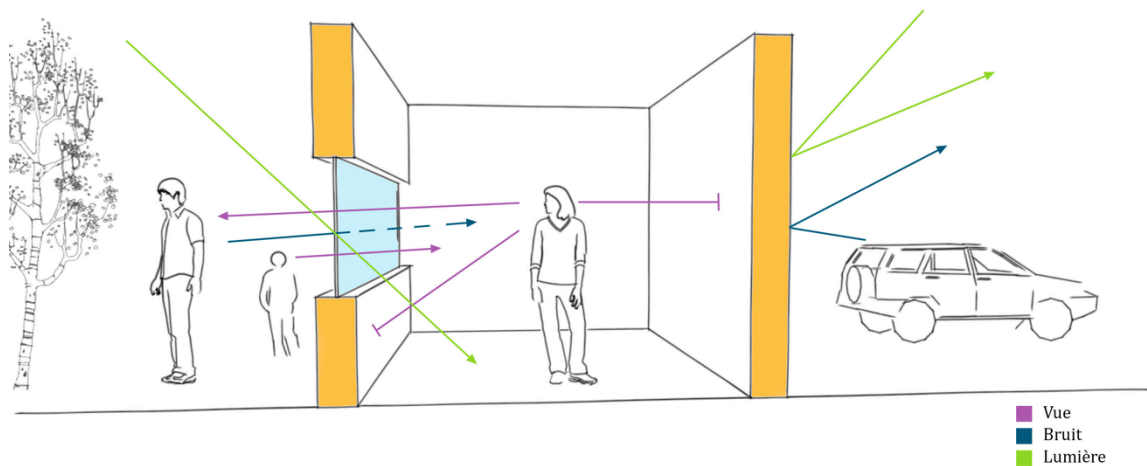


FIGURE 2 - RÔLE DE SÉPARATION DES PAROIS

On se doit également de relier la paroi à la notion de stabilité. En effet, dans un bâtiment, le mot *paroi* est un terme générique qui peut être utilisé pour parler aussi bien d'un mur porteur que d'une cloison. Dans le présent travail, la convention suivante sera d'application :

- Le mot *mur* sera utilisé pour désigner un élément porteur, souvent épais, qui participe à la stabilité du bâtiment.
- Le mot *cloison* sera alors utilisé pour désigner une séparation légère et non porteuse qui sert à diviser l'intérieur d'un bâtiment en plusieurs zones.

Les matériaux de construction utilisés pour ériger un mur sont choisis en fonction de plusieurs critères selon les desideratas du client, de l'architecte ou du constructeur. Les critères de choix sont nombreux mais on peut citer les principaux qui sont : la résistance (mécanique, à l'usure, au feu, aux intempéries), l'aspect visuel, le coût et l'isolation. Ce dernier aspect sera développé au point suivant.

## 2.2 Notion d'isolation dans le bâtiment

La notion de paroi, précédemment définie, est souvent mise en relation avec la notion d'isolation, surtout dans le cas d'un bâtiment chauffé.

La nécessité d'isoler un bâtiment vient de deux raisons principales : tout d'abord pour le confort thermique de l'occupant mais aussi pour limiter les dépenses énergétiques. En effet, il est indispensable de limiter les déperditions de chaleur du chauffage et de limiter la consommation électrique due aux appareils de refroidissement.

Le rôle de l'isolant est de freiner de façon optimale les déperditions de chaleur en hiver, et d'éviter l'infiltration de chaleur à l'intérieur du bâtiment en été.

Il existe trois modes de déperditions (**Figure 3**) : les déperditions surfaciques (à travers les parois), les déperditions linéiques (par ponts thermiques aux nœuds constructifs) et les déperditions par infiltration ou ventilation.

Rappelons également les trois modes de transfert de chaleur : la conduction (par contact direct), la convection (par l'intermédiaire d'un fluide) et le rayonnement (sans milieu intermédiaire).

L'isolant est donc un matériau qui possède une capacité de conduction la plus faible possible (Oliva, 2009).

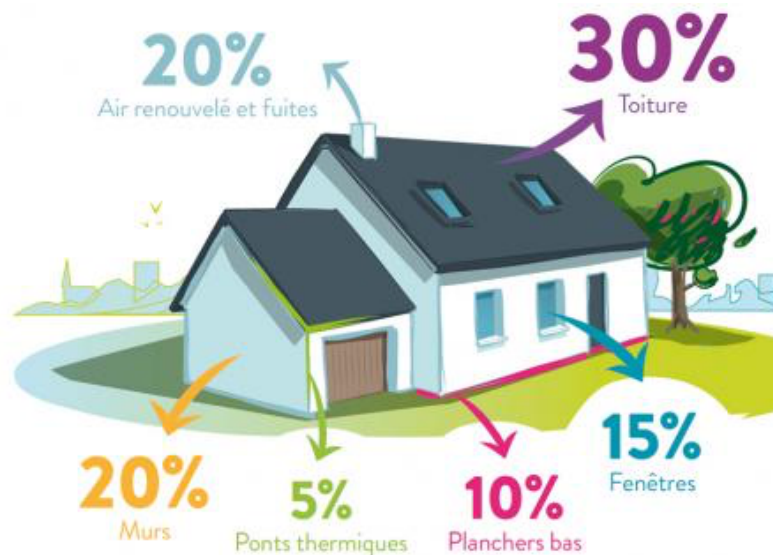


FIGURE 3 - MODES DE DÉPERDITION DE CHALEUR DANS LE BATIMENT (CALCULEO.FR)

Pour résister au flux de chaleur qui tente de le traverser, un isolant est constitué d'une multitude de cellules d'air les plus petites possibles qui vont empêcher le transfert de chaleur. Cet air immobile, étant bien meilleur isolant que le matériau lui-même, amènera l'isolation thermique nécessaire (Al-Homoud, 2005).

Pour ce faire, il existe différentes sortes de matériaux isolants disponibles sur le marché. En Europe, les isolants les plus souvent utilisés sont les matériaux fibreux inorganiques (la laine de verre et la laine de roche) et les matériaux organiques cellulaires (le polystyrène expansé et extrudé ainsi que le polyuréthane). On retrouve également, mais en moindre quantité, des matériaux inorganiques cellulaires (perlite, vermiculite, etc.) et des matériaux organiques fibreux (cellulose, coton, fibres synthétiques, etc.) (Papadopoulos, 2005 ; Papadopoulos et Giama, 2007 ; Al-Homoud, 2005).

Le sujet des matériaux isolants écologiques sera abordé au point 2.4.

Pour caractériser les qualités thermiques des isolants, on utilise plusieurs notions bien spécifiques dont il convient de rappeler les définitions (Oliva, 2009 ; Energie+) :

- **La conductivité thermique ( $\lambda$ )**

La conductivité thermique est la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur par conduction (**Figure 4**). Le coefficient  $\lambda$  [W/m.K] exprime la quantité de chaleur qui traverse en 1 seconde, 1 m<sup>2</sup> d'un matériau, épais d'un mètre, lorsque la différence de température entre les deux faces du matériau est de 1 degré (K ou °C).

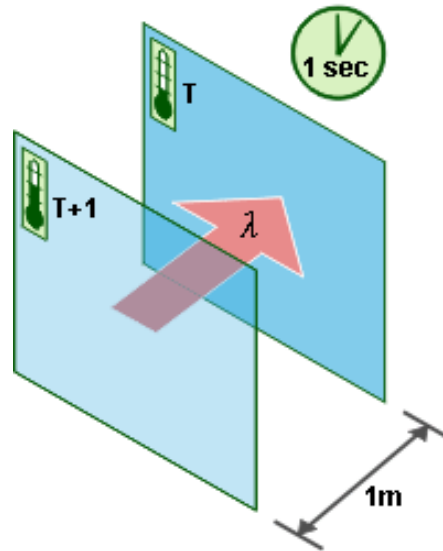


FIGURE 4 - SCHÉMA DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE (ENERGIEPLUS-LESITE.BE)

Plus le  $\lambda$  sera faible, plus le matériau sera isolant.

La conductivité thermique est influencée par l'humidité : étant donné que l'eau est un meilleur conducteur que l'air, l'humidité va diminuer les performances thermiques d'un isolant. Le coefficient  $\lambda$  va donc augmenter avec l'humidité.

Par la suite, on utilisera ce coefficient pour comparer les matériaux entre eux.

- **La résistance thermique (R)**

La résistance thermique exprime la résistance d'un matériau au passage de la chaleur. Elle va alors dépendre de l'épaisseur de la paroi mise en œuvre et se calcule comme suit :

$$R = e / \lambda \quad [\text{m}^2.\text{K}/\text{W}]$$

Plus le R sera élevé, plus le matériau sera isolant.

- **La transmission thermique (U)**

Le coefficient de transmission thermique d'une paroi (anciennement appelé K) est le flux de chaleur qui la traverse en 1 seconde, sur une surface d'1 m<sup>2</sup> et lorsque la différence de température entre les deux faces de la paroi est de 1 degré (K ou °C).

Il s'agit en fait de l'inverse de la résistance et se calcule comme suit :

$$U = 1/R \quad [\text{W}/\text{m}^2.\text{K}] \quad \text{ou encore,}$$

$$U = \lambda / e$$

Plus le U sera faible, plus la paroi sera isolante.

- **L'inertie thermique :**

L'inertie thermique est la capacité d'un matériau à stocker la chaleur et à la restituer progressivement par la suite. Par la loi de la masse, plus le matériau sera lourd (masse volumique élevée), meilleure sera son inertie. Il faudra donc plus de temps pour réchauffer ou refroidir un matériau à grande inertie.

L'inertie thermique permet d'offrir un confort en été comme en hiver.

Il existe également bien d'autres facteurs qui entrent dans les critères de choix d'un matériau isolant. On trouve, par exemple (Al-Homoud, 2005 ; Papadopoulos, 2005) :

- la durabilité (résistance à l'eau, au gel, etc.) ;
- le coût ;
- l'absorption acoustique ;
- l'étanchéité à l'air ;
- les impacts environnementaux (déterminés par une analyse en cycle de vie) ;
- la possibilité de recyclage ;
- la facilité de mise en œuvre ;
- les impacts sur la santé (poussières, fibres ou gaz toxiques lors d'un incendie).

Cette mise en contexte des principes de l'isolation va permettre de mieux juger les performances des matériaux présentés par la suite.

## 2.3 Les exigences PEB

Avant d'étudier les isolants et les différents types de blocs, un rappel des exigences PEB s'avère nécessaire.

En Wallonie, il existe une réglementation nommée la Performance Énergétique des Bâtiments (PEB) qui dicte les exigences à atteindre en terme de consommation d'énergie pour tous les bâtiments qui sont soumis à une demande de permis d'urbanisme (construction, transformation, rénovation, etc.). Le principal objectif de la PEB est de réduire la consommation d'énergie primaire (**Figure 5**) et d'offrir un confort intérieur agréable au bâtiment (DGO4 et CIFIUL, 2015).

Pour ce faire, trois points sont à considérer :

- **la qualité de l'enveloppe**  
Optimiser l'isolation thermique, l'étanchéité à l'air, la ventilation contrôlée ainsi que les apports solaires en évitant la surchauffe.
- **la qualité des systèmes et des auxiliaires**  
Choisir des équipements de qualité pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et l'éclairage.
- **la qualité des énergies**  
Favoriser les énergies renouvelables.

Sur base de ces trois éléments, la méthode de calcul PEB va déterminer une consommation d'énergie théorique exprimée en énergie primaire (DGO4 et CIFIUL, 2015).

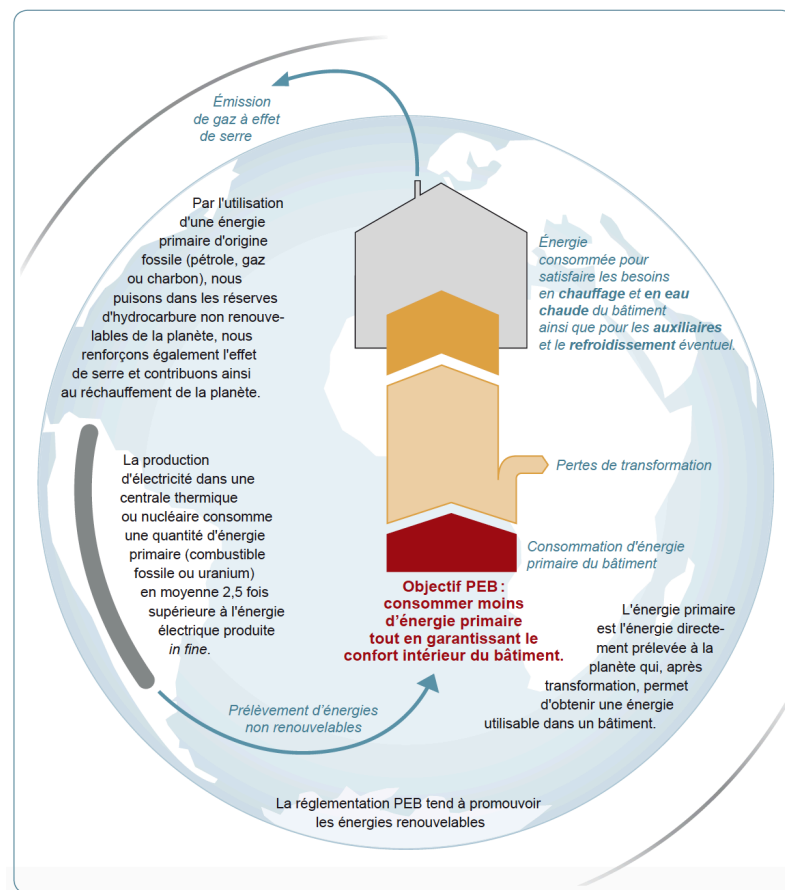


FIGURE 5 - SCHÉMA DE L'OBJECTIF PEB (DGO4 ET CIFIUL, 2015, P. 9)



Dans le cadre de ce travail qui se focalise sur la partie « mur » d'un bâtiment, il convient de faire un rappel uniquement sur la partie « enveloppe » de la PEB, qui concerne la réduction des pertes de chaleur du bâtiment.

La réglementation impose des valeurs maximales du coefficient de transmission thermique  $U$  [ $W/m^2.K$ ] ou minimales du coefficient de résistance thermique  $R$  [ $m^2.K/W$ ] (définitions au chapitre précédent) à respecter pour les différentes parois du bâtiment. Les valeurs de  $U$  dépendent du type de paroi (mur, toiture,...), de la composition de la paroi et de son environnement immédiat. Le **Tableau 1** ci-dessous donne les valeurs actuelles à respecter (DGO4 et CIFIUL, 2015).

TABLEAU 1 - VALEURS  $U_{max}/R_{min}$  : RÉGLEMENTATION PEB DEPUIS LE 1<sup>ER</sup> JANVIER 2014 (DGO4 ET CIFIUL, 2015, p. 53)

Parois du volume protégé	$U_{max}$ [ $W/m^2.K$ ]	$R_{min}$ [ $m^2.K/W$ ]
Toitures et plafonds	0,24	
Fenêtres	1,80	
Vitrages	1,10	
Portes et portes de garage	2,00	
Façades légères	2,00	
Vitrages	1,10	
Murs	0,24	
- extérieurs ou tout autre environnement sauf sol, cave, vide sanitaire		
- en contact avec vide sanitaire ou cave		1,40
- en contact avec le sol		1,50
Briques de verre	2,00	
Planchers		
- en contact avec l'extérieur ou un espace adjacent non chauffé	0,30	
- sur sol, vide sanitaire, cave	0,30	1,75
Parois mitoyennes	1,00	

Les valeurs  $U$  se calculent sur base du coefficient  $\lambda$  des différents matériaux constituant la paroi. Pour connaître les valeurs  $\lambda$ , il existe trois façons (DGO4 et CIFIUL, 2015) :

- consulter la base de données belge officielle EPBD disponible en ligne ;
- consulter l'attestation de conformité du marquage CE du matériau ;
- consulter l'agrément technique (ATG ou l'ATE) du matériau.

Sur base des coefficients  $U$  des parois, de la surface totale de déperdition et du volume protégé du bâtiment, il est alors possible de calculer le niveau d'isolation thermique global  $K$  (**Figure 6**). Ce coefficient va caractériser la performance globale de l'enveloppe du bâtiment : plus le  $K$  sera faible, meilleure sera la performance de l'enveloppe. Actuellement la réglementation impose un  $K$  inférieur ou égal à 35 pour tout logement neuf (DGO4 et CIFIUL, 2015).

Dans les prochaines années, les valeurs des coefficients à atteindre pour les nouvelles constructions se rapprocheront progressivement du critère passif qu'on définit avec un  $U$  inférieur ou égal à 0,15  $W/m^2.K$  et un coefficient  $K$  compris entre 10 et 20 (Ecobati Scrl).

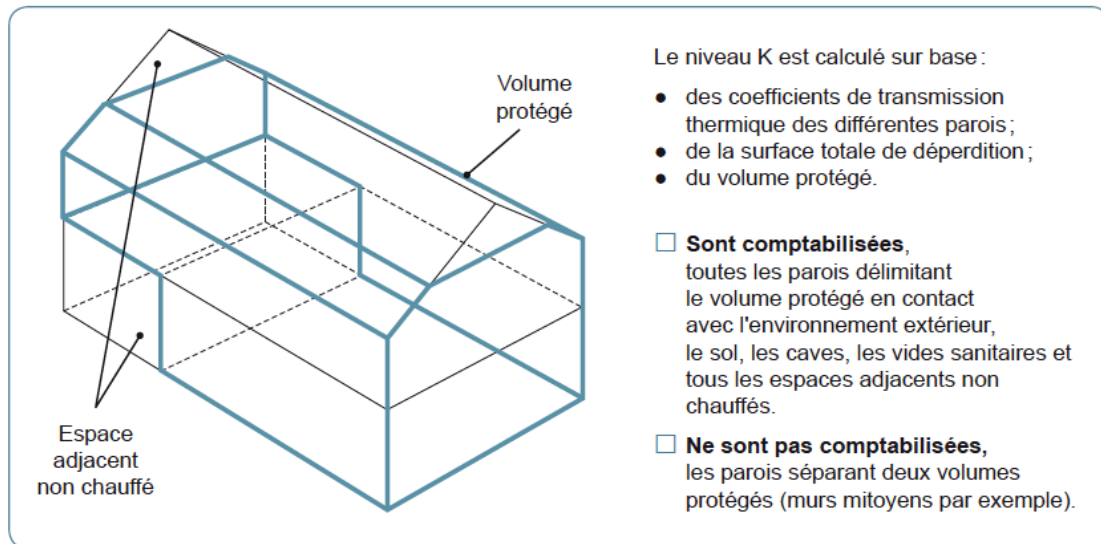


FIGURE 6 - NIVEAU K (DG04 ET CIFFUL, 2015, p. 54)

Etant donné que les blocs étudiés dans cette étude proviennent de la société Prefer, située à Flémalle, le présent chapitre développe uniquement la réglementation PEB en Région wallonne. En effet, les blocs seront principalement destinés à la construction de bâtiments en Wallonie et dans une optique de développement durable il serait logique que les blocs ne soient pas transportés sur des distances trop longues. Bien entendu, si la société Prefer souhaite exporter son produit dans d'autres régions ou pays voisins, il sera nécessaire de se renseigner précisément sur les réglementations en vigueur correspondantes, ce qui sort du cadre de ce travail. On peut néanmoins citer les réglementations principales voisines (Service Public Fédéral Belge, 2016 ; Robischon, 2014 ; RVO, 2015):

- La PEB en Région de Bruxelles-Capitale (similaire à la PEB wallonne) ;
- L'EPB « Energie Prestatie in Binnenklimaat » en Flandre (similaire à la PEB wallonne) ;
- La RT2012 en France ;
- La norme DIN EN 16012 en Allemagne (basée sur la directive européenne 2002/01/CE) ;
- La norme NEN 7120 EnergiePrestatie van Gebouwen (EPG) et le EPC « Energie Prestatie Coëfficiënt » au Pays-Bas.

Pour atteindre ces différents critères il faut alors choisir l'isolant qui convient le mieux au bâtiment qu'on désire construire. Dans la suite, une revue des principaux isolants écologiques est présentée.

## 2.4 Les isolants dits « écologiques »

Les principaux isolants utilisés depuis les années 70 sont les polystyrènes, polyuréthanes et laines minérales. Ces matériaux sont très performants pour réduire les pertes de chaleur mais ont des impacts néfastes sur l'environnement et sur la santé. Progressivement, les mentalités ont changé et la construction s'est tournée vers des matériaux issus de ressources renouvelables et naturelles avec un faible impact environnemental et offrant un climat intérieur sain (Oliva, 2009).

Dans le cadre de ce travail, une rapide revue des isolants écologiques qui existent sur le marché à l'heure actuelle semble intéressante. En effet, pour parfaire l'utilisation du bloc en béton de bois pour un mur extérieur d'habitation, il sera certainement nécessaire d'ajouter un matériau isolant supplémentaire. Dans ce cas, il sera alors logique de choisir un matériau écologique et performant pour réduire les impacts environnementaux de la totalité de la paroi.

Tout d'abord, on trouve des isolants d'origine végétale (Oliva, 2009 ; Beaumier, 2007 ; Jelle, 2011 ; aPROpaille, 2016):

- **La laine de bois, ou bois feutré** :  $\lambda = 0,042$  à  $0,070$  W/m.K. Fabriquée à base de déchets de bois défibrés et transformés en pâte. Utilisée sous forme de panneaux. Le bois est une ressource renouvelable et les panneaux sont recyclables en compost.
- **Les fibres de bois** :  $\lambda = 0,09$  à  $0,10$  W/m.K. Fabriquées à base de fibres de bois (déchets de scierie) minéralisées. Utilisées en vrac ou sous forme de panneaux. Le bois est une ressource renouvelable et les panneaux sont stockés comme matériaux inertes en décharge.
- **Les granulats de bois minéralisés** :  $\lambda = 0,12$  W/m.K. Fabriqués à base de copeaux de bois minéralisés (les mêmes que ceux utilisés pour faire le béton de bois). Le bois est une ressource renouvelable et les copeaux sont stockés comme matériaux inertes en décharge.
- **La cellulose** :  $\lambda = 0,035$  à  $0,050$  W/m.K. Fabriquée à base de flocons de papier recyclé traités au sel de bore. Utilisée en vrac pour le remplissage ou en panneaux. La cellulose n'est pas une ressource renouvelable mais est issu du recyclage du papier et peut être ensuite recyclée en compostage.
- **Le liège** :  $\lambda = 0,032$  à  $0,045$  W/m.K. Fabriqué à base de granules expansés d'écorce de chêne-liège. Utilisé en vrac ou en panneaux. Le liège est une ressource renouvelable mais de faible disponibilité et entièrement réutilisable.
- **Le chanvre** :  $\lambda = 0,048$  W/m.K. Fabriqué à base de chènevotte ou de fibres de chanvre. Utilisé en vrac (granules de chènevotte) ou en panneaux (laine de chanvre) ou dans les bétons de chanvre. Le chanvre est une ressource renouvelable et peut être réutilisé ou recyclé en compostage.

- **Le lin** :  $\lambda = 0,037 \text{ W/m.K}$ . Fabriqué à base de fibres courtes de lin, déchet de l'industrie textile traitées aux sels minéraux. Utilisé en vrac ou en panneaux. Le lin est une ressource renouvelable et peut être réutilisé ou recyclé en compostage.
- **Les fibres de coco** :  $\lambda = 0,047 \text{ W/m.K}$ . Fabriquées à base des fibres qui entourent la noix de coco. Utilisées en vrac ou en panneaux. Les fibres de coco sont une ressource renouvelable et peuvent être réutilisées ou recyclées en compostage.
- **La laine de coton** :  $\lambda = 0,040 \text{ W/m.K}$ . Fabriquée à base de fibres de coton, déchet de l'industrie du coton. Utilisée en vrac ou en rouleaux. Le coton est une ressource renouvelable mais utilise beaucoup de pesticides dans sa culture, ce qui est par conséquent peu écologique. Il peut être réutilisé ou recyclé en compostage.
- **La paille** :  $\lambda = 0,060 \text{ W/m.K}$ . Fabriquée à base des tiges de céréales, résidus de l'agriculture. Utilisée sous forme de ballots. La paille est une ressource renouvelable et peut être recyclée en compostage.

Il existe également des isolants d'origine animale (Oliva, 2009 ; Beaumier, 2007 ; Isover France, 2012):

- **La laine de mouton** :  $\lambda = 0,035 \text{ à } 0,045 \text{ W/m.K}$ . Fabriquée à partir des produits de la tonte du mouton, sous produit de l'agriculture qui sont ensuite traités. Utilisée en vrac ou en rouleaux. La laine est une ressource renouvelable et peut être réutilisée ou recyclée en compostage.
- **Les plumes et le duvet** :  $\lambda = 0,035 \text{ à } 0,042 \text{ W/m.K}$ . Fabriqués à partir de sous-produits de l'industrie alimentaire qui sont ensuite traités. Utilisés sous forme de rouleaux. Les plumes sont une ressource renouvelable et sont entièrement recyclables.

Dans la suite (2.5 à 2.8), un inventaire des différents blocs de construction utilisés à l'heure actuelle est présenté. Il faut noter que cet inventaire n'est pas exhaustif. En effet, face à la grande diversité de matériaux et de techniques actuelles, il a fallu choisir certaines catégories de blocs. Ainsi, le choix s'est porté sur les blocs de constructions les plus couramment utilisés dans nos régions ainsi que les blocs à tendance plus écologique, en se focalisant finalement sur le bloc de béton de bois qui est le principal sujet de ce travail.

## 2.5 Maçonneries de blocs de béton

Dans ce chapitre, une revue des blocs de béton les plus couramment utilisés est réalisée dans un but de comparaison.

### 2.5.1 Blocs de béton traditionnels

Le bloc de béton (parpaing) est depuis de nombreuses années le matériau le plus utilisé pour les constructions d'habitations dans nos régions. Il possède des qualités économiques et de résistance intéressantes tout en étant facilement recyclable. Il est fabriqué en usine à base de ciment, de sable, d'eau et de granulats. Sa forme parallélépipédique ainsi que sa taille et son poids sont adaptés pour être facilement mis en place par un homme. Les principales applications du bloc en béton sont les murs et cloisons de bâtiments de faible à moyenne hauteur, principalement les maisons (Courard, 2011 ; Menet et Gruescu, 2014 ; Parmentier, 2012).

Rappelons que le béton de construction peut se classer en plusieurs catégories selon sa masse volumique (Menet et Gruescu, 2014 ; Parmentier, 2012) :

- Très lourd  $> 2500 \text{ kg/m}^3$
- Lourd compris entre  $1800$  et  $2500 \text{ kg/m}^3$  (béton classique, granulats courants)
- Léger compris entre  $500$  et  $1800 \text{ kg/m}^3$  (béton de granulats légers)
- Très léger  $< 500 \text{ kg/m}^3$

En ce qui concerne les blocs, on retrouve trois sortes qui sont classées selon la quantité d'évidements (Calva, 2009 ; Courard, 2011 ; Menet et Gruescu, 2014 ; Parmentier, 2012) :

- Bloc plein (**Figure 7**) : sans alvéoles.
- Bloc perforé (**Figure 8**) : contient plusieurs rangées d'évidements creusés à intervalles réguliers et possède une meilleure capacité d'isolation thermique que le bloc plein.
- Bloc creux (**Figure 9**) : inclut de deux à quatre larges alvéoles de forme parallélépipédique. Il s'agit du bloc le plus largement utilisé car il possède l'avantage d'utiliser moins de matière qu'un bloc plein.



FIGURE 7 - BLOC PLEIN (COECK.BE)



FIGURE 8 - BLOC PERFORÉ (GEDIMAT.FR)



FIGURE 9 - BLOC CREUX (COECK.BE)

Les dimensions standard des blocs, en centimètres, sont (LxlxH) : 39x9x19 ; 39x14x19 ; 39x19x19 et 39x29x19. La résistance à la compression des blocs est comprise entre 2 et 19 N/mm<sup>2</sup> selon la densité du béton et le nombre d'alvéoles. Les blocs creux les plus courants ont une résistance moyenne de 8 N/mm<sup>2</sup>. Pour rappel, la résistance à la compression (en N/mm<sup>2</sup> ou MPa) est le rapport entre la charge maximale admissible par le bloc et la surface brute de la face du bloc (Courard, 2011 ; Parmentier, 2012 ; Prefer).

La capacité d'isolation thermique d'un bloc de béton est plutôt faible, le coefficient de conductivité thermique varie autour de 1 W/m.K selon la densité du bloc et le nombre d'alvéoles. Pour améliorer l'isolation d'un bâtiment, il existe plusieurs alternatives qui seront abordées par la suite (ajout d'une couche d'un matériau plus isolant, bloc à isolation intégrée, etc.).

Pour édifier un mur, les blocs sont assemblés entre eux par une mince couche de mortier (1 cm) qui constitue le joint. La technique du joint est la plus utilisée en maçonnerie mais peut constituer un point faible dans la structure ou un pont thermique si le bloc s'avère plus isolant que le mortier (Menet et Gruescu, 2014 ; Parmentier, 2012 ; Energie+).

### 2.5.2 Blocs de coffrage

Les blocs de coffrage, aussi appelés blocs à bancher ou blocs Stepoc® servent de coffrage perdu pour couler du béton à l'intérieur. Ils sont constitués de deux parois parallèles principales et de petites parois intérieures formant deux ou trois alvéoles (**Figure 10**). Le fond du bloc n'est pas rempli (alvéoles traversantes) contrairement aux blocs creux décrits ci-dessus. Cela permet au béton frais de couler verticalement dans le mur pour liasonner les blocs. Ces blocs sont utilisés pour la réalisation de murs porteurs car ils sont plus résistants que les blocs de béton classiques. Ils sont également choisis pour construire les murs de soutènement et les murs enterrés (de cave, piscine ou réservoir) grâce à leur bonne résistance à la poussée latérale. Afin de renforcer encore la résistance mécanique du mur, on peut introduire des armatures durant le montage et le mur devient alors armé (Béton de la Lomme s.a. ; Calva, 2009 ; Menet et Gruescu, 2014).

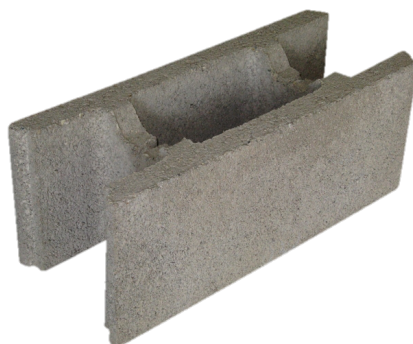


FIGURE 10 - BLOC À BANCHER (LESMATERIAUX.FR)

Les blocs à bancher sont empilés à sec (sans mortier ni colle) ce qui offre l'avantage d'une mise en place facile et rapide sans devoir recourir à une main d'œuvre spécialisée. Par contre, l'absence de joint de mortier oblige une planéité des blocs impeccable pour ne pas introduire



de différence de niveau. Pour garantir cela, les surfaces de contact des blocs sont rectifiées à la fin de leur fabrication pour obtenir des variations de dimensions très faibles. De plus, la finition des blocs est propre car ils peuvent rester apparents pour certaines applications. Des encoches dans les blocs sont prévues pour recevoir facilement les armatures d'acier nécessaires (**Figure 11**). Par la suite, du béton frais est pompé et coulé dans les vides des blocs (**Figure 12**) (Béton de la Lomme s.a. ; Calva, 2009).

Concernant les caractéristiques techniques, les blocs de coffrage sont constitués d'un béton classique d'une densité d'environ  $2100 \text{ kg/m}^3$ . Une fois remplis, ils atteignent une résistance en compression de 18 à 24 MPa et leur conductivité thermique varie de 1,09 à  $1,30 \text{ W/m.K}$  (Doubeton, 2014 ; Douterloigne, 2012).



FIGURE 11 - MISE EN OEUVRE DU BLOC STEPOC  
(BETONDELALOMME.BE)



FIGURE 12 - COULAGE DU BÉTON DANS LES BLOCS  
(BETONDELALOMME.BE)

### 2.5.3 Blocs à isolation intégrée

Les blocs à isolation intégrée ont comme principal avantage de proposer, en une seule opération, la réalisation d'un système résistant et isolant. Ils peuvent être de deux sortes : les blocs de type sandwich avec une couche d'isolant intégré et les blocs contenant un grand nombre d'alvéoles (Calva, 2009).

Le bloc à isolation intégrée de type sandwich, appelé bloc RTh (**Figure 13**), est formé de trois parties (Calva, 2009 ; CSTB, 2009) :

- la partie intérieure en bloc de béton de 15 cm qui assure la stabilité ;
- la partie du milieu en isolant de polystyrène expansé moulé de 7,5 cm (pour un  $U = 0,37 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) ou de 10 cm (pour un  $U = 0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) ;
- la partie extérieure en bloc de béton de 8 cm qui assure l'étanchéité.

On retrouve également une fine lame d'air entre l'isolant et la partie extérieure.

Les liaisons entre les différentes parties se font mécaniquement à l'aide d'un système en queue d'aronde et les fabricants garantissent une résistance totale en compression supérieure à 4 MPa.

Ces blocs sont utilisés pour construire des murs porteurs isolés (typiquement pour les habitations) et présentent les avantages de l'isolation par l'extérieur, à savoir la suppression des ponts thermiques (Calva, 2009 ; CSTB, 2009).

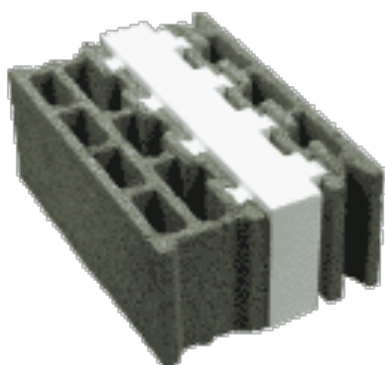


FIGURE 13 - BLOC RTH (BLOCALIANS.FR)

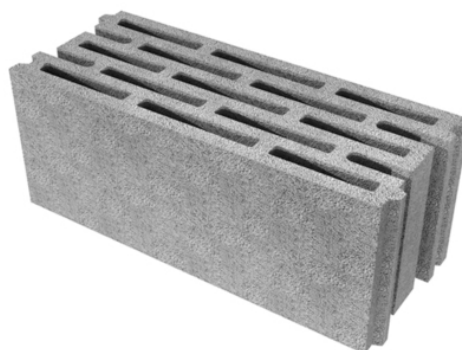


FIGURE 14 - BLOC EASY-THERM (EASY-THERM.FR)

Le bloc de béton percé de nombreuses alvéoles (**Figure 14**) est en quelque sorte un croisement entre un bloc de béton perforé (voir 2.5.1) et un monomur de terre cuite (voir 2.6.1). Le principe est d'améliorer un bloc de béton ordinaire (très peu isolant) en perforant des rangées de trous afin d'utiliser l'air emprisonné comme matériau isolant. La conductivité thermique du bloc sera donc fortement diminuée. De plus, les trous positionnés en quinconce, permettent d'allonger le chemin à parcourir par le flux de chaleur. Ce phénomène augmente la capacité isolante du bloc. Plus il y aura de rangées de vides, plus la résistance au transfert de chaleur du bloc sera importante (Al-Jabri et al., 2004 ; Yang et al., 2003).

On retrouve ce genre de bloc de béton avec des compositions variées contenant très souvent des granulats légers comme l'ardoise expansée dans le cas de l'Easy-therm (**Figure 14**). Il est mis en place par pose collée ce qui apporte l'avantage de la quasi-suppression du joint de mortier (ayant une conductivité thermique de 1 W/m.K), toujours dans le but d'améliorer la résistance thermique du mur. La conductivité thermique du bloc obtenue est  $\lambda = 0.157 \text{ W/m.K}$  (Easy-Therm ; Plessis-Montafidou et Barthou, 2011).

Il existe également des blocs de coffrage à isolation intégrée ou des blocs de coffrage isolants (voir 2.8.4).

Les blocs de bétons traditionnels ont déjà fait leurs preuves, cependant ils ne constituent pas la solution unique. La recherche permanente dans le domaine des matériaux de construction conduit à la conception de nouveaux types de blocs toujours plus performants.



## 2.6 Maçonneries allégées

Les types de blocs repris dans cette section correspondent au principe du mur à isolation répartie. Ces blocs permettent de former des murs porteurs et isolés constitués d'un seul matériau contenant beaucoup de vides. « L'isolation thermique est assurée non pas par la matière première elle-même mais par la présence de ces poches d'air uniformément distribuées qui constituent autant de barrières destinées à s'opposer aux échanges thermiques. » (Calva, 2009, p. 48).

Plusieurs recherches ont démontré que, plus il y aura d'air emprisonné dans le bloc, meilleure sera sa résistance thermique (Al-Jabri et al., 2004 ; Yang et al., 2003).

Afin de stocker cet air, il existe plusieurs alternatives : il peut soit être enfermé dans des alvéoles (voir 2.6.1), soit dans des microbulles (voir 2.6.2), soit dans les granulats du bloc (voir 2.6.3). De plus, ce type de bloc permet d'obtenir une isolation répartie de façon homogène sur l'ensemble de la matière et réduit fortement la présence de ponts thermiques (Calva, 2009).

### 2.6.1 Monomurs de terre cuite

Les monomurs de terre cuite sont des briques isolantes de très grande largeur (habituellement 37,5 cm) contenant un grand nombre d'alvéoles creusées à la verticale (**Figure 15**). Ces blocs sont porteurs et isolants : ainsi, ils ne nécessitent pas la mise en place d'une isolation supplémentaire. En effet, la quantité d'air emprisonné dans les alvéoles ainsi que leur positionnement les uns par rapport aux autres suffisent à apporter la résistance thermique suffisante (Calva, 2009 ; Oliva, 2009). Ces monomurs sont donc relativement légers, avec une masse volumique de 700 kg/m<sup>3</sup> et on a une résistance à la compression qui varie de 7,5 à 10 MPa (ARPE Midi-Pyrénées SPL, 2010).

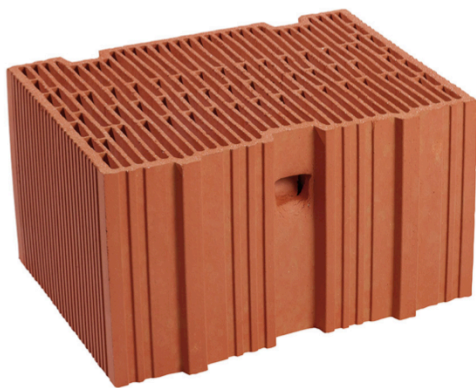


FIGURE 15 - MONOMUR DE TERRE CUITE  
(MONOMUR.COM)



FIGURE 16 - MAÇONNERIE ROULÉE® (WIENERBERGER.FR)

Les blocs monomurs sont utilisés principalement pour construire des bâtiments d'habitations et sont choisis pour leurs nombreuses qualités. En effet, ils offrent un bon confort en été comme en hiver grâce à la grande inertie thermique de la terre cuite. Ils permettent également d'obtenir une très bonne qualité de l'air sans impact sur la santé en agissant comme régulateur d'humidité et ne dégagent pas de substances chimiques ou autre composé organique volatil

(FFTB, 2016). L'argile utilisée pour former les blocs n'est pas renouvelable mais bien naturelle et en disponibilité suffisante. Par contre, sa fabrication consomme beaucoup d'énergie à cause de la cuisson à haute température. Les blocs sont incombustibles et recyclables. La mise en place des blocs se réalise en maçonnerie traditionnelle (joint de mortier d'1 cm) ou en maçonnerie roulée® (**Figure 16**): joints minces de mortier-colle appliqués au rouleau sur les blocs, avec l'avantage de la réduction des ponts thermiques. Ces blocs ont une conductivité thermique qui tourne aux alentours de 0,17 W/m.K (Calva, 2009 ; Oliva, 2009).

## 2.6.2 Blocs de béton cellulaire

Le bloc de béton cellulaire, aussi connu sous le nom de bloc Ytong (**Figure 17**), est un bloc de construction plein, constitué d'un mélange de sable, de ciment, de chaux, d'eau et de poudre d'aluminium dans des proportions bien définies. La poudre d'aluminium réagit chimiquement avec le mélange et émet un dégagement gazeux qui est à l'origine des microbulles du matériau (**Figure 18**). Par conséquent, le bloc de béton cellulaire est constitué de 80% d'air et de 20% de matière, ce qui lui vaut le terme de béton extra-léger. Il possède donc une faible masse volumique (variant de 300 à 700 kg/m<sup>3</sup>) et de très bonnes propriétés d'isolation thermique ( $\lambda$  variant de 0,11 à 0,16 W/m.K) (Calva, 2009 ; Courard, 2011 ; Cox et al., 2009 ; Menet et Gruescu, 2014).

La légèreté du bloc de béton cellulaire lui apporte une grande facilité de mise en œuvre (manutentions, découpes, etc.) et des économies dans les transports. La structure alvéolaire du matériau rend également le bloc très résistant au feu. Il faut toutefois noter que l'inertie thermique du béton cellulaire est plutôt faible comparée à d'autres matériaux en raison de sa faible masse volumique. Sa résistance en compression varie de 2 à 5 N/mm<sup>2</sup> selon la composition du bloc (Cox et al., 2009 ; Menet et Gruescu, 2014).



FIGURE 17 - BLOC YTONG (YTONG.FR)



FIGURE 18 - STRUCTURE CELLULAIRE (FEBECEL)

Les blocs sont fabriqués en usine en autoclave (durcissement à 100°C) et nécessitent 10 fois moins d'énergie que pour fabriquer des briques classiques en terre cuite. Ils sont ensuite assemblés sur chantier au mortier colle (joints minces) et toutes les chutes de blocs peuvent être recyclées. Le béton cellulaire est incombustible et non toxique mais la poussière émise lors des découpes peut être nocive pour les voies respiratoires.

Les blocs sont utilisés pour réaliser des murs porteurs extérieurs (isolés) et des cloisons intérieures pour des habitations mais aussi de plus grands bâtiments comme des bureaux, des hôpitaux, des bâtiments industriels etc. (Calva, 2009 ; Cox et al., 2009 ; Menet et Gruescu, 2014 ; Oliva, 2009).

### 2.6.3 Blocs de béton à granulats légers

Le béton à granulats légers se différencie des autres bétons légers par la manière dont l'air est retenu : ici, la légèreté du bloc ne provient pas de la pâte, mais bien des granulats où l'air est emprisonné. Dans ce genre de béton léger, les granulats ordinaires utilisés pour fabriquer le béton traditionnel sont remplacés par des granulats légers (structure contenant un grand nombre d'alvéoles) d'origine naturelle ou non. Ces granulats possèdent une plus grande capacité d'isolation thermique mais sont moins résistants mécaniquement que les granulats classiques (Pauchet, 2004 ; Yang et al., 2003 ; Al-Jabri et al., 2004 ; Unal et al., 2007 ; Oliva, 2009).

Plusieurs sortes de granulats peuvent être utilisés (Pauchet, 2004) :

- les pierres naturelles légères : la pierre ponce (Figure 19), la pouzzolane (Figure 20) ou la vermiculite (Figure 21) ;
- les matériaux naturels avec ou sans traitement thermique : l'argile expansée (Figure 22), le schiste expansé (Figure 23), la perlite expansée (Figure 24) et les copeaux de bois (Figure 28) ;
- les matériaux artificiels (et déchets industriels) : le laitier expansé, le mâchefer (Figure 25), les cendres volantes frittées (Figure 26), les billes de polystyrène expansé (Figure 27).

Il existe aussi des blocs qui utilisent des matériaux recyclés comme granulats (débits de béton, de maçonnerie, de revêtements hydrocarbonés, etc.). Cette filière est en constant développement et très intéressante car elle permet de réduire le coût du bloc ainsi que son empreinte écologique, et constitue une alternative utile pour l'utilisation de déchets inertes (Al-Jabri et al., 2004).

Il est important de mentionner que le sujet abordé dans ce travail, à savoir, les blocs en béton de bois utilisant des copeaux de bois à la place des granulats rocheux, font donc partie de la catégorie des blocs à granulats légers (voir 2.8).



FIGURE 19 - PIERRE PONCE (FIBREVERTE.COM)



FIGURE 20 - POUZZOLANE (BETON-GRANULAT.COM)



FIGURE 21 - VERMICULITE (FAUX-ROCK.COM)



FIGURE 22 - ARGILE EXPANSÉE (ISOLATION.OOREKA.FR)



FIGURE 23 - SCHISTE EXPANSÉ (FIBREVERTE.COM)



FIGURE 24 - PERLITE EXPANSÉE (REPEL.NL)

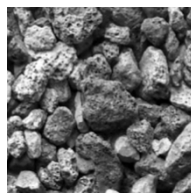


FIGURE 25 - MÂCHEFER (TECHNIQUES-INGENIEUR.FR)



FIGURE 26 - CENDRES VOLANTES FRITTÉES (TECHNIQUES-INGENIEUR.FR)



FIGURE 27 - POLYSTYRÈNE EXPANSÉ (ISOVARIANT.BE)



FIGURE 28 - COPEAUX DE BOIS (123RF.COM)

Le principal avantage des blocs en granulats légers (et autres bétons légers cités plus haut) est leur légèreté qui va réduire le poids mort de la structure (possibilité de réduire la taille des fondations), apporter une bonne isolation thermique et acoustique, et augmenter la résistance au feu. Ces caractéristiques sont avantageuses pour l'utilisation des blocs dans la rénovation des bâtiments. Les blocs de granulats légers ont des conductivités thermiques qui varient de 0,12 à 0,3 W/m.K selon le type et la densité des granulats. La masse volumique de ces blocs est de 1500 à 1900 kg/m<sup>3</sup> pour une résistance en compression maximale de 20 MPa (Al-Jabri et al., 2004 ; Unal et al., 2007 ; Pauchet, 2004 ; Oliva, 2009 ; Courard, 2011 ; Ke et al., 2006).

Cependant, il faut veiller à ce que la masse volumique du bloc soit suffisamment élevée afin de garder une résistance mécanique minimale pour la structure d'un mur. Sinon les blocs ne pourront être utilisés que pour construire des cloisons ou comme isolant. Les granulats utilisés étant poreux, une fois les murs montés, les blocs de béton nécessitent d'être recouverts d'un enduit étanche pour éviter les dégradations dues au gel (Courard, 2011 ; Yang et al., 2003).

Il faut également vérifier attentivement les compositions des divers granulats pour éviter des problèmes de compatibilité et réactions chimiques indésirables avec le ciment.

Les blocs sont pleins, perforés ou creux et mis en place à l'aide de joints très fins de mortier colle (Oliva, 2009).

Ce chapitre a mis en évidence les avantages que présente le béton léger par rapport au béton traditionnel.

## 2.7 Murs à éléments bio-sourcés

La bio construction est en pleine évolution. Dans ce cadre, l'utilisation de matériaux de plus en plus écologiques devient une priorité pour certains constructeurs et particuliers.

### 2.7.1 Définition

« Les matériaux biosourcés sont, par définition, des matériaux issus de la biomasse d'origine végétale ou animale. Ils couvrent aujourd'hui une large gamme de produits et trouvent de multiples applications dans le domaine du bâtiment et de la construction. » (Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, 2015, para. 1).

Les matériaux naturels sont souvent qualifiés d'« écologiques » par rapport aux autres matériaux de construction communs. Toutefois, un matériau *écologique* est une notion très large, parfois utilisée de manière non justifiée et qui mérite une définition claire.

« Un matériau est dit parfaitement écologique quand :

- il est issu d'une ressource renouvelable ;
- sa production et sa transformation requièrent peu d'énergie ;
- son extraction ou sa récolte ne causent pas de dommage à l'environnement ;
- il est entièrement recyclable ou réutilisable ;
- son innocuité pour les êtres vivants est totale ;
- il ne perturbe pas l'environnement électromagnétique ;
- il est fabriqué localement pour limiter les frais de transport ;
- son installation se fait sans énergie complémentaire ;
- sa durée de vie est importante pour éviter l'obligation de renouvellement. »

(Beaumier, 2007, p. 23)

Toutes ces conditions semblent difficiles à réunir en un seul matériau. Il est donc nécessaire de définir soi-même les conditions qui doivent être satisfaites lorsqu'on veut développer un matériau dit écologique (Beaumier, 2007).

Pour être écologique, un matériau doit aussi idéalement être économique (même préfixe « éco »). Dans ce sens, il doit permettre de faire des économies de matière et d'énergie afin de réduire son empreinte environnementale. Le matériau doit donc être optimisé pour une efficacité fonctionnelle et écologique maximale ainsi que posséder une bonne durabilité dans le temps (Menet et Gruescu, 2014).

Dans la littérature, on retrouve aussi les termes de bio-matériau, éco-matériau, agro-matériau ou bio-construction.



### 2.7.2 Ossature bois – bottes de paille

Ce type de mur est composé d'une ossature bois qui assure le rôle structural de la paroi et d'un remplissage en bottes de paille pour l'isolation (**Figure 29**). Le bois utilisé pour l'ossature doit être certifié provenant d'une forêt à gestion durable (labels FSC ou PEFC). Cette structure doit ensuite être recouverte sur les deux faces (à l'intérieur et à l'extérieur) par des matériaux au choix. On conseille par exemple des enduits de chaux, d'argile, de plâtre ou un bardage en bois. Cette technique est très intéressante du point de vue environnemental. En effet, le bois de l'ossature a un impact neutre. La paille, qui est un sous-produit de l'agriculture, est alors valorisée via ce mode de construction et l'ensemble de la structure est facilement recyclable (Menet et Gruescu, 2014).

Les murs sont d'une épaisseur assez importante, d'environ 45 cm et possèdent une capacité d'isolation intéressante ( $\lambda = 0,06 \text{ W/m.K}$ ) étant donné que la paille est un matériau très léger (masse volumique de  $100 \text{ kg/m}^3$ ). Si on utilise des enduits perméables à la vapeur d'eau, le mur permet facilement les échanges hygrothermiques.

La paille étant compactée, elle est très difficilement inflammable et constitue alors une protection contre le feu pour l'ossature bois (Oliva, 2009 ; aPROpaille, 2016).

Cette technique est particulièrement appréciée pour l'auto-construction.



FIGURE 29 - CONSTRUCTION EN OSSATURE BOIS ET BOTTES DE PAILLE (APROPAILLE.BE)

Il existe également des murs à ossatures bois avec d'autres types de remplissage. On retrouve principalement des mélanges de terre et de fibres végétales (la bauge dont l'ancêtre est le torchis) qui demandent un très long temps de séchage lors de la mise en œuvre sur chantier (Menet et Gruescu, 2014 ; Oliva, 2009).

### 2.7.3 Béton de chanvre

Le béton de chanvre est composé à partir de particules de chanvre (chènevotte) mélangées à de la chaux et de l'eau. Il est composé de 80% de chanvre, 11% de chaux hydraulique et 9% de chaux aérienne (IsoHemp s.a., 2014).

La chènevotte est un déchet de l'industrie papetière. Le béton de chanvre fait partie de la famille du béton de bois, il est très léger et isolant mais possède une résistance mécanique plutôt faible. Grâce aux qualités hygroscopiques de la chènevotte, le matériau obtenu est très perméable et permet des transferts hydriques faciles (Menet et Gruescu, 2014).

Le béton de chanvre peut se mettre en œuvre de trois manières différentes. La technique la plus ancienne consiste à couler le mélange à l'intérieur d'un mur en ossature bois (murs banchés) mais demande un temps de séchage relativement long (Figure 30). On peut également le mettre en place par projection (Figure 31) ou encore le placer sous forme de blocs (Figure 32). Cette dernière technique est la plus facile et la plus rapide à mettre en œuvre (Mouton, 2010). Une fois mis en place, il convient de recouvrir le mur d'un enduit sur les deux faces, comme pour la paille. Cette technique permet de réaliser des murs porteurs pour des habitations neuves ou des rénovations (Oliva, 2009).

Tout comme le bloc de béton classique, le bloc de béton de chanvre ne nécessite pas d'être cuit, ce qui réduit son énergie grise de production. Sa principale qualité environnementale est son bilan de CO<sub>2</sub> négatif (le béton de chanvre stocke à peu près 100 kg de CO<sub>2</sub> par m<sup>3</sup> mis en œuvre) (Minet et Evrard, 2007). En effet, du CO<sub>2</sub> est émis lors de la production de la chaux, mais il est compensé par sa captation par le chanvre lors de sa croissance. La résistance en compression des blocs en béton de chanvre varie de 0,29 à 0,39 MPa, ce qui n'est pas suffisant pour être porteur (Walker et al., 2014). En effet, une résistance d'environ 6 MPa est nécessaire pour les blocs constituant les murs porteurs d'un bâtiment peu élevé.

L'épaisseur des blocs varie de 20 à 30 cm. Ils ont une conductibilité thermique qui varie entre 0,076 et 0,115 W/m.K selon la masse volumique qui, elle, varie de 300 à 480 kg/m<sup>3</sup>. La perméabilité à la vapeur d'eau,  $\mu$ , est de 4,85 (Minet et Evrard, 2007 ; IsoHemp s.a., 2014 ; Oliva, 2009).

Les blocs de béton de chanvre peuvent également être mis en place dans des ossatures en acier (bilan environnemental moins intéressant) ou comme isolant contre des blocs de béton porteurs. Pour cette dernière technique, les blocs sont maçonnerés à l'aide de mortier-colle et sont ensuite attachés au mur en blocs de béton grâce à des rosaces (Figure 33) (IsoHemp s.a., 2014).



FIGURE 30 - BÉTON DE CHANVRE BANCHÉ (TERREVIVANTE.ORG)



FIGURE 31 - BÉTON DE CHANVRE PROJETÉ (PIOEUVRE.FR)



FIGURE 32 - BLOCS EN BÉTON DE CHANVRE (INATER.NET)



FIGURE 33 - ROSACE D'ATTACHE DES BLOCS DE BÉTON DE CHANVRE (ISOHEMP.BE)

### 2.7.4 Béton de miscanthus

Le béton de miscanthus fait partie de la même famille que les bétons de bois et bétons de chanvre. Les granulats sont ici remplacés par des fibres de miscanthus minéralisées. L'avantage principal de la plante de miscanthus (**Figure 34**) est son rendement bien plus élevé que les autres cultures et son puissant pouvoir de stockage de CO<sub>2</sub>. Le liant utilisé est principalement de la chaux aérienne ou hydraulique.

Le béton de miscanthus est donc également un béton léger, qui possède une bonne capacité d'isolation thermique et un certain stockage de CO<sub>2</sub>. Il permet aussi une régulation d'humidité agréable (Rosolen, 2010 ; Parmentier, 2012).

Le béton de miscanthus peut être mis en œuvre par banchage, par projection ou sous forme de blocs pour des constructions d'habitations mais aussi par exemple pour des murs anti-bruit.

Les blocs de chaux miscanthus (**Figure 35**) commencent progressivement à être commercialisés et on retrouve des performances de conductivité thermique  $\lambda$  compris entre 0,0916 et 0,0896 W/m.K pour une masse volumique inférieure à 400 kg/m<sup>3</sup> et une résistance en compression qui varie entre 1 et 1,47 MPa. Leurs performances sont donc du même ordre que celles du béton de chanvre (BelAlternative sprl, 2009 ; Parmentier, 2012).



FIGURE 34 - PLANTE DE MISCANTHUS (BELATLERNATIVE.BE)



FIGURE 35 - BLOC DE BÉTON DE MISCANTHUS (BÉLALTERNATIVE.BE)



## 2.8 Béton de bois

L'étude du béton de bois est le thème principal de ce travail. La mise en évidence de ses nombreux avantages justifie la place grandissante qu'il occupe sur le marché des matériaux.

### 2.8.1 Composition

Le béton de bois diffère du béton classique par sa composition, principalement par le remplacement des granulats pierreux par des copeaux de bois minéralisés (**Figure 36**).

L'utilisation des déchets industriels est déjà présente dans la plupart des compositions de bétons (béton de laitier de haut fourneau, ajout de cendres volantes). L'industrie du bois génère une grande quantité de déchets dont les copeaux de bois, sous-produits industriels utilisés dans ce cas-ci comme granulats légers pour fabriquer le béton de bois (Pauchet, 2005 ; Coatanlem et al., 2006).



FIGURE 36 - TEXTURE DU BÉTON DE BOIS

Les principaux composants du béton de bois sont (Prefer, 2008) :

- les copeaux de bois (provenant idéalement d'une essence résineuse)
- le ciment
- l'eau

Il n'existe pas une seule recette précise de béton de bois. En effet, les quantités varient d'un fabricant à l'autre et on peut aussi y retrouver, par exemple, du sable, des scories ou de l'Argex ainsi que des adjuvants (accélérateurs de prise) selon les recettes.

Les copeaux de bois, avant d'être intégrés dans le mélange qui constitue le béton, sont minéralisés grâce à de la chaux et de ciment. Cet enrobage des copeaux permet d'obtenir une meilleure compatibilité entre le bois et le ciment lors du mélange pour obtenir le béton de bois. Sans la minéralisation, les copeaux de bois ont tendance à retarder la prise du ciment à cause des réactions chimiques dues au glucose et à l'hémicellulose présents dans le bois. Le bois non minéralisé aura également plus tendance à absorber l'eau de gâchage utile pour la prise du ciment (réduire le rapport E/C) à cause de sa structure en réseaux capillaires (Grimont, 2008 ; Rosolen, 2010 ; Pauchet, 2005 ; Coatanlem et al., 2006). Enfin, la minéralisation a pour effet d'améliorer la rigidité des copeaux, ce qui permet un empilement granulaire plus compact et moins « élastique ».

Ce travail se focalise principalement sur les caractéristiques macroscopiques du béton de bois et ne développera donc pas plus en détails les interactions physico-chimiques présentes au sein du matériau.

## 2.8.2 Caractéristiques physiques et mécaniques

Le béton de bois présente le principal avantage d'être plus léger qu'un béton classique. Cette légèreté est particulièrement appréciée pour la faible conductivité thermique qui en découle mais également pour la facilité de transport et de manipulation. Le béton de bois constitue donc un isolant naturel avec un  $\lambda$  variant de 0,09 à 0,016 W/m.K selon la composition.

Sa densité peut varier de 450 à 1500 kg/m<sup>3</sup> mais les bétons de bois les plus couramment utilisés ont une masse volumique avoisinant les 600 ou 700 kg/m<sup>3</sup> (Rosolen, 2010 ; Pauchet, 2005 ; Prefer, 2007 ; Prefer, 2008).

La résistance mécanique du béton de bois est plus faible que celle d'un béton classique. Selon les différentes études et recettes, on trouve des résistances en compression variant de 0,5 à 2 MPa et des résistances en traction de 0,4 à 0,7 MPa (Rosolen, 2010 ; Pauchet, 2005).

Le béton de bois permet une bonne régulation de l'humidité. Grâce à sa sensibilité hygrothermique, le matériau est capable d'atténuer les variations d'humidité relative de son environnement immédiat. Il absorbe l'humidité de l'air lorsqu'elle est trop élevée et la diffuse quand elle diminue, ce qui contribue au confort intérieur d'une habitation (Rosolen, 2010).

D'autres avantages du béton de bois sont sa bonne inertie thermique et son bon comportement au feu (RF 120 pour les parois préfabriquées). Il est également facile de clouer ou de visser dans le béton de bois (Rosolen, 2010 ; Prefer, 2007 ; Prefer, 2008).

Néanmoins, une attention particulière doit être portée sur son retrait et son gonflement hygrothermique. Des essais réalisés sur le béton de bois produit par Prefer démontrent un retrait de 0,054% et un gonflement de 0,279% (GeMMe, 2009). Cette dernière valeur étant particulièrement élevée, il faudra être prudent lors de l'application, par exemple, d'un revêtement directement fixé sur le béton de bois.

## 2.8.3 Applications actuelles

Habituellement, le béton de bois est utilisé comme matériau de remplissage dans des structures en ossature bois pour assurer l'isolation ou comme coffrage perdu (voir 2.8.4).

On retrouve aussi du béton de bois dans la fabrication des murs anti-bruits ou dans des parois préfabriquées en usine et mises en place sur des chantiers de petite taille.

Actuellement, la société Prefer produit des parois préfabriquées sur mesures en béton de bois (**Figure 37**). Ces panneaux sont constitués d'une ossature bois portante qui reprend les charges verticales et les différentes ouvertures (portes, fenêtres). Ils sont ensuite remplis avec un mélange de copeaux de bois et de ciment. L'ensemble des parois est alors assemblé sur chantier et va permettre la construction rapide de logements à basse consommation d'énergie (Pauchet, 2005 ; Prefer, 2007).



FIGURE 37 - PAROI PRÉFABRIQUÉE EN BÉTON DE BOIS (PREFER.BE)

Suite à cela, dans une volonté d'innovation et de conception durable, Prefer souhaite se lancer dans la fabrication de bloc en béton bois. Leur maîtrise des recettes actuelles de béton de bois utilisées pour les parois préfabriquées, combinée aux outils de production de blocs dont ils disposent vont permettre de produire un bloc de béton de bois innovant.

L'idée de base était de fabriquer un bloc de construction plein en béton de bois qui soit à la fois porteur, isolant et écologique. Après réflexions, il semblait évident que le béton de bois seul ne serait pas suffisamment résistant mécaniquement. L'idée a alors évolué et se porte finalement sur un bloc de coffrage isolant en béton de bois, ce dernier étant le sujet du présent travail.

## 2.8.4 Focus sur le bloc de coffrage isolant

### 2.8.4.1 Description du produit

La norme « NBN EN 15498 : Produits préfabriqués en béton - Blocs de coffrage en béton utilisant des copeaux de bois comme granulat » décrit les propriétés et les performances à atteindre pour ce produit.

Les blocs de coffrage en béton de bois existant sur le marché correspondent dans leur globalité à un produit similaire. Les spécificités de chaque fabricant et les performances atteintes seront décrites par la suite dans un tableau comparatif.

Le bloc de coffrage est composé de 80% de copeaux de bois minéralisés et de 20% de liant hydraulique (ciment Portland) ; il remplit une fonction de coffrage et d'isolant pour la construction de murs et cloisons. Les copeaux de bois proviennent d'essences d'arbres non acides ou de déchets de bois non traités. Ils sont ensuite dépoussiérés avant leur minéralisation à la chaux ou au ciment. A la fin de sa fabrication, le bloc est rectifié et calibré sur toutes ses faces afin de pouvoir être mis en œuvre facilement (Fixolite s.a ; Isolabloc., 2015; Xelis Groupe, 2015).

Le bloc de coffrage est soit mis en œuvre seul (avec uniquement le béton de remplissage) pour les applications en zones non chauffées (caves, mur de soutènement), soit mis en œuvre avec un isolant supplémentaire intégré à l'intérieur des alvéoles ou accroché à l'extérieur du bloc (mur extérieur d'habitation). Les isolants utilisés sont principalement le polystyrène, le polystyrène graphité, le polyuréthane et la laine de roche (Fixolite s.a ; Xelis Groupe, 2015).

Le béton de remplissage qui est coulé à l'intérieur du bloc de coffrage apporte la résistance mécanique nécessaire au mur pour être porteur.

Le bloc de coffrage en béton de bois est utilisé depuis plusieurs années pour des applications diverses et pour la construction de bâtiments tels que des maisons unifamiliales, des écoles, des bureaux, des halls sportifs, des immeubles à appartements, des bâtiments industriels ou agricoles, etc. (Fixolite s.a ; Isolabloc, 2015; Xelis Groupe, 2015 ; Isotex Srl., 2015 ; Isospan Euregio, 2015).

#### 2.8.4.2 Avantages

Sur les différents sites internet des fabricants, un grand nombre d'avantages sont mis en avant pour décrire ce bloc « révolutionnaire ».

Le principal atout du bloc en béton de bois est sa légèreté qui lui confère de nombreuses facultés. En effet, ce bloc apporte une isolation thermique supérieure à celle d'un bloc traditionnel. La légèreté induit aussi une mise en œuvre plus facile et plus rapide pour les ouvriers sur chantier qui, grâce à un effort physique moindre, évitent une série de problèmes physiques (maux de dos, fatigue, etc.). De plus, la réglementation actuelle impose une charge maximale de 25 kg par personne mais sera bientôt réduite à 18 kg dans les années qui suivent. Le bloc de béton de bois pesant environs 6 ou 7 kg a donc de l'avenir devant lui.

D'autres avantages dans divers domaines sont aussi mentionnés (Isolabloc, 2015; Xelis Groupe; Isospan Euregio, 2015) :

- l'isolation acoustique : la surface irrégulière du bloc va permettre une bonne absorption des bruits aériens ;
- la régulation d'humidité : la structure poreuse et la présence de bois vont permettre une régulation efficace de l'humidité de l'air ;
- la résistance sismique : lorsque des armatures sont intégrées, la structure est alors parasismique ;
- la résistance au feu : le bloc de béton de bois est ininflammable (classification française M1) et résiste au feu (REI 240) ;
- l'inertie thermique : le béton de remplissage constitue la masse nécessaire au stockage et à la restitution de chaleur au cours de la journée et des saisons ;
- produit écologique : la production du bloc consomme peu d'énergie et permet la mise en valeur des déchets de bois ;
- matériau inerte et imputrescible : les copeaux de bois étant minéralisés, le bloc ne réagit pas avec son environnement. De plus, aucun produit chimique ni Composant Organique Volatil (COV) n'est utilisé durant la fabrication.

Un autre avantage pratique du produit réside dans les creux du bloc de coffrage. Ils peuvent en effet servir à faire passer les gaines des réseaux utiles dans le bâtiment tels que les câbles électriques, les conduites d'eau, les tuyaux de chauffage, les câbles télécom, etc., avant d'être remplis de béton. De plus, la texture du bloc de béton de bois facilite les découpes (bloc moins dur qu'un béton classique), permet aisément de percer ou de visser de façon fluide pour suspendre des accessoires et supporte des charges importantes, de l'ordre de 19 kN (Hilti Belgium, 2012).

Tout ces aspects, combinés à l'ajout d'un isolant supplémentaire par l'extérieur permettent au produit de répondre aux différentes normes françaises en vigueur telles que la RT2012<sup>1</sup>, RT2020<sup>2</sup> ou au label BBC<sup>3</sup> (Isolabloc, 2015; Xelis Groupe; Isospan Euregio, 2015).

### 2.8.4.3 Mise en œuvre

Le procédé de mise en œuvre sur chantier des blocs de coffrage en béton de bois est relativement simple et ne requiert pas une main d'œuvre spécialisée. Par conséquent, un nouvel avantage à soulever est la possibilité d'auto-construction, pratique très en vogue actuellement.

Les blocs se montent à sec, sans mortier ni colle, en quinconce (**Figure 38**) à l'exception du premier rang qui, lui, est posé sur un lit de mortier pour une meilleure adhésion avec le sol et la mise à niveau. L'isolant supplémentaire est soit déjà intégré au bloc durant sa fabrication, soit placé manuellement sur le chantier. Une fois mis en place, les blocs creux sont remplis de béton coulé dans les alvéoles afin de liaisonner le tout. Des armatures métalliques peuvent aussi être ajoutées horizontalement et verticalement (avant de couler le béton) pour des applications nécessitant des résistances plus importantes (murs de soutènement ou de cave) (Fixolite s.a ; Isolabloc, 2015; Isotex Srl, 2015).



FIGURE 38 - MISE EN OEUVRE DES BLOCS EN BÉTON DE BOIS (ARCHIEXPO.FR)

La structure du bloc peut bénéficier de finitions très variées pour l'intérieur comme pour l'extérieur. A l'intérieur, on peut le laisser apparent ou le peindre, le recouvrir d'un enduit de plâtre ou de chaux hydraulique, lui visser des plaques de plâtre ou tout autre bardage. A l'extérieur, les solutions sont aussi nombreuses : on peut placer des briques, le recouvrir d'un crépi et lui fixer un bardage (bois, métallique) ou des panneaux de béton architectonique, etc. (Fixolite s.a ; Isolabloc, 2015).

<sup>1</sup> Réglementation Thermique 2012 (France)

<sup>2</sup> Réglementation Thermique 2020 (France)

<sup>3</sup> Label Bâtiment Basse Consommation (France)



#### 2.8.4.4 Concurrence

Actuellement, il existe différents fabricants sur le marché proposant des modèles de blocs de coffrage en béton de bois. Ceux qui sont présentés ci-dessous ont été trouvés grâce à une recherche internet. Il est tout à fait possible que d'autres fabricants produisent ce genre de blocs mais ne soient pas répertoriés dans ce travail.

Les blocs de coffrage en béton de bois commercialisés contiennent, la plupart du temps, une isolation intégrée (Figure 39)

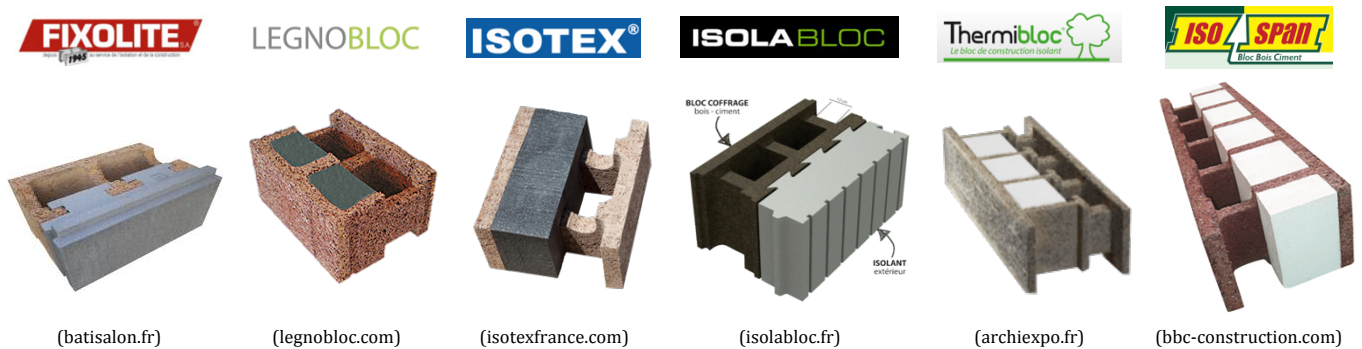


FIGURE 39 - BLOCS EN BÉTON DE BOIS PRÉSENTS SUR LE MARCHÉ

La différence fondamentale que Prefer revendique par rapport aux autres fabricants est la préminéralisation des copeaux. Ce processus est mis en application uniquement par souci économique. En effet, les copeaux étant préminéralisés, ils se comportent ensuite comme des granulats classiques, vu qu'ils sont alors inertes. Ils peuvent donc être utilisés dans les machines de productions existantes et ne nécessitent pas des machines spécifiques, contrairement aux concurrents. De plus, ils absorbent moins d'eau et de ciment lors du mélange final et ce qui permet une meilleure cohésion.

Ces copeaux, une fois préminéralisés deviennent plus polyvalents et peuvent également servir pour d'autres applications. Outre pour le béton de bois des blocs (Figure 40), ils sont utilisés pour du béton de bois à couler (dans les parois préfabriquées) ou comme revêtement de sol pour les aménagements extérieurs.



FIGURE 40 - BLOCS DE BÉTON DE BOIS PREFER POUR ESSAIS

Afin de pouvoir comparer les nouveaux blocs que Prefer désire commercialiser avec les concurrents actuels, le **Tableau 2** présente un récapitulatif des propriétés des blocs de béton de bois des différents fabricants. Les données ont été récoltées sur les sites internet, brochures commerciales ou documents techniques trouvés en ligne (Fixolite s.a ; Deutsches Institut für Bautechnik, 2013 ; Fixolite, 2009 ; Legnobloc Srl., 2016 ; 118000 SAS, 2015 ; Bionergies, 2008 ; Legnobloc France, 2011 ; Show Les Pixels, 2013 ; Isotex Srl., 2015 ; Istituto Giordano S.p.A., 2010 ; Isotex, 2015 ; Isolabloc, 2015 ; Xelis Groupe, 2015 ; Xelis Groupe, 2014 ; CSTB, 2012 ; Isospan Euregio, 2015 ; Isospan Baustoffwerk GmbH, 2014 ; Deutsches Institut für Bautechnik, 2013).

TABLEAU 2 - CARACTÉRISTIQUES DES BLOCS DE BÉTON DE BOIS DES CONCURRENTS

	Origine	Zone d'activité géographique	$\lambda$ [W/m.K]	Densité [kg/m³]	Résistance diffusion vapeur d'eau ( $\mu$ )	RT2012	RT2020	BBC	Atec/DTA CSTB	CE	Autres
<b>Fixolite</b>	Belgique	Belgique, France, Allemagne, Italie, Pays-Bas, Portugal	0,105	510	7	Oui	/	Oui	Oui	Oui	DTU, ATE
<b>Legnobloc</b>	Italie	Italie, France	0,12	/	/	Oui	/	/	/	Oui	/
<b>Isotex</b>	Allemagne	Allemagne, Italie, France, Espagne, Grèce, Suisse Roumanie	0,104	510	5,9	Oui	/	Oui	Oui	Oui	Crédits LEED, certificats Eco-construction
<b>Isolabloc</b>	France	France	0,12	/	/	Oui	Oui	Oui	Oui	/	/
<b>Thermibloc</b>	France	France	0,1	500	/	Oui	Oui	Oui	Oui	/	/
<b>Isospan</b>	Autriche	Autriche, Pays-Bas	0,1	475	/	Oui	Oui	Oui	/	/	Label de qualité Natureplus

**Légende :**

/	Donnée non mentionnée
RT2012	Réglementation Thermique 2012 (France)
RT2020	Réglementation Thermique 2020 (France)
BBC	Label Bâtiment Basse Consommation (France)
Atec	Avis Techniques réalisé par le CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment en France
DTA	Document Technique d'Application réalisé par le CSTB
CE	Marquage CE (conforme aux exigences européennes)
DTU	Document Technique Unifié (France)
ATE	Agrément Technique Européen

On peut voir que la conductibilité thermique du béton de bois reste proche de 0,1 W/mK et que sa masse volumique tourne autour de 500 kg/m³. La comparaison est réalisée uniquement sur le matériau béton de bois et non sur les blocs entiers avec isolant.

Les différentes compositions des blocs de béton ont un impact clair, entre autres, sur leurs performances mécaniques et thermiques.

Au point suivant, un tableau récapitulatif permettra au lecteur d'avoir une vue plus globale des caractéristiques de chacun.



## 2.9 Tableau comparatif

En guise de conclusion, le tableau ci-dessous récapitule les valeurs récoltées au cours de la revue de la littérature. Les données reprises dans le **Tableau 3** proviennent des chapitres précédents où les sources y sont citées.

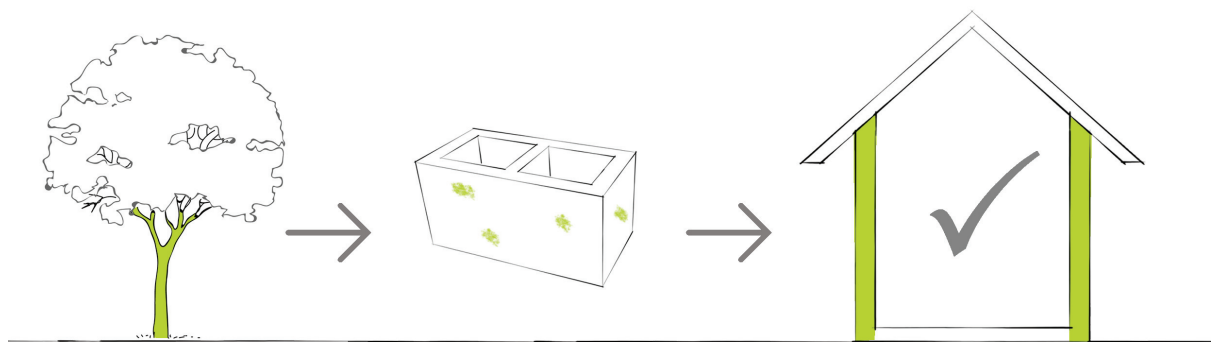
Les valeurs les plus intéressantes (masse volumique la plus faible, résistance en compression la plus élevée et conductivité thermique la plus faible) sont mises en évidence en vert tandis que les valeurs les moins avantageuses sont surlignées en rouge.

TABLEAU 3 - RÉCAPITULATIF DES CARACTÉRISTIQUES DES DIFFÉRENTS BLOCS

		Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	Résistance compression [MPa]	Conductivité thermique $\lambda$ [W/m.K]
2.5.1	Blocs de béton traditionnels	1800 - 2500	8	1
2.5.2	Blocs de coffrage	2100	18 - 24	1,09 - 1,3
2.5.3	Blocs à isolation intégrée	/	> 4	0,157
2.6.1	Monomurs de terre cuite	700	7,5 - 10	0,12 - 0,17
2.6.2	Blocs de béton cellulaire	300 - 700	2 - 5	0,11 - 0,16
2.6.3	Blocs de béton à granulats légers	1400 - 1900	> 20	0,12 - 0,3
2.7.2	Ossature bois-paille	100	/	0,06
2.7.3	Béton de chanvre	300 - 480	0,29 - 0,39	0,076 - 0,115
2.7.4	Béton de miscanthus	< 400	1 - 1,47	0,0916 - 0,0896
2.8.2	Béton de bois	450 - 1500	0,5 - 2	0,09 - 0,16

Il est intéressant ici de faire la distinction entre les matériaux porteurs, qui, de par leur masse, ont toujours un coefficient  $\lambda$  élevé et les matériaux non porteurs, qui, de par leur légèreté, ont un  $\lambda$  beaucoup plus faible. Dans la suite de ce travail, nous allons alors tenter de démontrer que le béton de bois constitue une solution intermédiaire, en alliant l'isolation thermique et la résistance mécanique.

## CHAPITRE 3 – EXPÉRIMENTATIONS



## 3. Expérimentations

### 3.1 Informations préalables

Dans ce chapitre, les éléments nécessaires à la compréhension des expérimentations sont explicités. Les normes suivies, le protocole employé, les résultats et les conclusions propres à chaque essai sont mentionnés dans chaque partie s’y rapportant.

#### 3.1.1 Planification des essais

L’ensemble des essais est réalisé au Laboratoire des Matériaux de Construction de l’Université de Liège, dans la division de Génie Minéral, Matériaux et Environnement (GeMMe).

Le planning des essais en laboratoire (**Figure 41**) a été conçu suivant la nature de ceux-ci : si un essai est destructif, il devra être effectué en fin de l’étude. Effectivement, il est logique de pouvoir réaliser d’autres essais préalables sur les échantillons qui seront ensuite détruits. Les essais de traction, de compression et de flexion sont donc réalisés en dernier lieu.

La période d’expérimentation en laboratoire s’est déroulée du mois de février jusqu’au mois de mai et a nécessité une présence et un travail presque journalier.

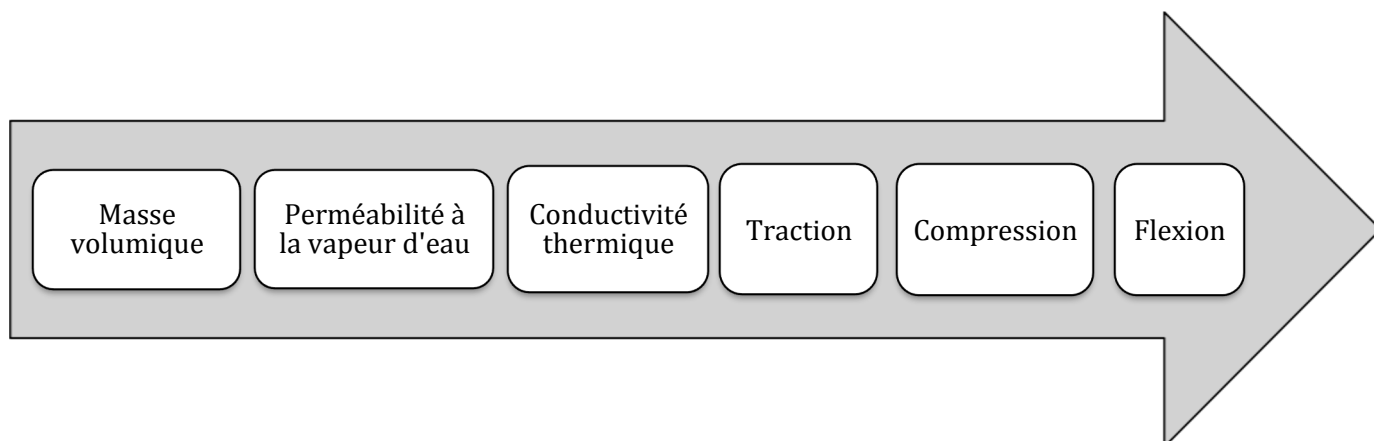


FIGURE 41 - PLANIFICATION DES ESSAIS

La première mesure effectuée est la masse volumique des blocs (du 19/02/2016 au 16/03/2016). Il est primordial de connaître la masse volumique des échantillons avant de réaliser les autres essais. On mesure ensuite la perméabilité à la vapeur d’eau du béton de bois sur une série d’échantillons prélevés sur les parois des blocs (du 8/03/2016 au 18/03/2016). Après, la conductivité thermique des blocs remplis est déterminée. Il s’agit de l’essai qui prend le plus de temps (du 18/03/2016 au 22/04/2016). Et enfin, les tests de résistance en traction, en compression et en flexion sont effectués (du 18/04/2016 au 19/05/2016).

### 3.1.2 Caractéristiques des blocs étudiés

Les essais en laboratoire réalisés lors de cette étude ont été effectués sur des prototypes de blocs en béton de bois fournis par la société Prefer. Ces blocs ont été fabriqués avec les moules dont Prefer disposait déjà. Il faut savoir que ces moules sont habituellement utilisés pour former les blocs de béton traditionnels dont les dimensions extérieures sont 39x14x19 cm (longueur x largeur x hauteur) avec des parois d'une épaisseur de 35 mm (**Figure 42**). Ces moules ne sont pas destinés à produire des blocs de coffrage. En effet, leur forme ne correspond pas tout à fait à la forme des blocs de coffrage qui eux, sont plus grands et évidés dans le fond afin de pouvoir laisser s'écouler le béton lors du remplissage sur chantier. Un plan avec la géométrie et les dimensions des futurs blocs de coffrage est tout de même déjà disponible (voir annexes page 115). Les dimensions seront 60x24x20 cm avec des parois d'une épaisseur de 30 mm (**Figure 43**).

En bref, les blocs utilisés pour les essais au laboratoire ont uniquement été moulés sur base du moule actuel étant donné que Prefer ne disposait pas encore du nouveau moule. Il faut donc noter que les résultats obtenus seront une bonne indication des performances du bloc mais ne représentent tout de même pas encore la réalité de terrain.

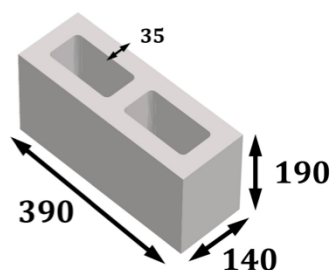


FIGURE 42 - BLOC ACTUEL

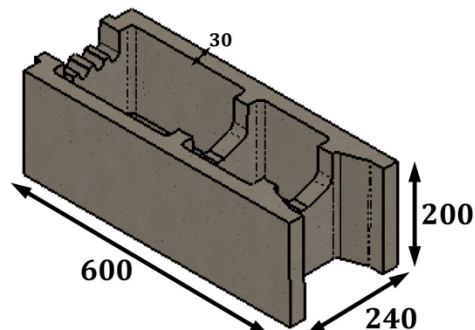


FIGURE 43 - FUTUR BLOC DE COFFRAGE

Les blocs de béton de bois ont été fabriqués selon quatre recettes différentes. Leur composition en kg pour obtenir un mètre cube de béton de bois est donnée au **Tableau 4** (voir fiches détaillées en annexe page 117). Le bois utilisé pour faire les copeaux provient de Belgique. Les essences employées varient (sapin, hêtre, etc.) mais ne peuvent pas être du pin en raison de sa trop grande teneur en sucre qui inhiberait la prise du ciment.

TABLEAU 4 - COMPOSITION DU BÉTON DE BOIS EN KG/M<sup>3</sup> SELON LES 4 RECETTES DE PREFER

	1	2	3	4
<b>Ciment CEM III 42,5 A</b>	178	196	204	189
<b>Copeaux de bois minéralisés</b>	287	275	255	274
<b>Eau</b>	198	196	204	198
<b>Scories</b>	128	127	41	/
<b>Sable 0/2</b>	/	44	/	/
<b>Argex 0/4 AR 0/4 650</b>	/	/	127	118
<b>Concassés calcaires 0/2 - 0/4</b>	/	/	/	43
<b>Total [kg/m<sup>3</sup>]</b>	791	838	830	822

Les différentes recettes sont en réalité des adaptations d'une recette de béton de bois « pur » dans le but d'obtenir une mise en œuvre réaliste lors de la production des blocs. En effet, le mélange de béton de bois « pur » (uniquement des copeaux minéralisés, du ciment et de l'eau) est très difficile à mettre en œuvre car très sec et pas du tout cohésif. Lors de la production, les moules des blocs, un fois remplis avec le mélange de béton de bois, sont soumis à une vibration intense et à un démoulage direct. Afin de pouvoir démouler immédiatement le bloc, sans temps de séchage préalable, il est nécessaire d'avoir une bonne cohésion du matériau dès le départ. Or, le problème avec le béton de bois « pur » est son manque de particules fines. En effet, les poussières et autres filaments de bois sont préalablement triés et supprimés du reste des copeaux de bois car ils sont consommateurs de beaucoup d'eau et de ciment.

Les essais au laboratoire sont à chaque fois réalisés sur les quatre recettes afin de les comparer.

Une partie des blocs ont été fournis vides, uniquement composés de béton de bois. Une autre partie ont été fournis remplis d'un béton classique afin d'étudier leurs propriétés tels qu'ils seront mis en œuvre dans une paroi. La composition du béton de remplissage est donnée au **Tableau 5**.

TABLEAU 5 - COMPOSITION DU BÉTON DE REMPLISSAGE POUR 1M<sup>3</sup> (PREFER)

	Quantité [kg]
<b>Ciment CEM III B 42,5 N LA</b>	320
<b>Sable 0/4</b>	325
<b>Sable 0/2</b>	325
<b>Concassé calcaire 0/4</b>	150
<b>Concassé calcaire 2/6</b>	250
<b>Concassé calcaire 6/14</b>	870
<b>Eau</b>	157
<b>Plasitifiant</b>	0,85%
<b>Total [kg/m<sup>3</sup>]</b>	2397

### 3.1.3 Méthode d'échantillonnage

Les blocs vides ont été fabriqués à l'usine de préfabrication Prefer à Flemalle le 19 octobre 2015. Ils ont ensuite été stockés, empilés sur des palettes, dans le hangar de l'usine pendant deux semaines (climat extérieur mais couvert, température et humidité relative variables) avant d'être amenés au laboratoire. Les blocs sont d'apparence rougeâtre tout simplement parce que les copeaux de bois qui ont été utilisés dans la composition avaient été minéralisés au préalable avec du ciment et un colorant rouge.

Ils ont ensuite été remplis, le 27 novembre 2015, avec un béton classique pour être acheminés au laboratoire quelques jours plus tard.

Après réflexion, il s'est avéré que le nombre de blocs remplis déjà fournis n'était pas suffisant. D'autres blocs (5 de chaque recette) ont alors été remplis le 22 février 2016 et amenés deux jours plus tard au laboratoire.

Chaque bloc reçu est nommé, numéroté et photographié afin de réaliser un inventaire complet des blocs et de leurs défauts. La convention choisie pour la numérotation est la suivante :

- le premier chiffre est le numéro de la recette (de 1 à 4) ;
- la lettre qui suit précise si le bloc est vide (V), rempli (R), ou rempli et stocké en chambre humide (Rh) ;
- le dernier chiffre est un numéro d'indice dans une même recette.

Quatre blocs vides, de chaque recette (au total 16 blocs) sont stockés au laboratoire à atmosphère contrôlée à une température de  $21 \pm 2^\circ\text{C}$  et  $60 \pm 10\%$  d'humidité relative.

Deux blocs remplis, de chaque recette (au total 8 blocs) sont stockés au laboratoire à atmosphère contrôlée à une température de  $21 \pm 2^\circ\text{C}$  et  $60 \pm 10\%$  d'humidité relative.

Deux blocs remplis, de chaque recette (au total 8 blocs) sont stockés en chambre humide à une température de  $21 \pm 2^\circ\text{C}$  et à plus de 95% d'humidité relative.

Cinq blocs remplis de chaque recette (au total 20 blocs) sont stockés au laboratoire dans une pièce où la température avoisine les  $21^\circ\text{C}$  et 40% d'humidité relative (atmosphère non contrôlée voir fiche en annexe page 121).

Il a ensuite fallu déterminer quel bloc allait être utilisé pour quel essai. Le **Tableau 6** montre le choix qui a été fait. Le nombre de croix équivaut au nombre d'échantillons utilisés.

TABLEAU 6 - INVENTAIRE DES BLOCS PAR ESSAIS

	Blocs	Masse volumique	Perméabilité à la vapeur d'eau	Conductivité thermique	Traction	Compression	Flexion
		Bloc entier	Bloc découpé	Bloc entier	Bloc découpé	Bloc entier	Bloc découpé
Vides	1V1	x	xxxx				
	1V2	x					xx
	1V3	x					xx
	1V4	x					xx
	2V1	x	xxxx				
	2V2	x					xx
	2V3	x					xx
	2V4	x					xx
	3V1	x	xxxx				
	3V2	x					xx
	3V3	x					xx
	3V4	x					xx
	4V1	x	xxxx				
	4V2	x					xx
	4V3	x					xx
	4V4	x					xx
Remplis	1R1	x			xx		
	1R2	x				x	
	2R1	x			xx		
	2R2	x				x	
	3R1	x			xx		
	3R2	x				x	

Remplis humides	4R1	x			xx		
	4R2	x				x	
	1Rh3	x			xx		
	1Rh4	x				x	
	2Rh3	x			xx		
	2Rh4	x				x	
	3Rh3	x			xx		
	3Rh4	x				x	
	4Rh3	x			xx		
Remplis 2 <sup>ème</sup> fournée	4Rh4	x				x	
	1R5	x		x		x	
	1R6	x		x		x	
	1R7	x		x			
	1R8	x		x			
	1R9	x		x			
	2R5	x		x		x	
	2R6	x		x		x	
	2R7	x		x			
	2R8	x		x			
	2R9	x		x			
	3R5	x		x		x	
	3R6	x		x		x	
	3R7	x		x			
	3R8	x		x			
	3R9	x		x			
	4R5	x		x		x	
	4R6	x		x		x	
	4R7	x		x			
	4R8	x		x			
	4R9	x		x			

Dans la suite de ce chapitre, les essais vont être présentés un par un selon l'ordre chronologique dans lequel ils ont été réalisés.

## 3.2 Masse volumique apparente

### 3.2.1 Définition de la grandeur physique

La masse volumique caractérise la masse du matériau par unité de volume.

Le volume apparent de l'échantillon est déterminé à partir de sa longueur, sa largeur et sa hauteur, diminué du volume des deux grands vides.

La masse volumique apparente peut donc être calculée comme suit :

$$\text{Masse volumique apparente} = \frac{\text{Masse [kg]}}{\text{Volume apparent [m}^3\text{]}} \quad [\text{kg/m}^3]$$

### 3.2.2 Principe de l'essai et protocole

L'essai qui suit est basé sur la norme européenne EN 772-13 et la norme belge NBN EN 12390-7.

#### 3.2.2.1 Masse volumique à 60% HR

La mesure de la masse volumique se réalise sur tous les blocs stockés au laboratoire (21 +- 2°C et 60 +- 10% HR) à masse constante (4 blocs vides de chaque recette et 7 blocs remplis de chaque recette).

La procédure utilisée est la suivante :

- Installation de la balance : mise à niveau (bulle au milieu) ;
- Pose d'un bloc sur la balance : relevé de la valeur de la masse au gramme près (**Figure 44**) ;
- Mesure des dimensions du bloc à la latte graduée (au dixième de centimètre près) ;
- Relevé des défauts du bloc ;
- Tare de la balance entre chaque mesure ;
- Pose du bloc suivant ;
- ...
- Calcul du volume apparent ;
- Calcul de la masse volumique.



FIGURE 44 - PESÉE ET MESURE D'UN BLOC



Remarques lors de l'essai :

- Le volume apparent des blocs est calculé uniquement sur base de leurs mesures géométriques. La valeur obtenue est donc approximative étant donné que les dimensions sont loin d'être constantes sur les faces des blocs (présences de copeaux plus gros, absence de copeaux, effrittage, etc.). En effet, il n'a pas été possible de réaliser des pesées sous eau pour déterminer le volume plus précis des blocs car la seule balance adéquate ne possède pas de dispositif pour suspendre le bloc. On se satisfera donc des volumes estimés par les mesures géométriques.
- Les blocs en béton de bois s'effrittent assez facilement. On remarque qu'un nombre important de copeaux de bois a tendance à se détacher des blocs. Par conséquent, les mesures de masse volumique peuvent être légèrement erronées suite à cette petite perte de masse lors des manipulations.
- Tous les blocs semblent être plus étroits dans la partie basse (+- 38,6 cm de longueur) et plus larges sur la face supérieure (+- 39 cm de long). Ce phénomène est probablement dû au retour élastique du béton de bois pendant la fabrication. Il s'agit d'un problème de mise en œuvre car les moules qui ont été utilisés ne sont pas adaptés au béton de bois. En effet, le béton classique, habituellement coulé dans ces moules, a besoin d'être compressé pour atteindre une meilleure résistance, contrairement au béton de bois, qui lui n'acquiert par de résistance supplémentaire lors de sa compression. Suivant le même procédé de fabrication, le béton de bois est donc compressé de manière similaire sur une hauteur importante, c'est à dire trop compressé pour lui, et se relâche ensuite par un effet de gonflement assez important. Ce retour élastique provoque la variation de dimensions constatée lors des mesures. Des recherches sont en cours chez Prefer pour éviter ce phénomène et l'adapter à la fabrication future des blocs en béton de bois. Les nouveaux moules pour les blocs de coffrages auront une hauteur de compression moindre ce qui permettra de résoudre le problème, du moins en partie. La mesure de longueur utilisée est alors une moyenne de ces deux valeurs.
- Pour calculer le volume des vides (dans le cas des blocs creux), il a fallu mesurer la profondeur de ceux-ci. On remarque que la surface du fond des deux vides des blocs n'est pas plane mais légèrement incurvée (**Figure 45**). La mesure a été prise au milieu du vide à l'endroit le plus profond. Malgré cela, la mesure n'était pas assez précise et il a été choisi d'approximer la profondeur des vides à 18 cm pour tous les blocs.

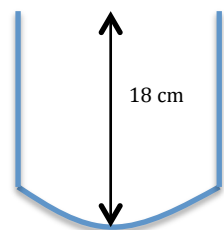


FIGURE 45 - FORME DES VIDES

### 3.2.2.2 Masse volumique à 95% HR

Pour rappel, huit blocs remplis (2 blocs de chaque recette) ont été stockés en chambre humide (**Figure 46**). La première étape est de trouver la stratégie pour peser ces blocs. Étant stockés dans la chambre humide avec les vaporisateurs d'eau depuis presque trois mois, les blocs sont entièrement gorgés d'eau. Par conséquent, lorsqu'on soulève un bloc, un fin filet d'eau se met à

couler sur la tranche quand on l'incline. Les blocs ont été égouttés avant la pesée. Le choix se porte sur la mise en place d'un système d'égouttage (**Figure 47**) à l'intérieur de la chambre humide, sans le vaporisateur d'eau pour éviter que les blocs ne commencent à sécher par le haut si l'égouttage se faisait hors de la chambre humide. Pour favoriser l'écoulement de l'eau, le dispositif présente une légère pente de 7%. La balance utilisée pour mesurer la masse des blocs est recouverte d'un socle en plastique pour éviter qu'elle soit mouillée (**Figure 48**).



FIGURE 46 - BLOCS STOCKÉS EN CHAMBRE HUMIDE

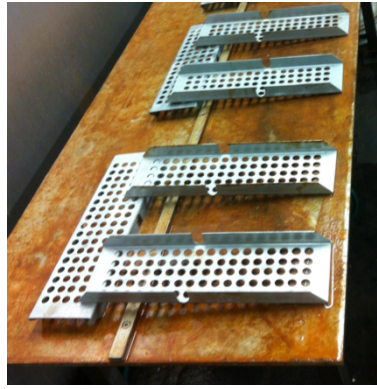


FIGURE 47 - DISPOSITIF D'ÉGOUTTAGE



FIGURE 48 - PROTECTION DE LA BALANCE

La procédure utilisée est la suivante :

- Placement de tous les blocs sur le dispositif d'égouttage ;
- Attente de 10 minutes ;
- Première pesée (masse 1 à  $t_0$ ) pour chaque bloc et mesure de leurs dimensions ;
- Deuxième pesée (masse 2 à  $t_0 + 22$  min) ;
- Troisième pesée (masse 3 à  $t_0 + 44$  min) ;
- Quatrième pesée (masse 4 à  $t_0 + 66$  min) ;
- Cinquième pesée (masse 5 à  $t_0 + 106$  min) ;
- Calcul du volume apparent ;
- Calcul de la masse volumique humide.

### 3.2.3 Résultats

#### 3.2.3.1 Masse volumique apparente à 60% HR

Le calcul de la masse volumique apparente des blocs à 60% HR a été effectué sur tous les blocs. Le **Tableau 7** présente les résultats (tableaux détaillés en annexe page 122).

TABLEAU 7 - MASSE VOLUMIQUE APPARENTE DES BLOCS À 60% HR

	Blocs	Masse volumique apparente [kg/m <sup>3</sup> ]	Moyenne [kg/m <sup>3</sup> ]	Ecart-type [kg/m <sup>3</sup> ]
Vides	1V1	721	731	16
	1V2	758		
	1V3	730		
	1V4	717		
	2V1	850	846	13
	2V2	860		
	2V3	826		
	2V4	850		
	3V1	830	827	34
	3V2	786		
	3V3	815		
	3V4	879		
	4V1	801	793	15
	4V2	768		
	4V3	798		
	4V4	804		
Remplis	1R1	1146	1162	55
	1R2	1131		
	1R5	1218		
	1R6	1221		
	1R7	1226		
	1R8	1086		
	1R9	1103		
	2R1	1217	1224	25
	2R2	1172		
	2R5	1246		
	2R6	1241		
	2R7	1242		
	2R8	1238		
	2R9	1213		
	3R1	1247	1244	36
	3R2	1217		
	3R5	1246		
	3R6	1313		
	3R7	1268		
	3R8	1222		
	3R9	1196		
	4R1	1210	1201	19
	4R2	1197		
	4R5	1180		
	4R6	1198		
	4R7	1242		
	4R8	1190		
	4R9	1193		

### 3.2.3.2 Masse volumique apparente à 95% HR

Après avoir réalisé cinq pesées consécutives des blocs remplis et stockés en chambre humide, on remarque que la masse ne se stabilise pas pour tous les blocs (exemple à la **Figure 49**). En effet, l'eau contenue dans les blocs continue à s'écouler hors de ceux-ci entre les différentes pesées à cause de la structure très poreuse du béton de bois. Si on attendait plus longtemps que le bloc s'égoutte et que sa masse se stabilise, il perdrait certainement une grande partie de son eau et commencerait à sécher par le haut, ce qui ne serait donc plus représentatif de la masse humide. Le choix effectué consiste à calculer la masse volumique du bloc sur base de la 1<sup>ère</sup> et de la 5<sup>ème</sup> masse mesurée pour les comparer afin de déterminer s'il existait une différence notable due à l'eau qui s'écoule. On remarque une différence d'à peu près 2 kg/m<sup>3</sup> entre la 1<sup>ère</sup> et la 5<sup>ème</sup> pesée, ce qui est quasiment négligeable étant donné que cela représente une différence de 0,1 à 0,2% de la masse volumique. La masse volumique reprise dans le **Tableau 8** est celle calculée sur base de la 5<sup>ème</sup> pesée.

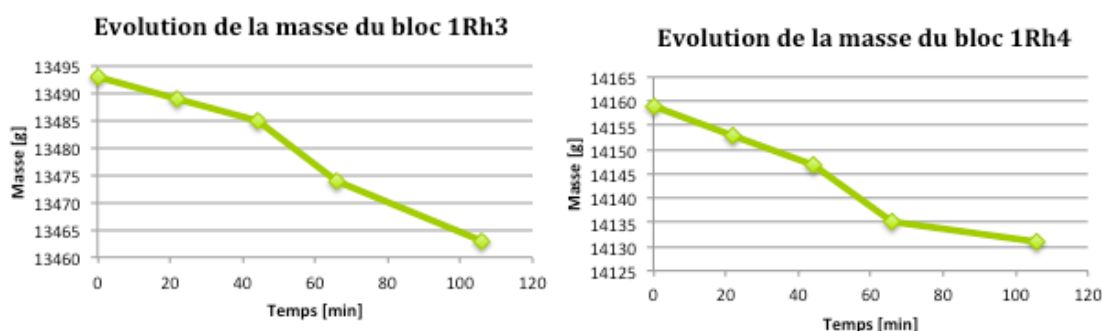


FIGURE 49 - EVOLUTION DE LA MASSE DES BLOCS EN FONCTION DU TEMPS

TABLEAU 8 - MASSE VOLUMIQUE APPARENTE DES BLOCS À 95% HR

	Blocs	Masse volumique apparente [kg/m <sup>3</sup> ]	Moyenne [kg/m <sup>3</sup> ]	Ecart-type [kg/m <sup>3</sup> ]
Remplis humides	1Rh3	1326	1364	38
	1Rh4	1402		
	2Rh3	1416	1419	3
	2Rh4	1421		
	3Rh3	1428	1427	0
	3Rh4	1427		
	4Rh3	1434	1432	2
	4Rh4	1431		

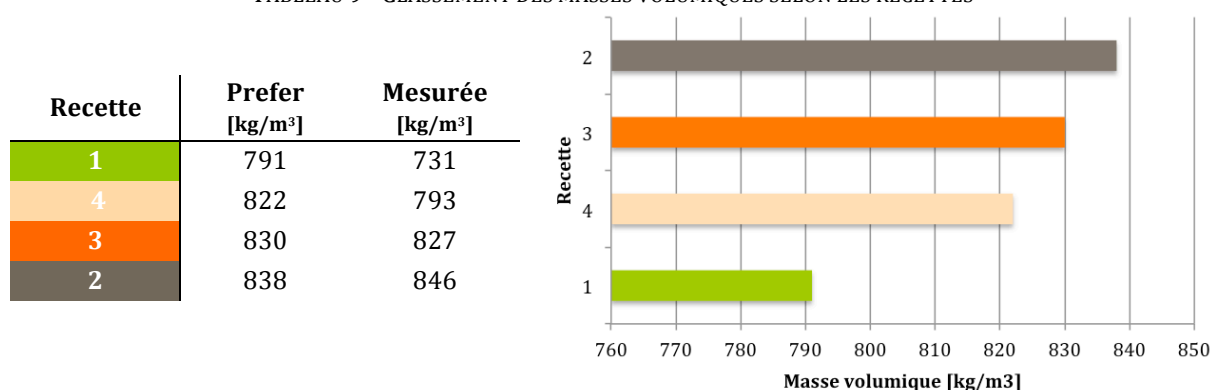
### 3.2.4 Discussion

Les résultats obtenus pour les masses volumiques confirment que la recette n°1 est bien la plus légère (**Tableau 4**). Les ingrédients utilisés dans cette recette sont les plus légers : teneur la plus élevée en copeaux de bois et ne contient ni sable, ni concassés calcaires, étant tous les deux assez lourds.

Un rapide calcul théorique permet de vérifier que la masse volumique mesurée sur les blocs remplis correspond bien à la masse volumique du bloc de béton de bois augmentée de celle du béton de remplissage dans les proportions présentes (voir tableau en annexe page 124).

Le classement par ordre croissant des masses volumiques mesurées sur les blocs vides correspond bien au classement des masses volumiques des bétons de bois frais donné par leur composition par Prefer (**Tableau 9**). Les résultats obtenus sont logiques.

TABLEAU 9 - CLASSEMENT DES MASSES VOLUMIQUES SELON LES RECETTES



Néanmoins, lorsqu'on regarde les masses volumiques mesurées sur les blocs remplis à l'état humide, la recette n°4 a tendance à absorber plus d'eau que les trois autres recettes (**Tableau 10**).

TABLEAU 10 - POURCENTAGE DE PRISE DE MASSE DES BLOCS REMPLIS SELON L'HUMIDITÉ RELATIVE

Recette	Masse volumique 60% HR	Masse volumique 95% HR	Pourcentage de prise de masse
1	1162	1364	17,4%
2	1224	1419	15,9%
3	1244	1427	14,7%
4	1201	1432	19,2%

### Conclusion

En fin de compte, la recette n°1 semble la plus intéressante en terme de densité étant donnée qu'elle est la plus légère et donc le bloc de béton de bois de la recette n°1 devrait être le plus isolant. Pour rappel, les blocs de béton classiques ont une masse volumique comprise entre 1800 à 2500 kg/m³, les blocs en béton de bois sont donc 2 à 3 fois plus légers que les blocs traditionnels.

### 3.3 Masse volumique réelle et porosité des copeaux de bois minéralisés

En complément de la masse volumique des blocs de béton de bois, il a semblé intéressant de mesurer également la masse volumique des copeaux de bois utilisés pour la composition des quatre recettes des blocs.

#### 3.3.1 Définition de la grandeur physique

La porosité indique la présence de pores au sein d'un matériau. Il s'agit du rapport entre le volume des pores du matériau et son volume total.

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique de celui-ci, volume des pores compris. La masse volumique réelle, par contre, est la masse volumique du matériau en déduisant le volume des pores. Une fois les deux masses volumiques connues, il est possible de calculer la porosité ( $n$ ) du matériau :

$$n = \frac{V_{vide}}{V_{tot}} = \frac{V_{tot} - V_{matière}}{V_{tot}} = 1 - \frac{V_{matière}}{V_{tot}} = 1 - \frac{V_{matière}}{V_{tot}} \times \frac{M_{matière}}{M_{matière}} = 1 - \frac{MV_{apparente}}{MV_{réelle}}$$

#### 3.3.2 Principe de l'essai et protocole

Cet essai est réalisé dans le laboratoire de géotechnique à l'aide d'un pycnomètre à gaz (**Figure 50**).



FIGURE 50 - PYCNOMÈTRE À GAZ

Le principe du pycnomètre à gaz se base sur la mesure du volume de l'échantillon. Il est composé de deux chambres de volumes connus. Pour déterminer la masse volumique réelle d'un échantillon, il suffit d'injecter un gaz (dans ce cas de l'hélium) sous une pression connue



dans la première chambre contenant une masse déterminée du matériau. Le gaz est ensuite libéré dans une autre chambre de référence où l'on mesure la nouvelle pression (**Figure 51**). Grâce aux deux pressions connues et aux volumes des chambres également connus, on peut calculer le volume de l'échantillon par la loi des gaz parfaits. Les détails des calculs réalisés par le logiciel connecté au pycnomètre se trouvent en annexe page 125 (aPROpaille, 2016).

Le volume réel de l'échantillon (sans les pores) ainsi que sa masse étant connus, la masse volumique réelle peut donc être calculée.

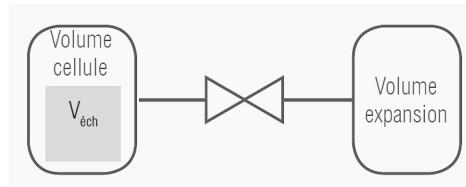


FIGURE 51 - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU PYCNOMÈTRE À GAZ (APROPAILLE, 2016, P. 41)

La procédure utilisée est la suivante :

- Placement des copeaux de bois minéralisés dans l'enceinte cylindrique ;
- Pesée de l'ensemble (cylindre contenant les copeaux) ;
- Placement de l'enceinte dans le pycnomètre ;
- Entrée du gaz dans la chambre contenant les copeaux ;
- Attente de la stabilisation de pression du gaz (pénétration dans tous les pores) ;
- Mesure de la pression P1 ;
- Relâchement du gaz dans la deuxième chambre ;
- Mesure de la pression P2 ;
- Les pressions sont enregistrées par le logiciel sur l'ordinateur ;
- Calcul de la masse volumique des copeaux.

Cet essai est réalisé trois fois : sur les copeaux à l'état reçu (humide), à l'état saturé et à l'état sec. Pour chaque état, la mesure est réalisée trois ou quatre fois.

Pour obtenir les copeaux saturés, ils sont plongés pendant une semaine dans un seau d'eau (**Figure 52**).

Pour obtenir les copeaux secs, ils sont placés dans des coupelles à l'étuve à 50°C (**Figure 53**) et ils sont pesés toutes les 24h afin de déterminer quand la masse est constante (variation de masse de moins de 0,1% entre deux pesées). Ils sont arrivés à masse constante après 3 jours.



FIGURE 52 - COPEAUX SATURÉS DANS L'EAU



FIGURE 53 - COPEAUX À L'ÉTUVE



### 3.3.3 Résultats

Les masses volumiques aux trois états étudiés sont données au **Tableau 11** (voir fiches détaillées en annexe page 126).

TABLEAU 11 - MASSE VOLUMIQUE DES COPEAUX DE BOIS MINÉRALISÉS

	Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Secs</b>	1667
<b>Humides</b>	1425
<b>Saturés</b>	1304

On considère que la masse volumique apparente est celle des copeaux saturés. Effectivement, vu que tous les pores sont remplis d'eau, le volume mesuré par le pycnomètre est le volume apparent. De plus, on considère que la masse volumique réelle est celle des copeaux secs. En effet, les pores du bois sont alors totalement vides d'eau et le pycnomètre mesure le volume réel.

La porosité peut alors être calculée comme suit :

$$n = 1 - \frac{MV_{apparente}}{MV_{réelle}} = 1 - \frac{1304}{1667} = 0,217$$

On obtient donc une porosité de 21,7% pour les copeaux de bois minéralisés.

### 3.3.4 Discussion

Les copeaux de bois minéralisés ont une masse volumique nettement plus élevée que celle du bois à l'état naturel, qui elle, varie de 300 à 550 kg/m<sup>3</sup> selon l'essence du bois (Courard, 2011). En effet, les copeaux étant minéralisés avec du ciment, matériau très lourd (3010 kg/m<sup>3</sup> (Holcim s.a., 2011)), leur masse volumique augmente significativement.

La porosité du bois à l'état naturel est de 60 à 80% (Courard, 2011). La minéralisation au ciment permet de réduire fortement la porosité, ce qui rend le bois moins hygroscopique, c'est pourquoi cette technique est utilisée pour la composition du béton de bois.

On peut également comparer la masse volumique apparente des copeaux (1304 kg/m<sup>3</sup>) avec celle des blocs vides (+- 800 kg/m<sup>3</sup>). Cette comparaison indique que les blocs contiennent une grande quantité d'air (pores) étant donné qu'ils sont clairement plus légers que les copeaux minéralisés pris individuellement.

### Conclusion

La minéralisation des copeaux de bois permet de réduire leur porosité et augmente leur masse volumique comparé à du bois naturel.

## 3.4 Perméabilité à la vapeur d'eau

### 3.4.1 Définition de la grandeur physique

La perméabilité à la vapeur d'eau détermine le flux de vapeur d'eau qui traverse un échantillon sur une surface déterminée et dont on connaît l'épaisseur, par unité de temps.

Pour caractériser la perméabilité, on utilise le plus souvent le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau  $\mu$  qui indique combien de fois la vapeur d'eau traverse plus difficilement le matériau que l'air. Ce coefficient est donc toujours supérieur à 1 et peut se calculer comme suit (aPROpaille, 2016 ; Energie+) :

$$\mu = \frac{\delta}{\delta_a}$$

### 3.4.2 Principe de l'essai et protocole

Cet essai est réalisé suivant la norme EN ISO 12572 : 2011.

Afin de déterminer la transmission de vapeur d'eau à travers le béton de bois, il faut créer de part et d'autre de l'échantillon deux ambiances différentes d'humidités relatives. L'échantillon du matériau est scellé sur une coupelle contenant un dessicatif et l'assemblage est placé dans une pièce dont les conditions hygrothermiques sont régulées. La différence de pression de vapeur va alors permettre à la vapeur d'eau de traverser l'échantillon. Cette quantité de vapeur est mesurée grâce à des pesées périodiques de l'assemblage.

Trois échantillons de chaque recette de béton de bois ont été testés.

La procédure utilisée est la suivante :

- Découpage des échantillons à partir des blocs vides de béton de bois pour obtenir des formes adéquates pour l'essai (dimensions légèrement plus grandes que la coupelle d'essai) ;
- Pesée des échantillons toutes les 24 heures jusqu'à obtenir une masse constante (différence de masse inférieure à 0,2%) ;
- Recouvrement à la résine époxy pour étanchéifier les bords et surfaces latérales qui se trouvent hors de l'aire d'échange afin qu'ils ne participent pas au transfert de vapeur ;
- Séchage de la résine et placement d'une deuxième couche par endroit (lorsque des pores étaient encore visibles) ;
- Mesure de l'épaisseur des échantillons de béton de bois à la latte graduée ;
- Mesures des dimensions géométriques des parties recouvertes de résine à la latte graduée. Connaissant alors le volume de ces morceaux et leur masse volumique, on calcule leur masse qui devra être retirée à chaque mesure (puisque ne participant pas à l'échange) ;
- Remplissage des coupelles carrées en plastique avec un fond de chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ), dessicatif qui permet d'obtenir une ambiance à 0% d'humidité relative à l'intérieur de la coupelle ;
- Scellage des échantillons sur les coupelles de dimensions 15 x 15 cm à l'aide d'un pistolet à colle. On veille à ce qu'il n'y ait aucun passage d'air sur les côtés (**Figure 54**) ;
- Placement des assemblages dans le local conditionné à 60% HR et 21°C (**Figure 55**) ;

- Pesée de l'assemblage à des intervalles réguliers jusqu'à obtenir une évolution de la masse qui soit linéaire ;
- Calculs des résultats suivant la norme (voir 3.4.3).



FIGURE 54 - SCELLAGE DE L'ÉCHANTILLON SUR LA COUPELLE CONTENANT DU  $\text{CaCl}_2$

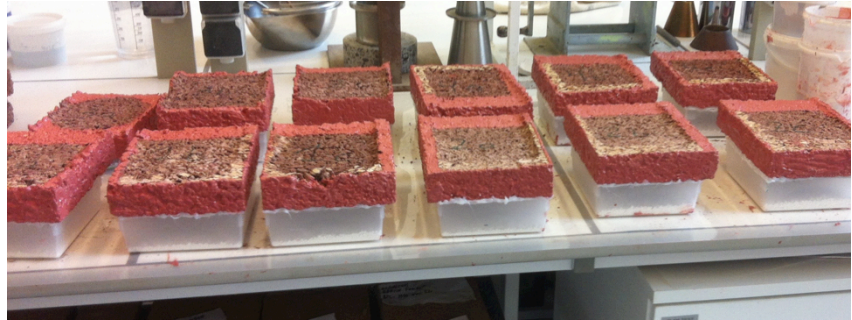


FIGURE 55 - ASSEMBLAGES STOCKÉS DANS LE LOCAL CONDITIONNÉ

#### Remarques :

- Il avait été question d'utiliser du film alimentaire en polyéthylène à la place de la résine époxy pour combler les parties ne participant pas au transfert. Après un essai, il s'est avéré que le film n'adhérait pas au béton de bois et donc qu'aucune étanchéité n'était possible à cause de l'irrégularité des surfaces.
- L'échantillon 3V1a étant trop petit pour se poser entièrement sur une coupelle carrée de 15 x 15 cm, l'essai a été réalisé sur une coupelle en verre ronde d'un diamètre de 14 cm.
- Durant la première journée de l'essai, les valeurs de masse des échantillons sont restées quasiment constantes (Figure 56 et Figure 57). Cela est dû au fait qu'il faut un certain temps pour que le processus de transfert de vapeur se mette en marche : le temps que le  $\text{CaCl}_2$  absorbe toute l'humidité initialement présente dans l'ambiance intérieure de la coupelle.
- La température et l'humidité relative de la pièce, ainsi que la pression barométrique, sont relevées chaque jour. En effet, ces valeurs ne sont pas constantes et doivent donc être prises en compte dans les calculs.

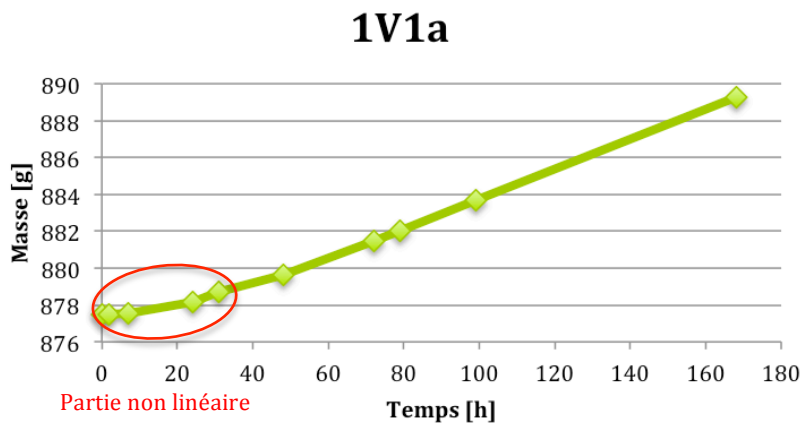


FIGURE 56 - PRISE DE MASSE AU COURS DU TEMPS (ÉCHANTILLON 1V1A)

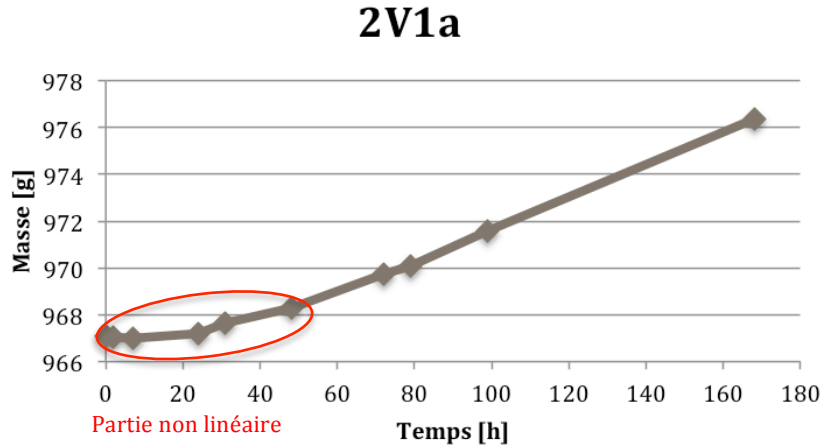


FIGURE 57 - PRISE DE MASSE AU COURS DU TEMPS (ÉCHANTILLON 2V1A)

### 3.4.3 Résultats

Les calculs sont effectués pour tous les échantillons (trois pour chaque recette). Dans la suite, les calculs sont développés pour l'échantillon *1V1a* afin de comprendre la procédure suivie pour obtenir le coefficient  $\mu$ .

#### Vitesse de variation de la masse

La vitesse de variation de la masse est la pente de la droite correspondant à l'évolution de la masse en fonction du temps entre deux pesées.

La pente est calculée pour chaque intervalle de pesée puis une moyenne est effectuée sur les pentes à partir du moment où l'essai est stabilisé (partie linéaire de la **Figure 56**). La moyenne de ces valeurs est  $G$  :

$$G = \text{moyenne} \left( \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \right) = 0,021 \text{ kg/s}$$

#### Densité de flux de vapeur

La densité de flux de vapeur  $g$  est obtenue en divisant  $G$  par la surface d'échange de l'échantillon.

$$A = 0,0225 \text{ m}^2$$

$$g = \frac{G}{A} = \frac{0,021}{0,0225} = 0,93 \text{ kg/s.m}^2$$

#### Perméance à la vapeur d'eau

La perméance  $W$  est obtenue en divisant  $g$  par la différence de pression de vapeur qu'il y a entre les deux faces de l'échantillon.

$$W = \frac{G}{A \cdot \Delta p_v} = 5,43 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s.m}^2.\text{Pa}$$

$$\Delta p_v = p_{ext} - p_{int}$$

Avec :  $p_{int} = 0 \text{ Pa}$

$$p_{ext} = \varphi \cdot 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}} = 170235,092 \text{ Pa}$$

Avec :  $\varphi$  l'humidité relative moyenne et  $\theta$  la température moyenne sur toute la durée de l'essai.

### Résistance à la vapeur d'eau

La résistance à la vapeur d'eau  $Z$  est l'inverse de  $W$ .

$$Z = \frac{1}{W} = 184019,27 \text{ s.m}^2.\text{Pa/kg}$$

### Perméabilité à la vapeur d'eau

Le coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau  $\delta$  est obtenu en multipliant  $W$  par l'épaisseur moyenne  $d$  de l'échantillon.

$$d = 0,035 \text{ m}$$

$$\delta = W \cdot d = 1,90 \cdot 10^{-7} \text{ kg/s.m.Pa}$$

### Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau

Il s'agit du facteur  $\mu$  que l'on désire obtenir. Il s'obtient en divisant  $\delta_a$  par  $\delta$ .

$$\mu = \frac{\delta}{\delta_a} = 3,73$$

$$\delta_a = \frac{0,083 \cdot p_0}{R_v \cdot T \cdot p} \cdot \left(\frac{T}{273}\right)^{1,81} = 7,094 \cdot 10^{-7} \text{ kg/s.m.Pa}$$

Avec :

- $R_v$  la constante des gaz pour la vapeur d'eau : 462 N.m/(kg.K) ;
- $T$  la température moyenne durant l'essai : 294,5 K ;
- $p_0$  la pression barométrique normale : 101325 Pa ;
- $p$  la pression barométrique moyenne durant l'essai : 99941,5 Pa.

### Épaisseur d'air équivalente pour la diffusion de vapeur d'eau

L'épaisseur d'air équivalente  $S_d$  est obtenue en multipliant  $\mu$  par l'épaisseur moyenne  $d$  de l'éprouvette.

$$S_d = \mu \cdot d = 0,13 \text{ m}$$

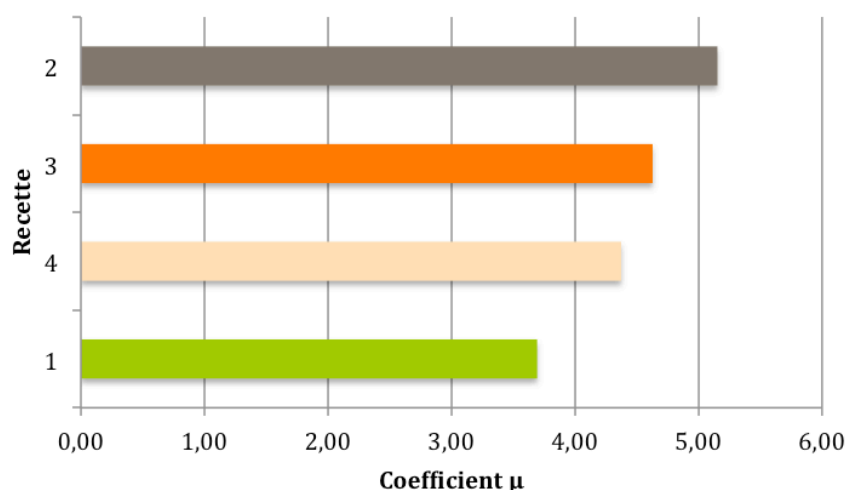
Les calculs pour les autres échantillons sont repris en détails dans les tableaux en annexe page 128. Le coefficient  $\mu$  étant celui qui permet facilement de comparer les matériaux entre eux, le **Tableau 12** présente les résultats obtenus selon les recettes.

TABLEAU 12 - COEFFICIENT DE RÉSISTANCE À LA DIFFUSION DE VAPEUR D'EAU SELON LES RECETTES

Recette	$\mu$ moyen	Ecart type
1	3,69	0,159
2	5,15	0,404
3	4,63	0,349
4	4,37	0,032

### 3.4.4 Discussion

Les résultats montrent que la recette n°1 de béton de bois est la plus perméable de toutes. On peut expliquer ce résultat sur base des masses volumiques. En effet, cette recette est la plus légère, ce qui veut dire qu'elle présente une structure plus poreuse que les autres et par conséquent plus perméable : la vapeur passe facilement au travers des pores du matériau. De plus, on remarque que le classement des coefficients  $\mu$  des recettes les unes par rapport aux autres (**Figure 58**) reste le même que celui des masses volumiques. Les résultats obtenus semblent suivre cette logique.

FIGURE 58 - CLASSEMENT DES COEFFICIENTS  $\mu$  SELON LES RECETTES

### Conclusion

Les valeurs obtenues pour le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau sont plutôt faibles, ce qui signifie que le béton de bois est un matériau très perméable, permettant de construire des murs respirants pour les habitations. La valeur moyenne mesurée de  $\mu = 4$  semble logique comparée à celles trouvées pour les blocs en béton de bois des concurrents qui sont de 7 (Fixolite) et 5,9 (Isotex) (voir **Tableau 2** p.36). En comparaison, le béton classique a un  $\mu$  de l'ordre de 100 (Energie+).

## 3.5 Coefficient de conductivité thermique

### 3.5.1 Définition de la grandeur physique

La conductivité thermique est la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur par conduction. Le coefficient  $\lambda$  [W/m.K] exprime la quantité de chaleur qui traverse en 1 seconde, 1 m<sup>2</sup> d'un matériau, épais d'1 m, lorsque la différence de température entre les deux faces du matériau est de 1 degré (K ou °C).

Il faut toutefois mentionner qu'il existe plusieurs valeurs du coefficient  $\lambda$  dans la littérature. Tout d'abord, la valeur déclarée  $\lambda_D$  est celle présente sur les fiches techniques des produits commercialisés. Elle est évaluée dans des conditions de référence (température et humidité imposées) et calculée selon une formule statistique qui garanti que 90% de la production aura une conductivité thermique inférieure ou égale à la valeur déclarée.

Ensuite, la valeur de calcul  $\lambda_U$  est celle utilisée pour les calculs énergétiques (PEB) des bâtiments. On trouve  $\lambda_{Ui}$  qui est la conductivité thermique pour les applications intérieures (ou extérieures mais protégées de toute source d'eau) et  $\lambda_{Ue}$  qui est la conductivité thermique pour les applications extérieures (humides). La valeur  $\lambda_{Ui}$  équivaut à la valeur déclarée  $\lambda_D$  alors que la valeur  $\lambda_{Ue}$  est obtenue par mesures ou par calculs (sur base d'une formule qui convertit  $\lambda_D$  selon un coefficient d'humidité) (CSTC, 2009 ; aPROpaille, 2016).

Les valeurs  $\lambda$  qui sont mesurées dans le cadre de cette étude ne sont pas les valeurs déclarées commerciales, qui auraient nécessité un grand nombre de tests et de calculs statistiques. Les valeurs obtenues permettront néanmoins d'avoir une idée précise de la conductivité thermique des blocs en béton de bois remplis et de comparer les différentes recettes entre elles et avec le béton traditionnel.

### 3.5.2 Principe de l'essai et protocole

Cet essai est réalisé suivant la norme ISO 8302.

L'essai de conductivité thermique est réalisé sur les blocs en béton de bois remplis plutôt que sur les blocs vides car il semble intéressant de connaître la conductivité des blocs tels qui seront mis en œuvre dans une paroi. De plus, l'essai aurait été difficile à réaliser sur les blocs de béton de bois vides étant donné que la machine n'est pas prévue pour mesurer des matériaux creux.

L'essai effectué est appelé *méthode de la plaque chaude gardée*. Il s'agit d'une machine constituée de deux plaques parallèles, chacune traversée par un circuit d'eau alimenté par des pompes à des températures définies (**Figure 59**). La plaque du bas est chaude (25°C) et la plaque du haut est froide (15°C). Une différence de 10°C est donc appliquée entre les deux plaques comme recommandé dans la norme. Cette différence de température correspond à la situation projetée d'un bloc soumis à un environnement extérieur de 15°C et une ambiance intérieure de 25°C. Les deux plaques sont de forme carrée de 1,25 m de côté. Les conditions hygrothermiques du local sont en moyenne de 21°C et 40% d'humidité relative.





FIGURE 59 - MACHINE AUX PLAQUES CHAUDES

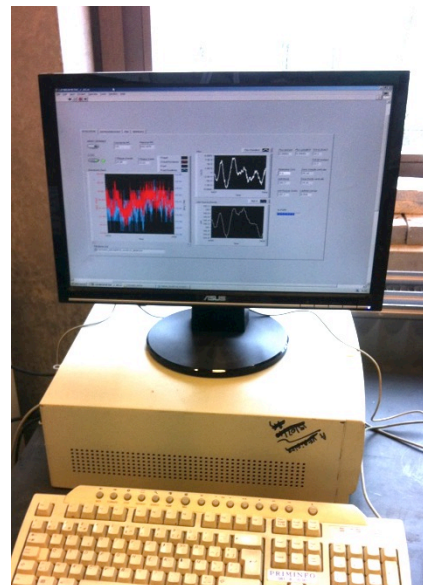


FIGURE 60 - LOGICIEL RELIÉ AUX CAPTEURS DES PLAQUES CHAUDES

Une zone carrée centrale (15 cm x 15 cm) sur les deux plaques constitue la zone de mesure dans laquelle l'échange thermique uniforme a lieu.

Des capteurs de température sont placés à plusieurs endroits sur les plaques et sont reliés à un logiciel informatique (**Figure 60**) qui enregistre les paramètres plusieurs fois par minute et calcule le  $\lambda$  sur base de l'équation de Fourier (aPROpaille, 2016) :

$$\lambda = \frac{Qd}{A(T_c - T_f)}$$

Où

- $T_c$  est la température moyenne de la plaque chaude ;
- $T_f$  est la température moyenne de la plaque froide ;
- $A$  est la surface de la zone de mesure ;
- $Q$  est le flux thermique qui traverse la zone de mesure  $A$ . Ici  $Q = P_e$  où  $P_e$  est la puissance électrique dissipée ;
- $d$  est l'épaisseur de l'échantillon.

Sur le logiciel on peut observer en temps réel les deux courbes représentant l'évolution de la température de chaque plaque. Une fois les températures stabilisées, l'essai est alors terminé et la valeur du  $\lambda$  dans le logiciel peut être lue.

La procédure utilisée est la suivante :

- Réception des blocs remplis et stockage au laboratoire ;
- Pesées des blocs toutes les 24h jusqu'à obtenir une masse constante ;
- Installation de la machine (plaques, circuits et ordinateur) dans la même pièce que les blocs ;
- Essai effectué sur un morceau d'isolant en polyuréthane à  $\lambda$  connu (déclaré par le fabricant) afin de vérifier que la machine est bien étalonnée et qu'il n'y a pas de fuites ;

- Installation d'un bloc entre les deux plaques:
  - o Soulever la plaque supérieure ;
  - o Placer et centrer le bloc sur la plaque inférieure, dans le sens usuel du transfert de chaleur (**Figure 61**) ;
  - o Nettoyer les éventuels résidus de béton de bois se trouvant sur la plaque ;
  - o Entourer le bloc avec des plaques d'isolant en polyuréthane pour éviter toutes fuites de chaleur et transferts par les surfaces latérales ;
  - o Redescendre la plaque supérieure (**Figure 62**) ;
- Encodage des températures des plaques (25°C et 15°C) ainsi que de l'épaisseur du bloc (14 cm) dans le logiciel informatique ;
- Lancement des mesures ;
- Attente de la stabilisation des températures (contrôle via les courbes sur le logiciel) ;
- Obtention de la valeur  $\lambda$ .

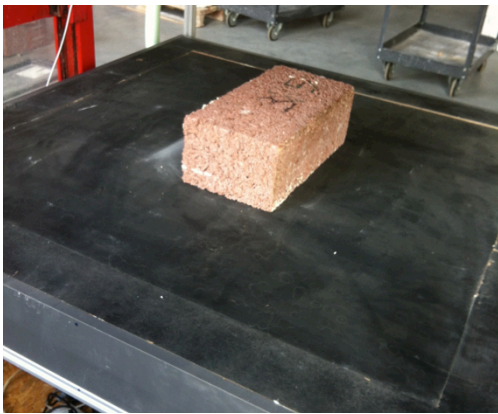


FIGURE 61 – BLOC CENTRÉ SUR LA PLAQUE



FIGURE 62 - PLAQUE SUPÉRIEURE REDESCENDUE, ESSAI EN COURS

Un autre essai a été réalisé suivant la même procédure mais cette fois avec deux blocs de la même recette placés l'un contre l'autre afin de disposer d'une quantité de matière plus importante et se rapprochant un peu plus de la réalité de mise en œuvre.

Il faut noter que la planéité des blocs n'a pas été rectifiée et qu'il existe donc une fine lame d'air entre les deux blocs (**Figure 63**). L'empilement des blocs sur chantier se faisant à sec, il a été choisi de ne pas réaliser de joint de mortier entre les blocs mais bien de laisser la lame d'air pour effectuer le test.



FIGURE 63 - ESSAI AVEC DEUX BLOCS COTE À COTE

### 3.5.3 Résultats

L'essai préliminaire réalisé sur l'isolant en polyuréthane donne un résultat de conductivité thermique de 0,0354 W/m.K ce qui correspond bien à la valeur attendue. On peut alors certifier le bon fonctionnement de la machine.

Les résultats obtenus pour le  $\lambda$  sur les blocs des différentes recettes ainsi que sur les blocs mis côte à côte sont présentés au **Tableau 13**.

TABLEAU 13 - COEFFICIENT DE CONDUCTIVITÉ THERMIQUE SELON LES RECETTES

Blocs	$\lambda$ [W/m.K]	Moyenne
1R5	0,212	0,2138
1R6	0,215	
1R7	0,215	
1R8	0,214	
1R9	0,213	
2R5	0,212	0,2144
2R6	0,216	
2R7	0,215	
2R8	0,215	
2R9	0,214	
3R5	0,216	0,2146
3R6	0,215	
3R7	0,214	
3R8	0,214	
3R9	0,214	
4R5	0,215	0,2138
4R6	0,213	
4R7	0,214	
4R8	0,214	
4R9	0,213	
1R5+1R8	0,216	0,217
2R7+2R9	0,217	
3R6+3R8	0,217	
4R5+4R9	0,217	

### 3.5.4 Discussion

Les résultats démontrent qu'il n'existe pas de différence significative entre les quatre recettes en ce qui concerne la conductivité thermique. On remarque toutefois que les deux recettes les plus légères (la 2 et la 4) ont un coefficient  $\lambda$  légèrement plus faible, signifiant qu'elles sont plus isolantes. On sait que la masse volumique est directement liée à la conductivité thermique : plus un matériau est léger pour un même volume, plus il est isolant.

On obtient alors le coefficient U du bloc de béton de bois rempli de béton traditionnel :

$$U = \frac{\lambda}{e} = \frac{0,21}{0,14} = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Les valeurs obtenues semblent logiques. Il est possible de comparer rapidement le résultat à l'aide d'un calcul fait à la main, en utilisant les valeurs de  $\lambda$  des deux matériaux connues théoriquement.

Si on pose (Prefer, Energie+):

$\lambda_{\text{béton de bois}} = 0,11 \text{ W/m.K}$

$\lambda_{\text{béton remplissage}} = 1,3 \text{ W/m.K}$

On a alors :

$$R = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,035 + 0,035}{0,11} + \frac{0,07}{1,3} = 0,69 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,69} = 1,45 \text{ W/m}^2\text{K}$$

La valeur de U mesurée au laboratoire est donc proche de la valeur de U calculée théoriquement.

Concernant les résultats pour les blocs testés deux par deux, on remarque que le coefficient  $\lambda$  est légèrement plus élevé. Cette différence peut s'expliquer par la présence de la fine lame d'air entre les deux blocs : cette fente constitue une fuite pour le transfert de chaleur, ce qui affaiblit la capacité isolante de la paroi. En réalité, les blocs qui seront mis en œuvre sur chantier ne devraient pas rencontrer ce genre de problème étant donné qu'ils seront rectifiés et remplis de béton après avoir été assemblés. Les valeurs mesurées lors de l'essai ne montrent donc pas de différence significative, mis à part ce détail.

## Conclusion

Au vu des résultats obtenus ( $\lambda = 0,21 \text{ W/m.K}$ ), le bloc de coffrage en béton de bois rempli apporte un bénéfice certain en matière d'isolation comparé à un bloc de coffrage en béton traditionnel qui, lui, possède un  $\lambda$  autour de  $1 \text{ W/m.K}$ .

Néanmoins, dans le cas d'un bâtiment chauffé, il est clair qu'un isolant supplémentaire est nécessaire si on désire atteindre les exigences de la PEB.

Pour donner une idée, si cet isolant est du polyuréthane ( $\lambda = 0,035 \text{ W/m.K}$ ), il devra être de l'ordre de 10 cm d'épaisseur pour atteindre le coefficient U réglementaire de  $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ , contre 12 cm dans la cas d'un mur avec un bloc en béton traditionnel.

## 3.6 Adhérence par traction directe

### 3.6.1 Définition de la grandeur physique

L'adhérence est la force de traction qu'il faut appliquer afin de séparer deux matériaux ayant une surface en commun (Lamure, 2006 ; Aufray, 2009).

La résistance à l'adhésion d'une éprouvette est donnée par :

$$R = \frac{P}{S} \quad [N/mm^2]$$

Où

$P$  est la charge à la rupture [N]

$S$  est la section de l'éprouvette [mm<sup>2</sup>]

On dit que la rupture est *adhésive* si l'éprouvette se rompt à l'interface entre les deux matériaux et *cohésive* si elle se rompt à l'intérieur d'un matériau.

### 3.6.2 Principe de l'essai et protocole

Cet essai est réalisé suivant la norme EN1542.

La méthode de mesure d'adhérence par traction directe consiste à extraire une éprouvette du bloc de béton de bois rempli, de manière à ce qu'elle contienne l'interface entre les deux matériaux (béton de bois – béton de remplissage – béton de bois), à coller des plaques d'acier aux deux extrémités (Figure 64) et ensuite à tirer dessus jusqu'à la rupture (Bissonnette et al., 2014).

L'essai est réalisé sur quatre éprouvettes de chaque recette, issues de deux blocs remplis de chaque recette (un sec (R) et un humide (Rh)).



FIGURE 64 - ÉPROUVETTES PRÊTES POUR L'ESSAI DE TRACTION

La procédure utilisée est la suivante :

- Découpage des éprouvettes (2 par bloc) à la scie circulaire avec jet d'eau ;
- Séchage des éprouvettes à température ambiante ;
- Collage des plaques d'acier sur les deux extrémités de chaque éprouvette ;
- Attente de masse constante ;



- Mesure des dimensions de l'échantillon à l'aide d'un pied à coulisse ;
- Encodage des mesures dans l'ordinateur ;
- Fixation de l'échantillon dans la machine : vissage des tiges dans les pastilles en acier (**Figure 65**) ;
- Application de la force de traction par la machine à une vitesse de 0,05 MPa/s ;
- Enregistrement de la charge à la rupture ;
- Observation du facies de rupture (**Figure 66**).



FIGURE 65 - MISE EN PLACE DE L'ÉPROUVETTE DANS LA MACHINE



FIGURE 66 - RUPTURE DANS L'ÉCHANTILLON

#### Remarques :

- Lors du découpage des éprouvettes dans les blocs, on remarque des défauts dans le béton de remplissage : il existe de grandes bulles d'air dans le béton (**Figure 67** et **Figure 68**). L'explication la plus plausible est que le béton de remplissage n'a pas été vibré lors de sa mise en œuvre dans les blocs creux chez Prefer. Par conséquent, le béton central n'est pas en contact uniforme avec le béton de bois sur toute la surface. En l'absence de vibration du béton, des bulles d'air sont restées coincées à l'interface avec le béton de bois, ce qui réduit alors l'adhérence entre les deux matériaux. Les valeurs de contraintes de rupture obtenues pourraient donc être faussées à cause de ce phénomène.

Les éprouvettes présentant des défauts visibles de l'extérieur sont les suivantes:

1R1-2 ; 1Rh3-1 ; 1Rh3-2 ; 2Rh1-2 ; 2Rh3-1 ; 3R1-1 ; 4R1-1.

Il est important de noter que le problème rencontré ici ne devrait pas se produire lors de la mise en œuvre réelle sur chantier. En pratique, une fois les blocs empilés, le béton est coulé dans les creux et ensuite vibré grâce à une aiguille vibrante la plus fine possible, en prenant bien soin de ne pas endommager les parois.



FIGURE 67 - DÉFAUTS DANS LE BLOC 1R1-2



FIGURE 68 – DÉFAUTS DANS LE BLOC 2Rh3-1

- Les éprouvettes provenant des blocs stockés en chambre humide n'ont pas pu y être remises une fois les plaques d'acier collées à cause du risque de rouille de l'acier. L'essai est donc réalisé sur des éprouvettes sèches mais ayant été conservées auparavant en chambre humide. Les résultats montreront alors s'il existe une différence de résistance entre les blocs conservés à 60% et ceux conservés à 95% d'humidité relative.

### 3.6.3 Résultats

Les résultats d'adhérence entre le béton de bois et le béton de remplissage selon les recettes sont présentés au **Tableau 14** (voir fiches détaillées en annexe page 130).

TABLEAU 14 - ADHÉRENCE EN TRACTION ENTRE LE BÉTON DE BOIS ET LE BÉTON DE REMPLISSAGE

Echantillon	Charge rupture [kN]	Contrainte rupture [N/mm <sup>2</sup> ]	Type A [%]	Type A/B [%]	Type B [%]
1R1-1	1,46	0,15	0	90	10
1R1-2	0,83	0,08	0	95	5
2R1-1	1,14	0,11	0	80	20
2R1-2	0,68	0,07	0	90	10
3R1-1	1,47	0,15	0	65	35
3R1-2	2,52	0,25	0	90	10
4R1-1	1,64	0,16	0	50	50
4R1-2	2,12	0,21	0	5	95
1Rh3-1	1,08	0,11	0	95	5
1Rh3-2	1,62	0,16	0	50	50
2Rh3-1	1,37	0,14	0	95	5
2Rh3-2	4,12	0,42	0	40	60
3Rh3-1	6,03	0,60	0	5	95
3Rh3-2	6,79	0,69	0	20	80
4Rh3-1	4,28	0,43	0	20	80
4Rh3-2	5,21	0,52	0	20	80



Le faciès de rupture est observé et relevé en pourcentage selon l'endroit où la rupture a lieu (**Figure 69**) :

Type A = dans le béton de remplissage

Type A/B = à l'interface entre les deux matériaux

Type B = dans le béton de bois

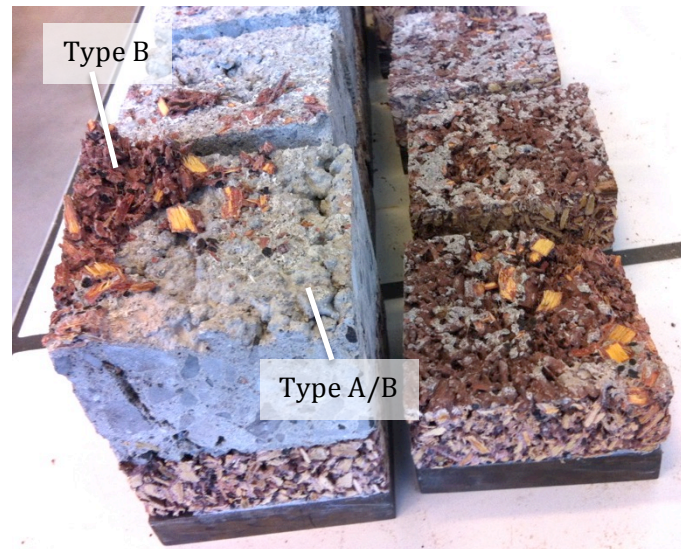


FIGURE 69 - FACIÈS DE RUPTURE

### 3.6.4 Discussion

L'échelle de gris dans le **Tableau 14** fait ressortir de grandes disparités dans les valeurs des contraintes à la rupture. Les contraintes restent cependant très faibles ce qui signifie que l'adhérence entre le béton de bois et le béton de remplissage est faible. De plus, une précédente étude a démontré que l'adhérence entre le béton de bois et une structure en bois (chevrons) est inexistante. La cohésion interne du béton de bois mesurée lors de cette même recherche était de 0,6 MPa (Grimont, 2008). Toutes ces valeurs renforcent la constatation de la faible résistance en traction du béton de bois.

On remarque tout de même une augmentation de l'adhérence dans le cas des blocs ayant été stockés en chambre humide. Pour une même recette, les valeurs peuvent passer du simple au double.

Du point de vue des différentes recettes, il semble que les recettes 3 et 4 soient légèrement plus adhérentes que les deux autres.

En ce qui concerne le faciès de rupture, on remarque principalement des ruptures adhésives (Type A/B) à l'interface des deux matériaux (**Figure 70**). Par contre, pour les blocs humides, on observe une plus forte tendance à une rupture cohésive dans le béton de bois (type A) (**Figure 71**). Le béton de bois étant un matériau plus poreux que le béton classique, il absorbe une plus grande quantité d'eau et la structure des copeaux de bois se voit alors légèrement fragilisée (rupture dans le béton de bois et non à l'interface).



FIGURE 70 - RUPTURE DANS LES BLOCS 60% HR

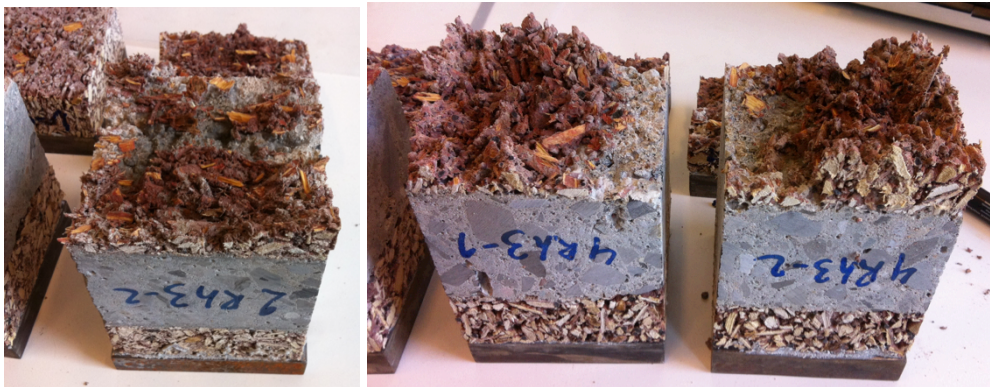


FIGURE 71 - RUPTURE DANS LES BLOCS 95% HR

Il faut également rappeler le problème du contact non uniforme des deux matériaux à cause de l'oubli de vibration. Ce phénomène joue aussi un rôle sur les valeurs faibles obtenues. En effet, les échantillons ayant des défauts visibles avant l'essai (1R1-2 ; 1Rh3-1 ; 1Rh3-2 ; 2Rh1-2 ; 2Rh3-1 ; 3R1-1 ; 4R1-1) présentent les valeurs d'adhérence les plus faibles de toutes.

De plus, il était trop difficile d'estimer le pourcentage réel de surface en contact, la contrainte a donc été calculée en prenant l'hypothèse que les surfaces étaient totalement en contact (dimensions extérieures de l'échantillon) alors que ce n'était pas toujours le cas. En réalité on peut donc espérer obtenir des contraintes à la rupture légèrement plus élevées.

## Conclusion

Au vu de ces différentes approximations, il est difficile de tirer une conclusion précise en ce qui concerne cet essai.

Néanmoins, on peut retenir que l'adhérence entre le béton de bois et le béton classique (en moyenne **0,25 MPa**) est plutôt faible mais que cela ne devrait pas poser de problème en pratique étant donné que le mur de bloc n'est pas sensé être sollicité en traction.

## 3.7 Résistance à la compression

### 3.7.1 Définition de la grandeur physique

La résistance à la compression  $f_c$  s'exprime comme la charge maximale  $F$  qu'on peut appliquer sur une surface  $A_c$  d'un matériau et est donnée par la formule suivante :

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad [N/mm^2]$$

### 3.7.2 Principe de l'essai et protocole

Cet essai est réalisé suivant les normes EN 772-1 et NBN EN 12390-3.

La particularité de l'essai réalisé ici est que la charge est appliquée sur des blocs entiers et non sur des éprouvettes. En effet, la valeur de la résistance en compression qu'on désire connaître est celle du bloc de coffrage en béton de bois tel qu'il sera utilisé dans un mur, c'est-à-dire rempli de béton traditionnel. L'essai de compression est effectué sur quatre blocs remplis de chaque recette : trois ayant été stockés à 60% HR et un à 95% HR.

Ces blocs présentent des surfaces irrégulières, c'est pourquoi il est nécessaire de passer par une phase de préparation avant de les tester. Pour ce faire, du plâtre est appliqué sur les deux extrémités de chaque bloc afin d'obtenir des surfaces planes et parfaitement parallèles. Il faut ensuite rectifier le plâtre si nécessaire et vérifier le parallélisme des faces à l'aide d'un niveau (Figure 72).



FIGURE 72 - VÉRIFICATION DE PLANÉITÉ DU BLOC



FIGURE 73 - PRESSE DE COMPRESSION



FIGURE 74 - BLOC CENTRÉ DANS LA PRESSE

Une fois les blocs préparés, l'essai consiste, à l'aide d'une presse (Figure 73), à leur appliquer une charge uniformément répartie jusqu'à la rupture. La charge maximale est alors relevée et la contrainte calculée.

La procédure utilisée est la suivante :

- Nettoyage des surfaces de la machine ;
- Placement du bloc au centre de la plaque d'essai (**Figure 74**) ;
- Application de la charge de compression ;
- Relevé de la charge maximale atteinte ;
- Calcul de la contrainte de rupture ;
- Observation du faciès de rupture.

Remarques :

- Pour calculer la contrainte de rupture, il faut connaître les dimensions de chaque bloc. Il n'a pas été nécessaire de mesurer les blocs lors de cet essai puisqu'ils ont déjà été mesurés lors de l'essai de masse volumique.
- En ce qui concerne les blocs stockés en chambre humide (95% HR), ils ont été recouverts de plâtre dans une atmosphère à 50% HR et y sont restés jusqu'au jour de l'essai. En effet, il était impossible de remettre les blocs en chambre humide car le plâtre se serait alors dissous.

### 3.7.3 Résultats

Les valeurs de résistance en compression des blocs en béton de bois remplis de béton traditionnel sont reprises au **Tableau 15** selon les quatre recettes.

TABEAU 15 - RÉSISTANCE EN COMPRESSION DES BLOCS REMPLIS

Blocs	Surface [mm <sup>2</sup> ]	Charge max [kN]	Contrainte [N/mm <sup>2</sup> ]	Moyenne [N/mm <sup>2</sup> ]	Ecart type [N/mm <sup>2</sup> ]
1R2	53406	360	6,74	7,59	0,66
1R5	52882	405	7,66		
1R6	54040	452	8,36		
2R2	54210	335	6,18	7,58	1,02
2R5	53019	456	8,60		
2R6	53430	425	7,95		
3R2	53682	343	6,39	8,30	1,39
3R5	54210	482	8,89		
3R6	53704	517	9,63		
4R2	54349	480	8,83	8,34	0,78
4R5	54349	393	7,23		
4R6	54234	485	8,94		
1Rh4	52768	380	7,20		
2Rh4	53567	225	4,20		
3Rh4	54096	508	9,39		
4Rh4	53430	539	10,09		



De manière générale, lors de l'application de la charge, on remarque sur le cadran de mesure une stabilisation de la charge entre 100 kN et 200 kN, avant de continuer rapidement jusqu'à la charge maximale. Ce phénomène pourrait être lié au fait que les deux matériaux (béton de bois et béton de remplissage) ne sont pas sollicités au même moment. En effet, si on prend l'hypothèse que le béton de bois est sollicité en premier lieu, l'instant où la charge se stabilise pourrait correspondre au tassement des copeaux de bois dans la matière. Ensuite, la charge augmente plus rapidement avant d'arriver à la rupture, ce qui correspond probablement à la mise en charge du béton de remplissage.

Pendant l'essai, un crépitement du béton était audible mais il n'y a pas eu de détachement de matière lors de la rupture, uniquement une fissure légèrement visible dans la partie inférieure du béton de bois (**Figure 75**).



FIGURE 75 - FISSURE DE RUPTURE DANS UN BLOC

Néanmoins, un des blocs (2R2) a été laissé plus longtemps dans la presse, au delà de la charge maximale, afin de pouvoir observer le faciès de rupture intérieur du bloc (**Figure 76**). Le béton de bois se détache par morceaux et on peut alors observer que le béton de remplissage est également endommagé et qu'il y a même rupture dans certains granulats (**Figure 77**).



FIGURE 76 - FACIÈS DE RUPTURE DU BLOC



FIGURE 77 - RUPTURE DANS UN GRANULAT

### 3.7.4 Discussion

Les valeurs de résistance en compression obtenues lors de cet essai sont de l'ordre de 8 MPa pour les blocs en béton de bois remplis, stockés à 60% HR. Cette résistance est un point positif puisqu'elle équivaut à celle d'un bloc de béton de construction classique. Si on compare avec les autres blocs du **Tableau 3** (page 37), on peut noter que cette résistance est meilleure que celle d'un bloc en béton cellulaire (2 à 5 MPa) mais moins bonne que celle d'un bloc de coffrage en béton classique (18 à 24 MPa).

En ce qui concerne les blocs humides (Rh), on remarque une grande disparité dans les valeurs obtenues. Certains blocs offrent une résistance plus élevée alors que d'autres sont moins performants que les blocs secs (R). Il semble donc préférable de ne pas laisser les blocs exposés à la pluie ou à une trop grande humidité sans protection. En effet, ayant été confrontés à l'eau pendant plusieurs mois, ces blocs ont un comportement moins prévisible que les autres. On pourrait expliquer cela, en partie, à cause du taux d'humidité qui n'est pas tout à fait égal selon la position dans la chambre humide : la répartition des blocs n'a pas été optimale et certains se sont retrouvés plus exposés que d'autres à la projection d'eau dans la chambre.

Des essais réalisés auparavant par Prefer sur quatre cubes de chaque recette de béton de bois donnaient les résultats moyens présentés au **Tableau 16**. De plus, lors d'une précédente étude, la valeur de résistance en compression du béton de bois mesurée était en moyenne de 1,6 MPa (Grimont, 2008). Il s'agit bien ici de la résistance en compression du matériau béton de bois seul. On remarque de suite que l'ajout du béton de remplissage, dans le cas des essais réalisés pour la présente recherche, offre un bénéfice de résistance considérable. Utilisé seul, le béton de bois n'est pas capable de faire office de mur porteur.

TABLEAU 16 - RÉSISTANCE EN COMPRESSION DU BÉTON DE BOIS (PREFER)

Recette	Résistance en compression [MPa]
1	1,1
2	1,4
3	1,5
4	1,3

### Conclusion

Les résistances obtenues pour les blocs de coffrage en béton de bois remplis (**8 MPa** en moyenne), sont donc à la hauteur de ce qui était espéré puisque les constructions visées utilisant ce matériau sont des bâtiments s'élevant à deux ou trois étages maximum et nécessitant une résistance minimale de 6 MPa.

## 3.8 Résistance à la flexion des parois

### 3.8.1 Définition de la grandeur physique

Lors d'un essai de flexion à trois points, la résistance en flexion d'un élément est la contrainte maximale qu'on peut lui appliquer en son milieu lorsqu'il est soutenu par deux appuis à ses extrémités.

La détermination de cette valeur permettra de savoir si les parois du bloc de coffrage en béton de bois sont assez résistantes pour supporter la pression exercée par le béton de remplissage coulé à l'intérieur.



FIGURE 78 - ESSAI DE FLEXION À TROIS POINTS

### 3.8.2 Principe de l'essai et protocole

Cet essai est réalisé suivant la norme EN 15498:2008.

L'essai de flexion à trois points consiste à appliquer une charge, avec un rouleau supérieur, sur la paroi d'un bloc en béton de bois reposant sur deux rouleaux d'appui inférieurs (**Figure 78**). Contrairement à la norme dont le diamètre préconisé est de 20 mm, les rouleaux qui ont été utilisés au laboratoire lors de cet essai ont un diamètre de 30 mm. Cette différence ne devrait, en principe, pas amener des changements dans les résultats.

Comme précisé dans la norme, six éprouvettes de chaque recette de béton de bois ont été testées. Pour ce faire, les éprouvettes ont d'abord été découpées dans les blocs en béton de bois : deux éprouvettes par bloc ont été extraites. Le fond du bloc a également été découpé pour plus de facilité de mise en œuvre dans la machine.

Ensuite, les rouleaux d'appuis sont positionnés avec un entraxe de 18 cm, de telle sorte qu'on puisse placer une éprouvette avec les entretoises centrées sur les rouleaux.

La procédure utilisée est la suivante :

- Mesure des dimensions de l'éprouvette : longueur et épaisseur de la paroi à tester ;
- Encodage des mesures dans le logiciel ;
- Placement de l'éprouvette centrée entre les rouleaux d'appui dans la machine ;
- Application de la charge par la machine par pas de 0,05 N/mm<sup>2</sup> par seconde ;
- Enregistrement de la charge maximale ;
- Calcul de la contrainte de flexion.



### 3.8.3 Résultats

Afin de déterminer si le bloc est assez résistant pour soutenir le béton de remplissage, il faut tout d'abord calculer la valeur minimale requise de la résistance à la flexion des parois  $f_{f,min}$  à partir de la pression maximale de remplissage du béton.

Selon l'annexe A de la norme EN 15498:2008, la pression maximale  $p_{max}$  appliquée par béton lors du remplissage d'une épaisseur de 70 mm et d'une hauteur de 2 m en 20 min est de 0,012 N/mm<sup>2</sup>. On peut alors calculer la valeur de résistance minimale comme suit :

$$f_{f,min} = \frac{p_{max} \times a^2}{4 \times t_s^2} = \frac{0,012 \times 145^2}{4 \times 35^2} = 0,051 \text{ N/mm}^2$$

Où

$a$  est la longueur du vide [mm] ;

$t_s$  est l'épaisseur de la paroi [mm].

Ensuite, après avoir enregistré la charge à la rupture, le logiciel relié à la machine d'essai calcule la résistance à la flexion des parois. Les résultats obtenus pour tous les échantillons sont présentés au **Tableau 17**. Le faciès de rupture observé pour tous les échantillons est une fissure centrale à l'endroit de l'application de la charge (**Figure 79**). La fissure de rupture a lieu dans les vides, entre les éléments et non à travers les copeaux de bois.

TABEAU 17 - RÉSISTANCE EN FLEXION DES PAROIS SELON LES RECETTES DE BÉTON DE BOIS

Echantillon	Charge max [N]	Contrainte flexion rupture [MPa]	Moyenne [MPa]	Ecart type [MPa]
1V21	483	0,60	0,71	0,1
1V22	724	0,90		
1V31	519	0,68		
1V32	588	0,74		
1V41	593	0,75		
1V42	479	0,60		
2V21	989	1,23	1,10	0,2
2V22	1091	1,36		
2V31	768	0,97		
2V32	812	1,01		
2V41	877	1,09		
2V42	765	0,94		
3V21	1002	1,23	1,41	0,1
3V22	1054	1,35		
3V31	1214	1,49		
3V32	1198	1,47		
3V41	1250	1,56		
3V42	1084	1,36		
4V21	774	0,94	1,05	0,1
4V22	780	0,94		
4V31	951	1,15		
4V32	939	1,12		
4V41	929	1,16		
4V42	806	1,01		



FIGURE 79 - FISSURE DE RUPTURE DANS L'ÉPROUVETTE 3V32

Les résultats permettent aussi de visualiser les courbes de la charge en fonction du déplacement lors de l'essai. La **Figure 80** montre l'évolution pour les échantillons de la recette n°3. Les fiches de résultats pour chaque recette sont reprises en annexe page 132.

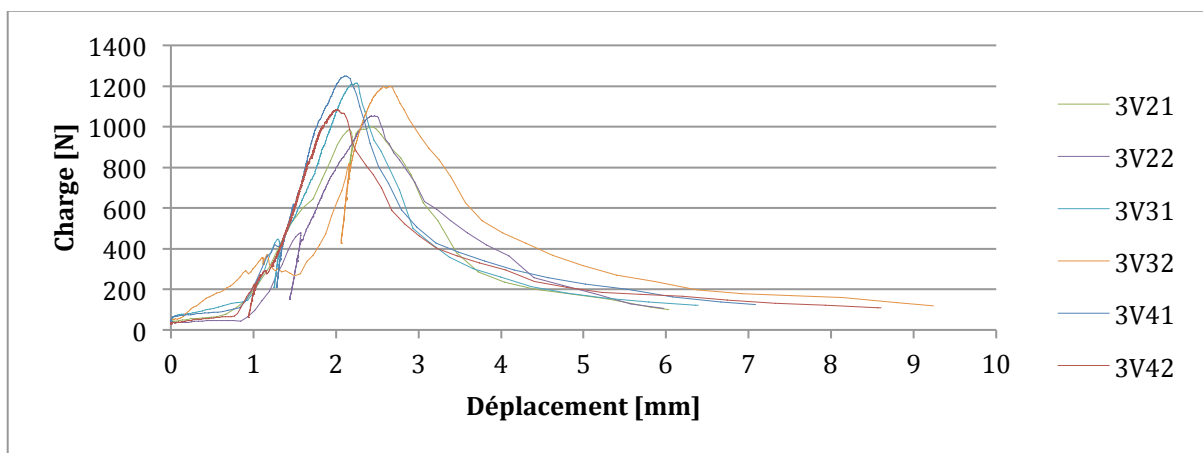


FIGURE 80 - COURBES CHARGE-DÉPLACEMENT POUR LA RECETTE 3

### 3.8.4 Discussion

Les résistances en flexion des parois obtenues lors des essais (de l'ordre de 1 MPa) sont bien supérieures à la valeur de résistance minimale requise (0,051 MPa) pour reprendre les efforts du béton coulé à l'intérieur du bloc. Les quatre recettes de blocs de coffrage en béton de bois sont donc assez résistantes en flexion. Les valeurs selon les recettes sont toutefois assez dispersées : on remarque par exemple que la recette 3 est deux fois plus résistante que la recette 1.

Ces résultats indiquent qu'il serait possible de couler une plus grande quantité de béton à l'intérieur des blocs avec une épaisseur de paroi plus faible si on le désirait.

En ce qui concerne les courbes charge-déplacement, on observe systématiquement une hystérésis lors de l'application de la charge dans le domaine élastique du béton de bois (**Figure 80**). Il s'agit d'une diminution de la charge puis d'une reprise suivant exactement la même

courbe qu'avant. Ce phénomène est peut-être dû à la mise en place ou au tassement des copeaux entre eux lors de la mise en charge.

Un autre rapport d'essai commandé par Prefer, datant de 2009, indique des résultats de résistance en flexion de 1,44 MPa et 1,37 MPa (GeMMe, 2009). Les valeurs obtenues ici semblent donc correspondre.

Une comparaison peut également être faite avec les résistances en flexion de parois de blocs de coffrage en béton de granulats courants. Selon les fabricants, on trouve des valeurs de 1,2 MPa à 3,1 MPa (Celtys, 2013 ; Baehrel, 2013 ; Heinrich&Bock, 2013).

## Conclusion

Avec des valeurs variant autour de **1 MPa**, les blocs de coffrage en béton de bois ont une résistance suffisante pour retenir le béton de remplissage. Ils sont moins résistants en flexion que les blocs de coffrage en béton traditionnel mais restent tout de même concurrentiels.

### 3.9 Tableau récapitulatif des expérimentations

Afin de conclure ce chapitre concernant les expérimentations réalisées au laboratoire, le **Tableau 18** présente une synthèse des résultats obtenus pour les blocs ayant été stockés à 60% d'humidité relative. Les résultats pour les blocs stockés en chambre humide ne sont pas repris ici car il est difficile d'en tirer une moyenne cohérente.

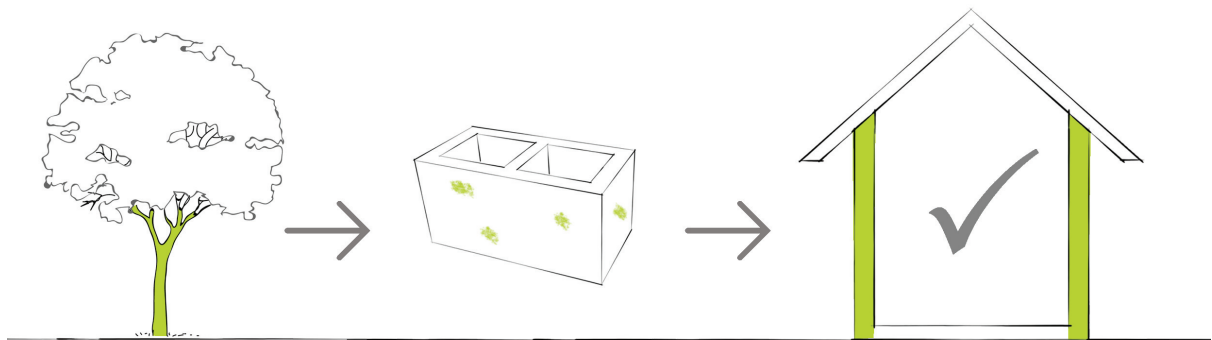
Les quatre recettes de béton de bois font leurs preuves et il n'existe pas une recette idéale. Néanmoins, la recette n°1 semble un peu moins résistante que les autres, en raison de sa masse volumique plus faible. Afin de fixer une recette définitive, il faudrait également prendre en compte un grand nombre de paramètres non étudiés ici, par exemple, la facilité de mise en œuvre lors de la fabrication et sur le chantier, le comportement du béton de bois à l'état frais, la durabilité, les aspects économiques et commerciaux, le coût du produit, etc.

Les valeurs mesurées sont plutôt encourageantes pour l'utilisation d'un bloc de coffrage en béton de bois pour une paroi de bâtiment d'une hauteur moyenne.

TABLEAU 18 - SYNTHÈSE DES VALEURS OBTENUES SUR LES BLOCS EN BÉTON DE BOIS

Recette	Masse volumique apparente [kg/m <sup>3</sup> ]	Perméabilité à la vapeur d'eau $\mu$	Conductivité thermique $\lambda$ [W/m.K]	Adhérence en traction [MPa]	Compression [MPa]	Flexion des parois [MPa]
	Bloc vide	Bloc vide	Bloc rempli	Bloc rempli	Bloc rempli	Bloc vide
<b>1</b>	731	3,69	0,2138	0,12	7,59	0,71
<b>2</b>	846	5,15	0,2144	0,09	7,58	1,10
<b>3</b>	827	4,63	0,2146	0,20	8,30	1,41
<b>4</b>	793	4,37	0,2138	0,19	8,34	1,05
<b>Moyenne</b>	<b>799</b>	<b>4,5</b>	<b>0,21</b>	<b>0,15</b>	<b>7,95</b>	<b>1,07</b>

## CHAPITRE 4 – SIMULATIONS



## 4. Simulations

Dans ce chapitre, une approche plus théorique, basée sur la simulation, est proposée pour étudier le bloc de coffrage en béton de bois. D'une part on va pouvoir caractériser le comportement hygrothermique du béton de bois et d'autre part, évaluer les impacts environnementaux de ce matériau.

L'avantage de la simulation utilisant des logiciels informatiques est la facilité et la rapidité de faire varier certains paramètres, contrairement à l'expérimentation. Dans cette optique, ce chapitre propose, par exemple, une alternative de béton de remplissage, le béton mousse qu'il n'a pas été possible de tester lors des expérimentations.

### 4.1 Simulation hygrothermique (WUFI®)

#### 4.1.1 Présentation du logiciel

Le logiciel WUFI Pro® 5.1 (Figure 81), développé par le Fraunhofer Institute for Building Physics, permet de réaliser des simulations dynamiques du comportement hygrothermique d'une paroi en une dimension. On peut obtenir les profils de température et d'humidité relative au travers de la paroi ainsi que la teneur en eau des différents matériaux. Le logiciel permet donc d'étudier les interactions entre les phénomènes thermiques et hydriques dans une paroi de bâtiment (aPROpaille, 2016 ; Branders, 2011 ; Biot, 2015).

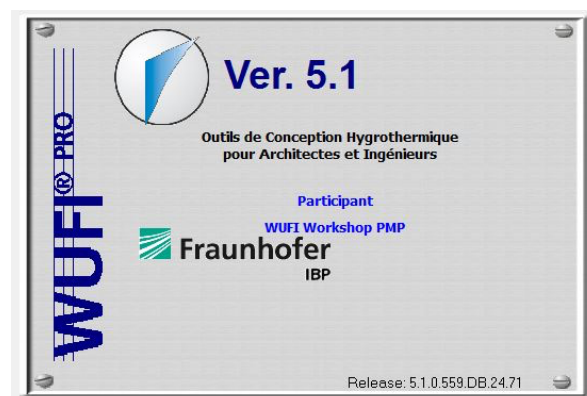


FIGURE 81 - VERSION DU LOGICIEL WUFI PRO® UTILISÉE

Il s'agit d'un logiciel dont le procédé de simulation est en une dimension. Il faut donc noter que de nombreuses approximations et hypothèses sont faites dans la méthode de calcul par rapport aux aspects réels. La simulation donne uniquement une idée théorique du comportement de la paroi, sans tenir compte des réalités de mise en œuvre rencontrées sur chantier (Biot, 2015).

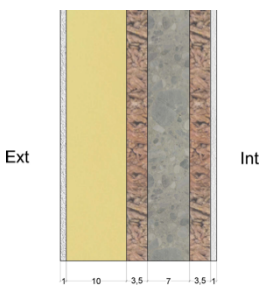




### 4.1.2 Cas étudiés : méthodologie et hypothèses

La simulation consiste à étudier plusieurs cas de parois mettant en œuvre le bloc de coffrage en béton de bois en faisant varier l'isolant qui l'accompagne et son béton de remplissage.

Cette simulation va permettre d'analyser le comportement hygrothermique du béton de bois dans une situation d'utilisation approchant la réalité. Le logiciel va également permettre de comparer l'influence de l'isolant et du béton de remplissage utilisés dans la paroi. Le **Tableau 19** présente les différents cas étudiés (compositions de l'extérieur vers l'intérieur).

Concrètement, les trois premiers cas sont basés sur un principe simple de paroi: le crépi sur isolant côté extérieur, suivi du bloc en béton de bois avec son béton de remplissage et un plafonnage classique côté intérieur.

TABLEAU 19 - DESCRIPTIF DES PAROIS ÉTUDIÉES DANS WUFI©

Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5
 <p><b>Composition</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Crépi 1 cm</li> <li>- Isolant PUR 10 cm</li> <li>- Béton de bois 3,5 cm</li> <li>- Béton classique de remplissage 7 cm</li> <li>- Béton de bois 3,5 cm</li> <li>- Plafonnage 1 cm</li> </ul>	 <p><b>Composition</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Crépi 1 cm</li> <li>- Panneau en fibres de bois 1,5 cm</li> <li>- Isolant cellulose 14 cm</li> <li>- Béton de bois 3,5 cm</li> <li>- Béton classique de remplissage 7 cm</li> <li>- Béton de bois 3,5 cm</li> <li>- Plafonnage 1 cm</li> </ul>	 <p><b>Composition</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Crépi 1 cm</li> <li>- Isolant PUR 7 cm</li> <li>- Béton de bois 3,5 cm</li> <li>- Béton mousse de remplissage 7 cm</li> <li>- Béton de bois 3,5 cm</li> <li>- Plafonnage 1 cm</li> </ul>	 <p><b>Composition</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Béton de bois 3,5 cm</li> <li>- Béton classique de remplissage 7 cm</li> <li>- Béton de bois 3,5 cm</li> </ul>	 <p><b>Composition</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Crépi 1 cm</li> <li>- Isolant PUR 12 cm</li> <li>- Bloc de béton 3,5 cm</li> <li>- Béton classique de remplissage 7 cm</li> <li>- Bloc de béton 3,5 cm</li> <li>- Plafonnage 1 cm</li> </ul>

Dans le cas 1, l'isolant utilisé est un panneau de polyuréthane, très couramment employé pour cette technique de crépi sur isolant, mais plutôt non optimal d'un point de vue environnemental. Le béton de remplissage est un béton traditionnel.

Dans le cas 2, c'est la nature de l'isolant qui change : il s'agit ici d'un panneau de fibres de cellulose, en plus grande épaisseur pour atteindre la même performance isolante que le polyuréthane. Un panneau rigide en fibres de bois est ajouté entre la cellulose et le crépi afin de soutenir l'isolant et de servir de base pour la pose du crépi.



Dans le cas 3, c'est la nature du béton de remplissage qui change : il s'agit ici d'un béton mousse. Ce béton présente des propriétés assez similaires au béton cellulaire mais avec la particularité qu'il peut être pompé et coulé sur place. Il est plus léger et plus isolant que le béton traditionnel et nécessite donc une épaisseur d'isolant moindre.

Le cas 4 est un peu plus particulier puisqu'il s'agit du bloc en béton de bois rempli, utilisé seul, ni revêtu ni isolé. En principe, ce cas ne devrait pas se présenter en réalité (ou alors pour des locaux non habités) mais permettra ici d'avoir une idée du comportement du bloc directement soumis à un environnement extérieur.

Le cas 5 est pris comme référence pour la comparaison, il s'agit d'une paroi qui utilise un bloc de coffrage en béton classique, rempli et un isolant en polyuréthane.

Les cas 1, 2, 3 et 5 ont été réalisés afin d'obtenir la même valeur du coefficient U de la paroi ( $U = 0,24 \text{ W/m}^2\text{.K}$ ) dans le but de comparer des cas équivalents d'un point de vue de l'isolation

Dans le logiciel, seule la base de données « Fraunhofer-IBP – Holzkirchen ; Allemagne » a été utilisée pour les matériaux. Il s'agit de la base de données la plus fiable dans WUFI© car elle provient directement du développeur du logiciel.

Le **Tableau 20** reprend les matériaux tels qu'ils ont été encodés dans le logiciel (détails en annexe page 136). La principale action de l'encodage a été le choix des matériaux dans la base de données pour qu'ils se rapprochent le plus possible des matériaux désirés en réalité.

Seules les caractéristiques du béton de bois, sujet de l'étude, ont été modifiées par rapport à la base de données. En effet, il n'existe pas encore de matériau de référence pour le béton de bois. Il a alors été choisi de se baser sur le matériau « Bloc béton d'argile expansé », dont les caractéristiques semblent se rapprocher au mieux du bloc de béton de bois et de modifier les propriétés dont on connaît la valeur (en couleur dans le tableau) grâce aux essais réalisés au laboratoire.

TABLEAU 20 - CHOIX DES MATÉRIAUX DANS WUFI©

Nom de la couche	Matériau dans la base de données	Densité [kg/m³]	Porosité [m³/m³]	Conductivité thermique [W/mK]	Résistance à la diffusion [-]
Crépi	Enduit extérieur minéral	1900	0,24	0,8	25
Isolant PUR	PU (Cond. Th. 0,03W/mK)	40	0,95	0,03	50
Béton de bois	Bloc béton d'argile expansé	800	0,67	0,1	4
Béton classique de remplissage	Béton E/C=0,5	2300	0,18	1,6	180
Plafonnage	Plafonnage intérieur (Plâtre)	850	0,65	0,2	8,3
Panneau en fibres de bois	Panneau en fibres de bois	300	0,8	0,05	12,5
Isolant cellulose	Fibre de cellulose	50	0,95	0,034	1,8
Béton mousse de remplissage	Béton cellulaire (Masse vol. 500 kg/m³)	500	0,77	0,12	8

Quelques précisions sont à noter :

- Le crépi choisi est très performant en ce qui concerne son étanchéité : son coefficient d'absorption d'eau est de  $0,00167 \text{ kg/m}^2\text{s}^{0.5}$  ce qui est quasi nul. On verra par la suite une variante pour cette valeur.
- Pour tous les matériaux, excepté l'isolant PUR, une courbe de sorption est disponible grâce à la base de données. L'isolant PUR est alors considéré comme sec au point de départ de la simulation.

Une fois les matériaux renseignés, les autres données peuvent être encodées. Les paramètres et réglages qui ont été laissés par défaut dans le logiciel ne seront pas précisés ici (voir captures d'écran en annexe page 139).

Des moniteurs sont placés à chaque début et chaque fin de couche afin d'obtenir des données plus précises à l'intérieur de la paroi.

L'orientation choisie est le Sud-Ouest car elle est la plus défavorable en ce qui concerne la pluie, le vent (pluies battantes) et l'exposition au soleil.

Les coefficients surfaciques d'absorptivité (0,4) et d'émissivité (0,9) sont rentrés manuellement pour correspondre à un enduit de crépi blanc, surface externe exposée au rayonnement solaire. Pour le départ de la simulation, les conditions initiales d'humidité et de température sont de 80% (chantier terminé humide) et 20°C. Chaque matériau se voit alors attribuer automatiquement par le logiciel une teneur en eau basée sur cette humidité et leur courbe de sorption (Biot, 2015).

Le calcul de simulation se réalise sur trois ans, soit du 1<sup>er</sup> octobre 2016 au 1<sup>er</sup> octobre 2019 ce qui permet d'avoir une période suffisamment longue pour obtenir des valeurs stables.

Maintenant que tous ces paramètres sont définis, il reste à choisir le fichier climatique qui sera utilisé pour simuler le climat durant ces trois années.

Dans la bibliothèque des fichiers climatiques de WUFI®, il n'existe que celui de Bruxelles (station de Uccle) disponible pour la Belgique. Il a alors été choisi de générer un fichier climatique propre à Liège grâce au logiciel Meteonorm qui calcule le fichier sur base des données climatiques des stations les plus proches (cette partie ne sera pas détaillée ici par soucis d'efficacité, voir tableau en annexe page 143).

Dans WUFI®, on obtient alors l'analyse du climat extérieur (**Figure 82**) et les données pour le climat intérieur (**Figure 83**) avec une humidité relative normale (variant de 30 à 60%) selon la norme EN 15026.

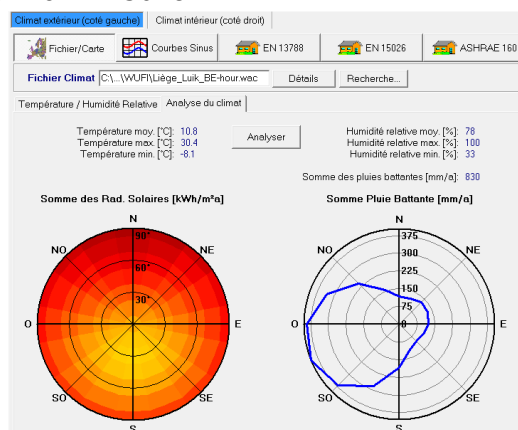


FIGURE 82 - ANALYSE DU CLIMAT EXTÉRIEUR DE LIÈGE

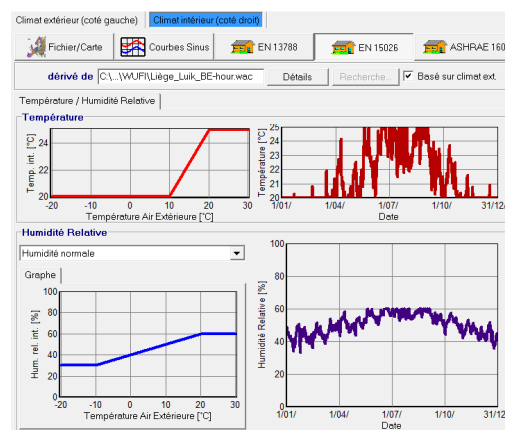


FIGURE 83 - ANALYSE DU CLIMAT INTÉRIEUR

Une fois toutes ces données encodées, on peut lancer le calcul de simulation (voir 4.1.3).

En plus de des cinq cas décrits au **Tableau 19**, trois variantes du cas 1 ont aussi été lancées pour voir l'influence d'autres aspects. Ces variantes sont à chaque fois similaires au cas 1 à l'exception du paramètre précisé :

- Variante 1 : Climat intérieur humide: charge en humidité élevée (variant de 40 à 70%).
- Variante 2 : Crépi moins performant : coefficient d'absorption d'eau =  $0,5 \text{ kg/m}^2\text{s}^{0,5}$ .
- Variante 3 : Orientation Nord (pas de soleil).

### 4.1.3 Résultats

Lorsqu'on lance les calculs, le logiciel WUFI Pro© propose une animation permettant de visualiser en instantané les courbes de température, d'humidité relative et de teneur en eau à travers la paroi. Le résultat obtenu pour le cas 1 est présenté à la **Figure 84**. Le premier graphique, en rouge, est le profil de température : la courbe correspond aux valeurs pour le 1/10/2019 et l'aplats rouge plus clair représente l'étendue des valeurs prises par la courbe durant toute la période de simulation. Le graphique du bas est basé sur le même principe mais cette fois-ci pour l'humidité relative, en vert, et la teneur en eau dans la paroi, en bleu.

Lieu: Liège\_Luik\_BE-hour.wac;

WUFI®

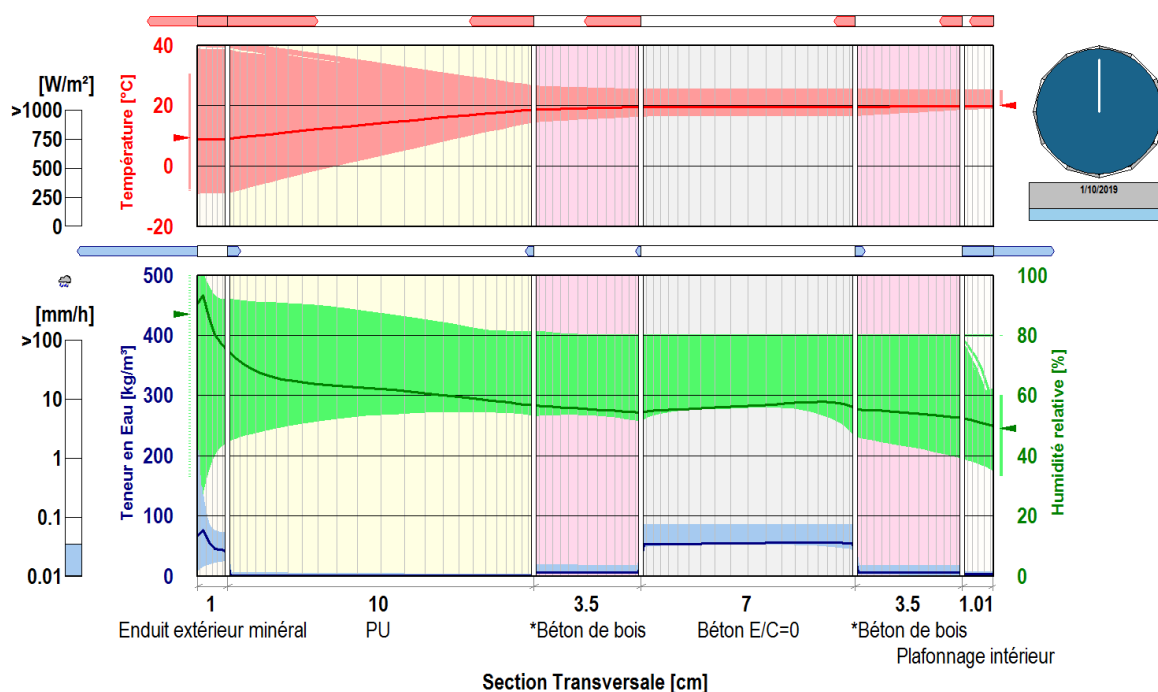


FIGURE 84 - ANIMATION POUR LE CAS 1

Ensuite, on peut visualiser la courbe permettant d'apprécier l'évolution de la teneur en eau totale de la paroi au cours du temps. Sur cette courbe, on voit la tendance à l'assèchement ou à l'accumulation d'eau selon les saisons, ainsi que les amplitudes de variation de la teneur en eau. Il faut noter que l'échelle du graphique n'est pas la même selon les résultats des différents cas. La comparaison n'est donc pas évidente au premier coup d'œil.

Les résultats pour le cas 1 et le cas 3 sont présentés ci-dessous (**Figure 85** et **Figure 86**), les autres sont placés en annexe page 144. Les courbes de teneur en eau au fil du temps sont également disponibles pour chaque matériau constituant la paroi. Le plus intéressant ici est de se concentrer sur ce qui se passe à l'intérieur du béton de bois. Il y a deux graphiques de teneur en eau disponibles pour le béton de bois : pour la partie gauche du bloc (en contact avec l'isolant : **Figure 87**) et la partie droite du bloc (en contact avec le plafonnage : **Figure 88**).

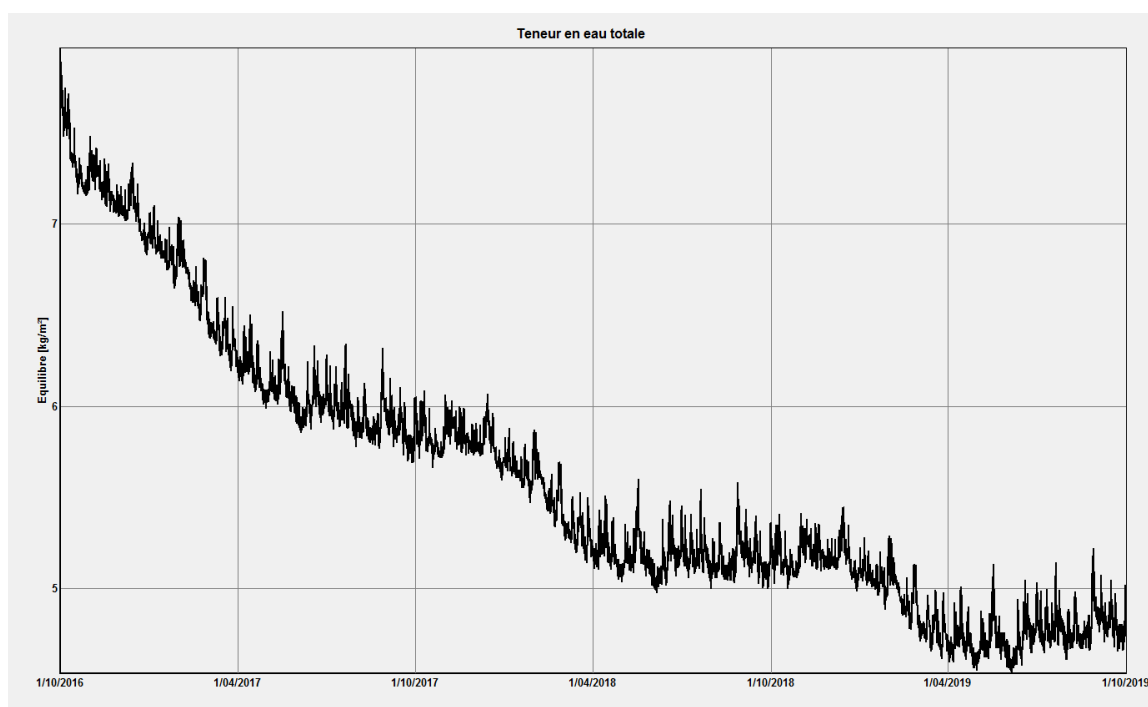


FIGURE 85 – CAS 1 : TENEUR EN EAU TOTALE POUR LA PAROI

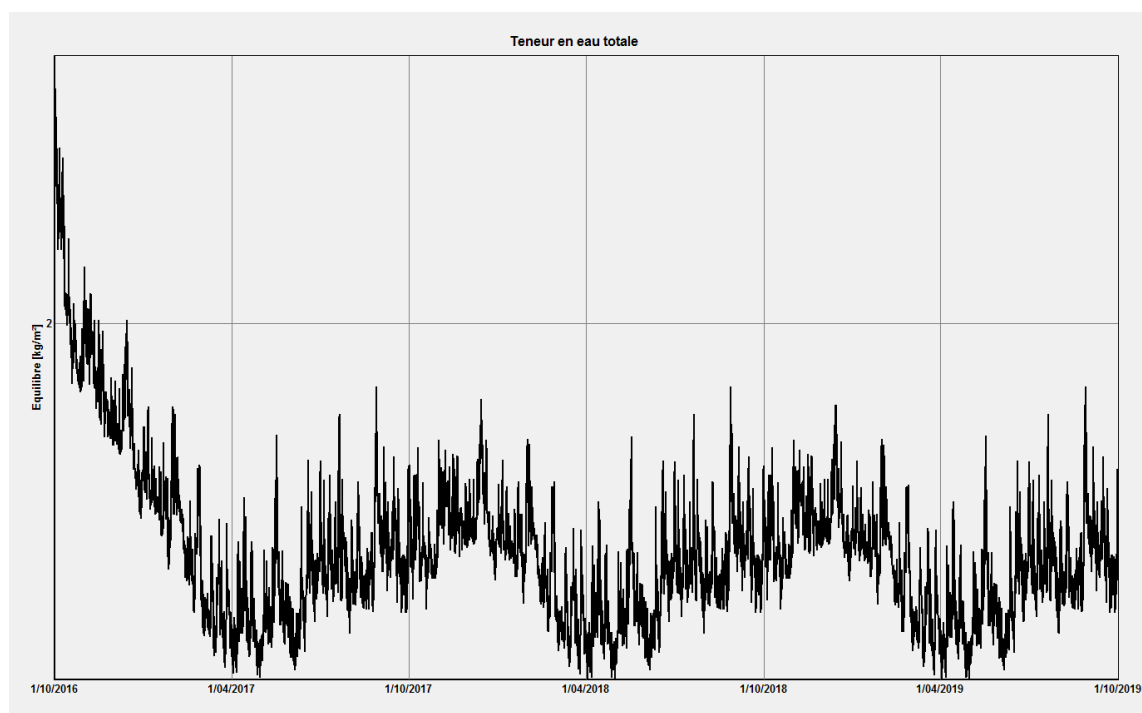


FIGURE 86 – CAS 3 : TENEUR EN EAU TOTALE POUR LA PAROI

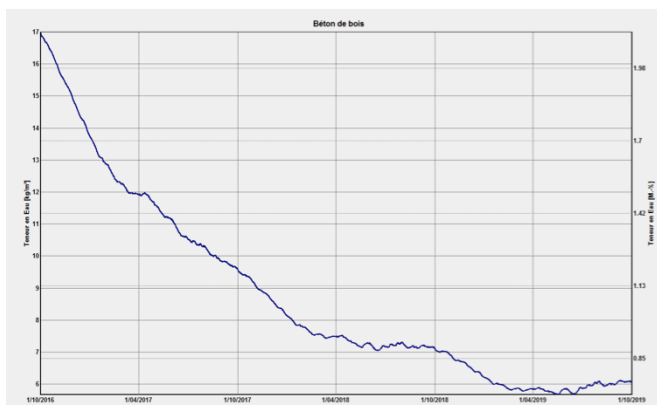


FIGURE 87 - CAS 1: TENEUR EN EAU DANS LE BÉTON DE BOIS PARTIE GAUCHE

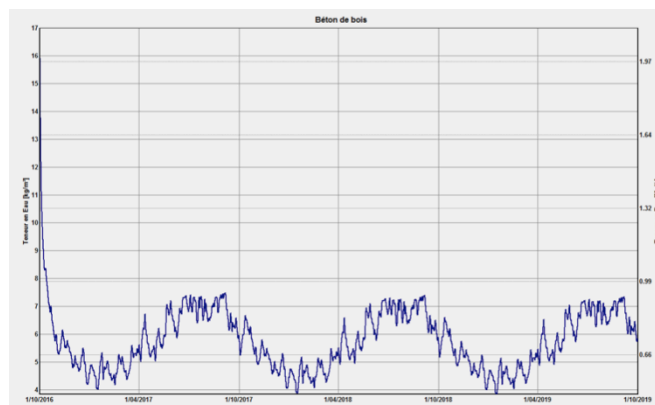


FIGURE 88 - CAS 1: TENEUR EN EAU DANS LE BÉTON DE BOIS PARTIE DROITE

On peut alors se poser la question des problèmes de condensation à l'intérieur de la paroi. En effet, il pourrait y avoir de la condensation dans le cas où la température interne de la paroi atteindrait le point de rosée. Pour vérifier si ce phénomène est présent, des courbes de températures sont également disponibles pour chaque matériau de la paroi. Le graphique de la **Figure 89** montre les profils de température et température de rosée dans la partie du béton de bois qui est contre l'isolant pour le cas 1 (endroit le plus susceptible pour la condensation).

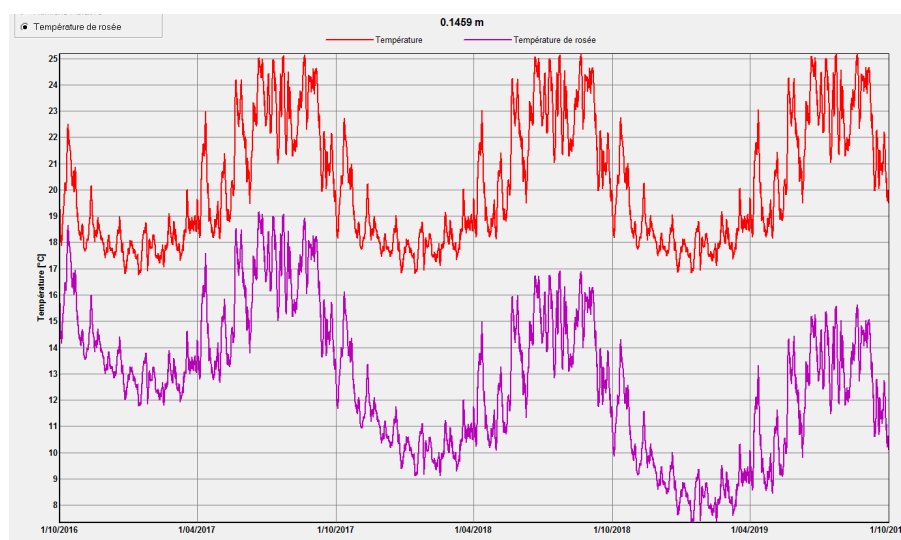


FIGURE 89 - CAS 1: TEMPÉRATURES DANS LE BÉTON DE BOIS PARTIE GAUCHE

Il est également intéressant de se pencher sur l'effet tampon, appelé plus précisément la capacité de régulation d'humidité du béton de bois. Ce concept est nommé MBV (*Moisture Buffer Value*) et se définit comme la quantité d'humidité que le matériau peut absorber ou reléguer pendant une période déterminée lorsqu'il est sujet à des variations d'humidité relative de l'air. L'unité utilisée est  $[g/m^2.\%HR]$  (Dubois et al., 2014 ; Evrard et al., 2012 ; Evrard, 2008).

Pour le calculer, la procédure suivie est identique aux simulations qui ont été faites dans des recherches similaires : le bloc en béton de bois est soumis à des cycles de 16 heures de journée avec une température de 20°C et une humidité relative de 33% suivi de 8 heures de nuit avec une température de 18°C et une humidité relative de 75%. Le fichier climatique correspondant à cette ambiance ne contient ni soleil, ni pluie, ni vent et est appliqué comme climat extérieur et intérieur pour la simulation (Evrard, 2008).

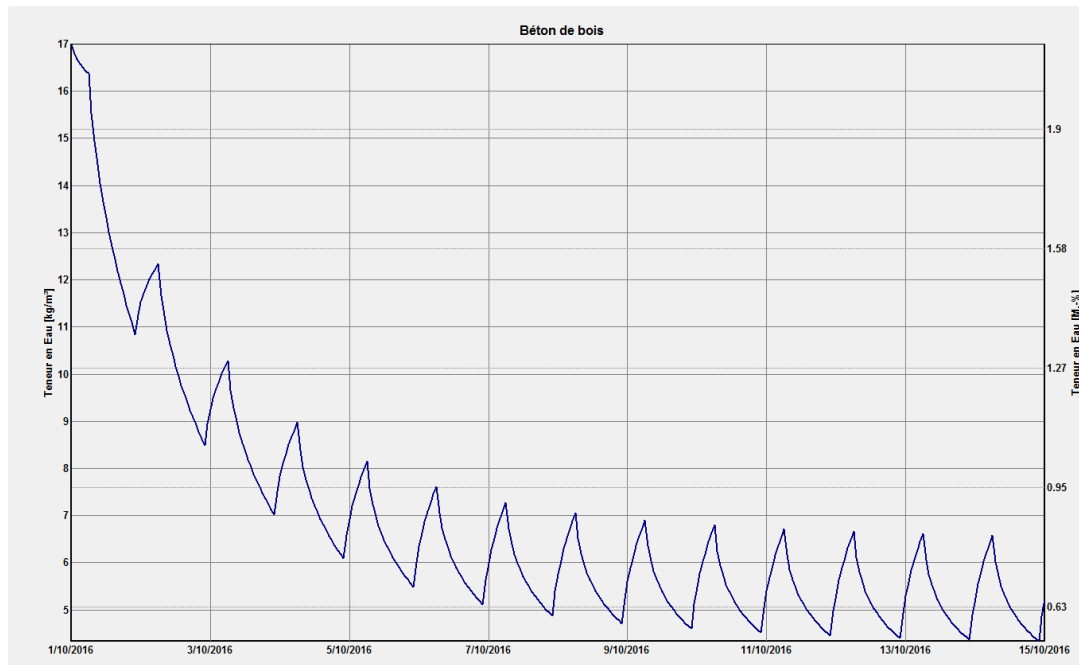


FIGURE 90 – CAS 4 : TENEUR EN EAU DU BÉTON DE BOIS AVEC CLIMAT IMPOSÉ

Après plusieurs jours, les cycles de teneur en eau du béton de bois se stabilisent (**Figure 90**) et on peut alors calculer le MBV.

$$Teneur\ eau_{max} - Teneur\ eau_{min} = 6,5755 - 4,3654 = 2,2101\ kg/m^3$$

Le béton de bois ayant une épaisseur de 3,5 cm du côté intérieur, on obtient une variation de teneur en eau de :

$$2,2101 \times 0,035 = 0,0773535\ kg/m^2$$

Cette valeur divisée par la variation d'humidité relative donne :

$$\frac{0,0773535}{42} \times 1000 = \mathbf{1,84\ g/m^2\ \%HR}$$

#### 4.1.4 Discussion

Une fois les résultats extraits pour les différents cas étudiés, il est maintenant possible d'analyser le comportement hygrothermique des parois.

Concernant les profils de températures, on ne constate pas de grands changements selon les cas. L'effet isolant du béton de bois est facilement observable (**Figure 91**).

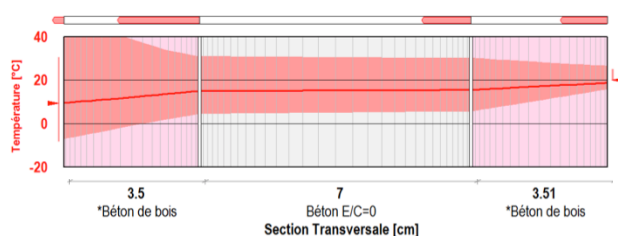


FIGURE 91 - CAS 4 : ATTÉNUATION DES TEMPÉRATURES DANS LE BÉTON DE BOIS

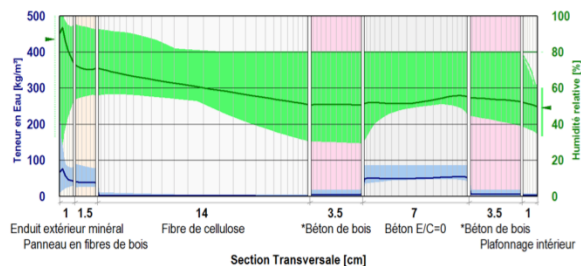


FIGURE 92 - CAS 2 : VARIATIONS D'HUMIDITÉ RELATIVE

Du point de vue de l'humidité relative, le crépi et l'isolant en polyuréthane freinent assez bien l'humidité relative extérieure qui pénètre dans la paroi. Par contre, dans le cas 2 (**Figure 92**), on observe que l'isolant en cellulose est sujet à de plus grandes variations d'humidité relative. En effet c'est un matériau plus sensible à la diffusion de vapeur d'eau par rapport au polyuréthane (**Figure 84**). Néanmoins, la teneur en eau de la cellulose reste sous les 4% en masse donc aucun problème n'est à déclarer sur ce point.

En ce qui concerne la teneur en eau totale des parois, dans tous les cas simulés, on observe une diminution franche de l'eau contenue dans la paroi et un équilibre qui tend à s'installer à la longue (**Figure 85** et **Figure 86**). Les matériaux ont donc tendance à s'assécher par rapport à la situation initiale de la construction (80% humidité). Ce point positif signifie la non-accumulation d'eau dans la paroi.

Une constatation générale est que les matériaux sont plus secs pendant les mois d'avril, mai et juin et plus humides en automne et en hiver.

Les amplitudes de variation annuelles de teneur en eau sont plus élevées pour une paroi contenant du béton de bois que pour une paroi en béton traditionnel. En effet, le béton de bois a plus tendance à absorber l'humidité de l'air pour la restituer plus tard comparé à un béton classique. Les variations restent tout de même assez faibles et donc tout à fait acceptables.

Sur le graphique du cas 3, **Figure 86**, on peut voir que la paroi s'assèche plus vite que celle du cas 1. Le béton mousse étant beaucoup plus poreux que le béton normal, sa faculté d'isolation est plus importante. Cette caractéristique lui confère également une masse moindre qui va diminuer sa résistance à la diffusion de vapeur et retenir l'eau moins facilement.

Dans tous les cas où la paroi contient un isolant, la teneur en eau du béton de bois reste très faible : une fois stabilisée, elle est inférieure à 1% en masse (**Figure 87** et **Figure 88**), ce qui est tout à fait sain pour un matériau de ce genre. En effet, pour les matériaux naturels,



comme le bois ou la cellulose, la teneur en eau doit rester inférieure à 18% en masse sinon il y a un risque de pourriture ou de dégradation (Biot, 2015).

Dans le cas 4, le bloc seul exposé à la pluie est soumis à des teneurs en eau plus élevées et des variations importantes (**Figure 93**). Toutefois, la teneur en eau n'excède pas les 4,5% en masse, ce qui est toujours une valeur acceptable puisque sous les 18%.

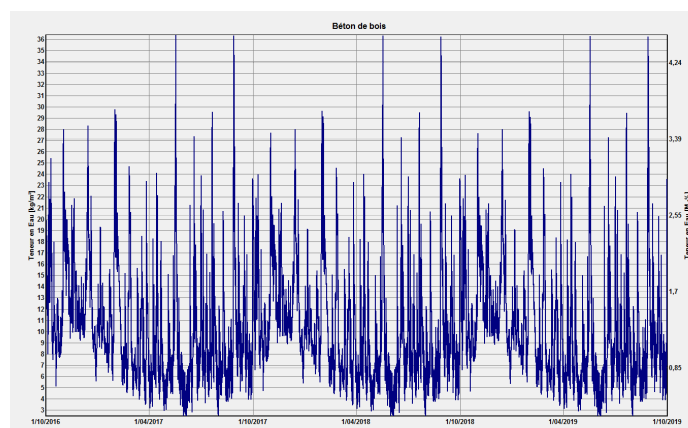


FIGURE 93 - CAS 4 : TENEUR EN EAU DU BÉTON DE BOIS CÔTÉ EXTÉRIEUR

A propos du risque de condensation à l'intérieur de la paroi, on remarque (**Figure 89**) que les températures n'atteignent jamais le point de rosée pour les cas 1, 2, 3 et 5.

Pour le cas 4, le bloc étant exposé à des températures plus extrêmes dues à son contact direct avec le climat extérieur, on peut observer ponctuellement de la condensation se former (intersection des deux courbes sur **Figure 94**). Il sera donc préférable de ne pas laisser le bloc de béton de bois non revêtu.

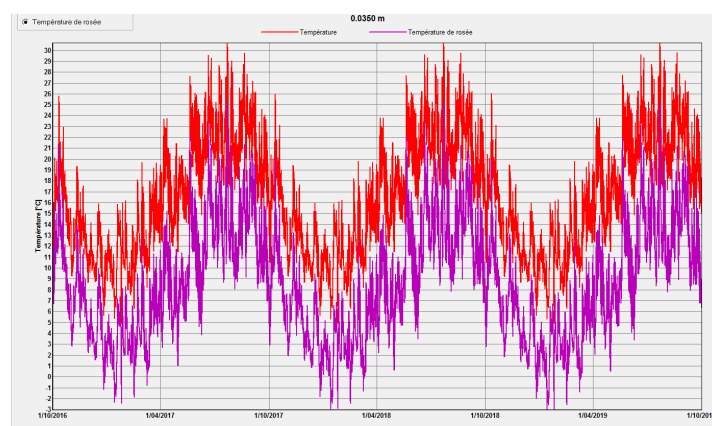


FIGURE 94 - CAS 4 : RISQUE DE CONDENSATION

Concernant la capacité de régulation de l'humidité, le béton de bois ( $1,84 \text{ g/m}^2\% \text{HR}$ ) se positionne dans les matériaux les plus performants. On peut, par exemple, citer des MBV de 0,39 pour le béton classique, de 1 pour le béton cellulaire et de  $2,15 \text{ g/m}^2\% \text{HR}$  pour la paille et le béton de chanvre (graphique disponible en annexe page 154) (Evrard, 2008 ; aPROpaille, 2016). Cette aptitude a le grand avantage d'offrir une ambiance intérieure agréable à l'habitation grâce au stockage de l'humidité dans le mur pendant les périodes humides et à sa rediffusion lors des périodes plus sèches.

L'étude des trois variantes du cas 1 démontre que ces changements de paramètres n'induisent pas de grandes différences.

Pour la variante 1 (humidité relative intérieure élevée), la teneur en eau de la paroi augmente légèrement mais ne cause pas de problème.

La variante 2, avec le crépi dont le coefficient d'absorption d'eau est plus élevé, la paroi est soumise à des variations de teneur en eau beaucoup plus importantes. Le crépi est moins performant et laisse pénétrer une plus grande quantité d'eau à l'intérieur de la paroi. Il est donc préférable de choisir un crépi extérieur le plus étanche à l'eau possible.

Aucun changement spécifique n'est à noter pour la variante 3 avec l'orientation Nord de la paroi.

## Conclusion

Suite aux différentes simulations, le matériau béton de bois ne semble pas rencontrer de problèmes au niveau de l'hygrométrie pour des applications classiques de mise en œuvre de parois pour bâtiments.

Par ailleurs, une caractéristique importante du béton de bois est à retenir : sa capacité de régulation de l'humidité est très avantageuse ce qui permet d'atténuer les pics d'humidité dans l'ambiance intérieure d'un bâtiment.

D'autres variantes de simulations pourraient évidemment être faites, comme faire varier l'enduit intérieur (remplacer le plâtre par de l'argile qui possède des propriétés hygrothermiques intéressantes) ; cumuler l'emploi de l'isolant en cellulose avec le béton mousse de remplissage, etc.

Il est évident que les résultats présentés ici ne sont pas rigoureusement exacts, il faut rappeler que c'est une simulation qui prend en compte un grand nombre d'hypothèses. Pour obtenir des valeurs plus justes, il aurait, par exemple, fallu connaître la courbe de sorption propre au béton de bois.

Cet aspect met en avant l'importance et la nécessité que les fabricants fournissent un maximum d'informations à propos de leurs matériaux afin d'obtenir des simulations les plus justes possible.

## 4.2 Analyse du cycle de vie

Maintenant que les propriétés thermiques et mécaniques du bloc en béton de bois ont été définies, il est temps de s'intéresser aux aspects environnementaux de ce bloc.

L'étude environnementale d'un produit sur toute sa durée de vie est faite, la plupart du temps, par une Analyse du Cycle de Vie (ACV), méthode qui sera mise en application dans ce chapitre.

L'ACV, outil d'écoconception, permet d'évaluer les impacts environnementaux d'un produit en tenant compte, dans le cas d'un scénario *du berceau à la tombe*, de l'extraction des matières premières à l'élimination finale, en passant par la production, le transport, la distribution, l'utilisation, l'entretien et la fin de vie (réutilisation ou recyclage) (**Figure 95**) (Léonard et Belboom, 2014 ; aPROpaille, 2016 ; Menet et Gruescu, 2014).



FIGURE 95 - SCHÉMA DE L'ANALYSE EN CYCLE DE VIE (SERVICE-INDUSTRIE.FR)

L'ACV suit une méthodologie bien particulière et se réalise en quatre grandes étapes (ISO 14010 ; ISO 14044 ; Menet et Gruescu, 2014) :

- La définition des objectifs et du champ de l'étude ;
- L'analyse de l'inventaire ;
- L'évaluation des impacts ;
- L'interprétation des résultats.

Dans les entreprises, lors d'une démarche d'éco-conception, les ACV sont régulièrement utilisées comme un outil d'aide à la décision pour le développement d'un nouveau produit. Si elle s'avère positive, l'ACV peut alors servir d'argument de vente et de comparaison avec d'autres produits du marché (Léonard et Belboom, 2014).

Le **logiciel** utilisé dans le cadre de ce travail est *OpenLCA* (version 1.4.2), il s'agit d'un logiciel open source spécifique pour réaliser des ACV. Il a été choisi principalement car il possède des fonctions similaires au programme professionnel *SimaPro* tout en étant gratuit et relativement facile à utiliser. La base de données utilisée est *ecoinvent 2.2*.

### 4.2.1 Objectifs et champ de l'étude

Dans le cadre de ce travail, l'ACV est réalisée pour définir l'impact environnemental des blocs de coffrage en béton de bois en comparaison avec les blocs de coffrage en béton traditionnel.

La question est de savoir quels avantages le béton de bois peut apporter et quels sont ses principaux impacts sur l'environnement.

Les données pour établir l'ACV ont été récoltées grâce au projet *Life Cycle in Practice (LCiP)* lancé par le pôle de compétitivité wallon *GreenWin* qui a, en partie, pour but d'aider les PME dans le secteur de la construction à réaliser des ACV. Prefer a été sélectionné et une ACV simplifiée a été réalisée par le CSTC pour les blocs de coffrage en béton de bois.

Afin de rentabiliser le temps, les données qu'ils ont utilisées pour réaliser cette ACV ont donc servi de base pour la présente étude. La principale différence est que leur travail se concentrait uniquement sur la modélisation de deux cas.

Les deux cas de base étudiés (cas 1 et cas 2, visibles au **Tableau 21**), sont : le bloc de coffrage en béton traditionnel (style Stepoc®) avec 12 cm d'isolant polyuréthane et le bloc de coffrage en béton de bois de chez Prefer avec 10 cm d'isolant polyuréthane.

Dans le cadre de ce travail, en tout, cinq cas seront analysés. Les cas 3, 4 et 5 sont propres à ce travail et ont été modélisés sur base des informations disponibles, avec les modifications nécessaires pour les paramètres divergents.

Il semblait intéressant d'étudier les situations où :

- le bois pour fabriquer les copeaux provient d'une source recyclée (cas 3) ;
- le béton de remplissage est un béton mousse (cas 4) ;
- l'isolant utilisé est de la cellulose (cas 5).

Les hypothèses de travail de cet ACV et les simplifications sont donc identiques à celles prises par le CSTC, elles seront citées ici mais pas réexpliquées en détails par soucis d'efficacité (voir annexes page 155).

Il faut noter que les cas étudiés pour cette partie ne sont pas identiques à ceux analysés dans le chapitre précédent avec le logiciel WUFI®. En effet, ici les parois étudiées sont composées des blocs et d'isolant, sans prendre en compte les revêtements intérieurs et extérieurs. Il aurait été intéressant d'analyser un complexe de paroi complet mais les hypothèses de base du CSTC ne fournissaient pas cette information.

**L'unité fonctionnelle** définit précisément l'objet de l'étude, sa fonction, sa quantité et sa durée de vie afin de pouvoir le comparer avec des objets qui offrent un service similaire.

Ici, l'unité fonctionnelle utilisée est 1 m<sup>2</sup> de mur porteur avec une valeur  $U = 0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Cette valeur du coefficient U répond aux exigences actuelles de la PEB mais pas au critère passif qui sera bientôt d'application pour la construction de nouveaux bâtiments. On pourrait alors se demander pourquoi ne pas avoir fait l'ACV avec un U plus performant ? Tout d'abord parce que cette hypothèse a été prise par le CSTC et qu'on disposait donc des valeurs correspondantes

pour l'ACV. Ensuite, cela n'aurait pas été utile dans ce cas-ci étant donné que l'étude se focalise sur la comparaison entre plusieurs cas. En effet, pour atteindre un U plus performant, il suffit d'augmenter la quantité d'isolant dans chaque cas. Par conséquent, la comparaison entre les cas serait restée identique.

Il faut noter que l'unité fonctionnelle utilisée ne prend pas en compte la capacité portante ni les caractéristiques mécaniques du mur. Le critère de base se focalise uniquement sur le niveau d'isolation.

TABEAU 21 - CARACTÉRISTIQUES À PRENDRE EN COMPTE POUR L'ACV DES CAS 1 ET 2

	Cas 1	Cas 2
	Bloc de coffrage traditionnel	Bloc de coffrage en béton de bois
<b>Dimensions [mm]</b>	600 x 190 x 200	600 x 190 x 200
<b>Conductivité thermique du bloc [W/m.K]</b>	1,42	0,12
<b>Masse volumique du bloc [kg/m<sup>3</sup>]</b>	1900	750
<b>Volume de béton constituant le bloc [L]</b>	12,31	12,31
<b>Masse du bloc sec [kg]</b>	23,39	9,23
<b>Nombre de blocs par palette</b>	72	72
<b>Nombre de blocs par m<sup>2</sup> de mur</b>	8,33	8,33
<b>Volume de béton de remplissage C30/37</b>	10,49	10,49
<b>Conductivité thermique du béton de remplissage [W/m.K]</b>	2,1	2,1
<b>Coefficient U du bloc rempli [W/m<sup>2</sup>K]</b>	8,96	1,45
<b>Épaisseur d'isolant PU supplémentaire [cm]</b>	12	10
<b>Quantité d'isolant PU pour 1m<sup>2</sup> de mur [kg]</b>	4,8	4
<b>Coefficient U de la paroi complète [W/m<sup>2</sup>K]</b>	0,23	0,23

Les quantités à encoder pour les trois autres cas sont évaluées de la même façon que pour les deux premiers cas mais sont placées en annexe page 159. L'épaisseur d'isolant à ajouter pour chaque cas est systématiquement calculée pour obtenir la même performance de U que les deux premiers cas.

### Hypothèses

- L'ACV réalisée est de type *berceau à la tombe* mais la phase d'utilisation n'est pas prise en compte car trop difficile à estimer.
- L'étude se base sur les prescriptions de la norme EN 15804+A1 en ce qui concerne les frontières du système et les allocations en fin de vie (méthode « Cut-off »).
- L'inventaire a été fait en interne chez Prefer par Matthieu Rahier et complété par l'utilisation de la base de données *ecoinvent 2.2* dans OpenLCA.
- Les scénarios de transport et de fin de vie des matériaux sont basés sur la publication « Profil environnemental des éléments de construction » de l'OVAM (Servaes et al., 2013).

### 4.2.2 Analyse de l'inventaire

L'inventaire consiste à répertorier tous les flux de matière et d'énergie entrants et sortants pour chaque étape du cycle de vie du système. On se retrouve alors avec un bilan des consommations et des émissions (Menet et Gruescu, 2014).

Cette étape longue et complexe de récolte des données ne fait pas partie de ce travail. Grâce aux données fournies par le CSTC via le LCiP, il a été possible de passer directement à l'encodage des données dans le logiciel (Figure 96).

Le détail de tous les flux encodés pour chaque cas est donné en annexe page 159.

Pour rappel, les cinq cas étudiés sont les suivants :

- Cas 1 : Bloc de coffrage traditionnel + béton de remplissage classique + 12 cm PUR
- Cas 2 : Bloc de coffrage en béton de bois + béton de remplissage classique + 10 cm PUR
- Cas 3 : Bloc de coffrage en béton de bois (bois source recyclée) + béton de remplissage classique + 10 cm PUR
- Cas 4 : Bloc de coffrage en béton de bois + béton mousse de remplissage + 7 cm PUR
- Cas 5 : Bloc de coffrage en béton de bois + béton de remplissage classique + 14 cm de cellulose

Process: Bloc béton bois				
Inputs				
Flow	Category	Flow property	Unit	Amount
blast furnace slag ceme...	construction materia...	Mass	kg	28.6
transport, lorry 7.5-16t,...	transport systems/road	Goods trans...	kg*km	113.3
sand, at mine - CH	construction materia...	Mass	kg	11.33
transport, lorry 16-32t, E...	transport systems/road	Goods trans...	kg*km	4393.7
lubricating oil, at plant -...	chemicals/organics	Mass	kg	0.0028215
polyurethane, rigid foam,...	plastics/polymers	Mass	kg	4.0
EUR-flat pallet - RER	wooden materials/pr...	Number of it...	Item(s)	0.010064412
Water	water/ground water	Mass	kg	26.9
diesel, burned in buildin...	construction proces...	Energy	MJ	0.0408
concrete, normal, at plan...	construction materia...	Volume	m3	0.0873817
hardwood, standing, und...	wooden materials/e...	Volume	m3	0.030342857
electricity, low voltage, a...	electricity/supply mix	Energy	kWh	1.512652212
disposal, building, concr...	waste management/...	Mass	kg	0.88067
disposal, building, concr...	waste management/...	Mass	kg	279.1745
disposal, building, polyur...	waste management/...	Mass	kg	4.0
disposal, building, waste...	waste management/...	Mass	kg	0.2516103
transport, lorry >16t, fle...	transport systems/road	Goods trans...	kg*km	7080.08
transport, lorry >16t, fle...	transport systems/road	Goods trans...	kg*km	500.0
transport, lorry >16t, fle...	transport systems/road	Goods trans...	kg*km	7688.59
Outputs				
Flow	Category	Flow property	Unit	Amount
Bloc béton bois	TFE bloc béton bois	Number of it...	Item(s)	1.0

FIGURE 96 - CAS 2 : ENCODAGE DES INPUTS/OUTPUTS DANS OPENLCA

Plusieurs **hypothèses** ont également été prises lors de l'inventaire :

- Pour la fin de vie des blocs en béton de bois, on prend l'hypothèse que leur démolition est réalisée de la même manière que celle des blocs en béton classique.

- En ce qui concerne le traitement des déchets, le béton de bois est considéré comme inerte (bois minéralisé donc pas d'échange avec l'environnement). 5% seront mis en décharge et 95% seront recyclés.
- On suppose que le bois provient d'exploitation durable. Un puits carbone est considéré lors de la croissance de l'arbre.
- Pour le cas 3, afin de tenir compte de la source recyclée du bois, le matériau « bois » est supprimé des inputs car on n'inclut pas l'extraction du bois dans ce cas-ci. Le transport du bois est réduit à une distance de 20 km qui correspond au trajet fictif pour acheminer les chutes de bois de sa source jusqu'à l'usine.
- Pour le cas 4, le matériau béton mousse est approximé grâce au matériau *autoclaved aerated concrete block* (bloc de béton cellulaire) de la base de données qui a été modifié en supprimant les étapes de cuisson en autoclave, de moulage, de découpage et d'emballage lors de la production. Les poids de transport du béton frais et de l'isolant sont réduits (béton mousse léger et besoin de moins de PUR).
- Pour le cas 5, l'isolant choisi est basé sur le matériau *cellulose fibre* de la base de données. Le scénario de fin de vie choisi pour la cellulose est la réutilisation ou le recyclage. Aucun impact n'y est associé lors de cette simulation car les traitements appliqués semblent négligeables.

#### 4.2.3 Évaluation des impacts

L'évaluation des impacts environnementaux va servir à comparer les différents cas de parois entre eux, à identifier les phases du cycle de vie ou éléments les plus défavorables, et à proposer des pistes d'amélioration.

La méthode d'évaluation des impacts choisie ici est une méthode *midpoint*, c'est à dire qui quantifie les effets qu'un produit induit sur l'environnement et non les dommages causés (*endpoint*) (Menet et Gruescu, 2014). La méthode sélectionnée dans OpenLCA pour réaliser les calculs est *CML (baseline)*. Elle permet d'évaluer un grand nombre d'impacts mais ils ne s'avèrent pas tous intéressants à étudier. En effet, les normes européennes EN 15804 et EN 15978 prescrivent les indicateurs environnementaux à retenir pour l'ACV des produits de construction et des bâtiments, ils sont au nombre de sept et sont présentés ci-dessous (aPROpaille, 2016 ; Menet et Gruescu, 2014) :

- **Acidification terrestre et aquatique** [kg SO<sub>2</sub> équivalent] :  
Les émissions d'oxydes d'azote et d'oxydes de soufre, liés à l'humidité, forment des pluies acides qui dégradent la végétation, acidifient les lacs, et rongent les pierres et les métaux sur les bâtiments.
- **Changement climatique** [kg CO<sub>2</sub> équivalent] :  
Les activités humaines produisent des émissions de gaz à effet de serre qui auront pour conséquence la hausse des températures moyennes sur terre.
- **Épuisement des ressources abiotiques, minéraux** [kg antimoine (Sb) équivalent] :  
La quantité de ressources naturelles non renouvelables (minerai de fer, cuivre, etc.) s'épuise dû à l'extraction humaine plus rapide que les réserves disponibles.



- **Épuisement des ressources abiotiques, ressources fossiles [MJ] :**  
L'utilisation d'énergie primaire non renouvelable est nuisible pour l'environnement. Elle puise dans les réserves fossiles (gaz naturel, pétrole, charbon) qui tendent à s'épuiser.
- **Eutrophisation [kg (PO<sub>4</sub>)<sup>3-</sup> équivalent] :**  
Les engrais agricoles et les rejets industriels entraînent une accumulation de nutriments dans les eaux et la terre, ce qui perturbe l'équilibre des écosystèmes.
- **Destruction de la couche d'ozone stratosphérique [kg CFC-11 équivalent] :**  
Des composés chimiques provenant des activités humaines sont lâchés dans l'atmosphère et nuisent à la couche d'ozone. Cette dernière a donc tendance à s'amincir et a laisser passer plus facilement les rayons solaires.
- **Formation d'ozone photochimique [kg éthylène équivalent] :**  
Les composés organiques volatils (COV), provenant de l'industrie ou des échappements de véhicules, forment de l'ozone troposphérique qui est nocif pour l'homme (irritation des voies respiratoires) et qui cause le smog par temps chaud.

Les résultats obtenus pour les cinq cas de paroi sont présentés au **Tableau 22**. Le graphique de la **Figure 97** permet de visualiser les valeurs en pourcentage des différents impacts en comparant quantitativement les cas entre eux. Les tableaux reprenant les valeurs précises pour chaque cas sont placés en annexe page 162.

Afin de juger s'il existe une différence significative des impacts entre deux cas, les valeurs doivent avoir minimum 10% d'écart pour le changement climatique et l'épuisement des ressources abiotiques (minéraux et fossiles) et minimum 30% d'écart pour les autres impacts (Jolliet et al., 2010).

TABLEAU 22 - VALEURS DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX SELON LES CAS

Catégorie d'impacts	Unité de référence	Cas 1 béton classique et PUR	Cas 2 béton de bois et PUR	Cas 3 béton de bois recyclé et PUR	Cas 4 béton mousse et PUR	Cas 5 béton de bois et cellulose
Acidification terrestre et aquatique	kg SO <sub>2</sub> éq	1,80E-01	1,77E-01	1,76E-01	1,12E-01	1,21E-01
Changement climatique	kg CO <sub>2</sub> éq	6,97E+01	3,08E+01	7,07E+01	6,93E+00	5,45E+00
Epuisement des ressources abiotiques, minéraux	kg Sb éq	1,40E-04	1,20E-04	1,20E-04	8,00E-05	7,00E-03
Epuisement des ressources abiotiques, ressources fossiles	MJ	6,11E+02	5,98E+02	5,96E+02	3,99E+02	3,03E+02
Eutrophisation	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> éq	4,66E-02	4,53E-02	4,51E-02	2,90E-02	3,00E-02
Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	kg CFC-11 éq	2,14E-06	2,72E-06	2,69E-06	1,74E-06	2,89E-06
Formation d'ozone photochimique	kg éthylène éq	1,29E-02	1,18E-02	1,18E-02	8,30E-03	4,40E-03

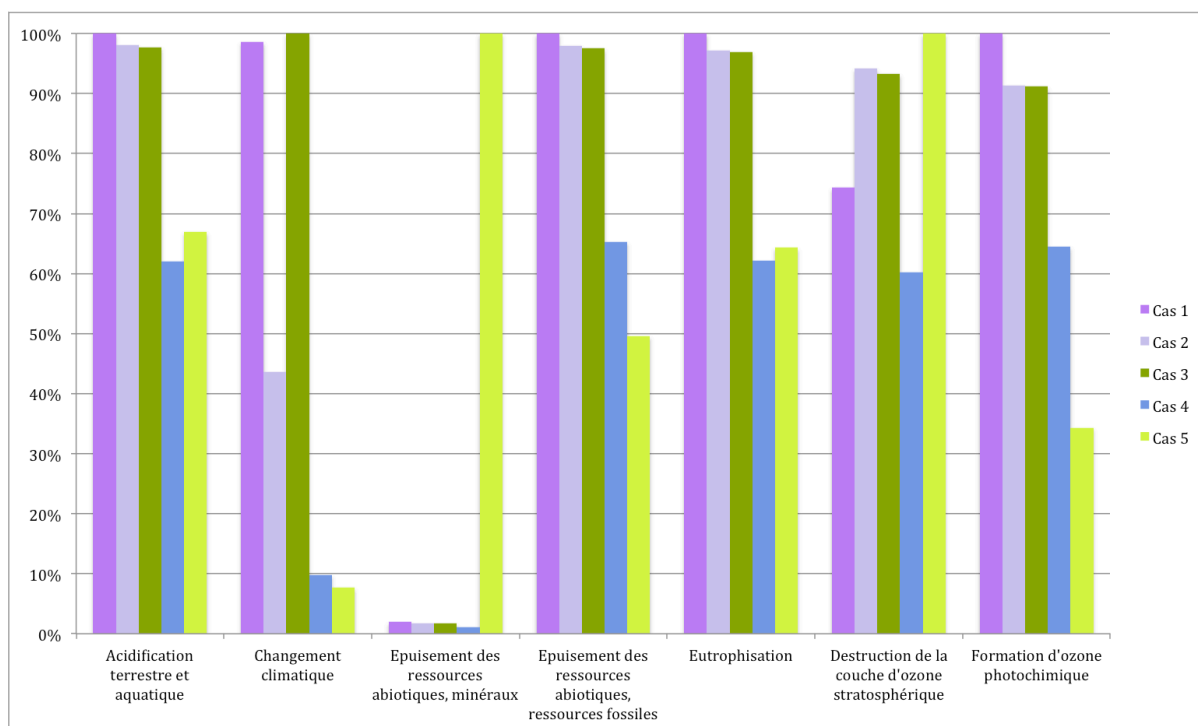


FIGURE 97 - COMPARAISON DES CAS SELON LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

#### 4.2.4 Interprétation des résultats

Tout d'abord, sur la **Figure 97**, on peut remarquer que l'utilisation du béton de bois (cas 2) induit généralement des impacts plus faibles que le béton classique (cas 1) mais que les différences sont assez faibles. En effet, il n'existe une différence notable entre ces deux cas qu'en ce qui concerne le changement climatique (diminution de plus de 50%). Les autres impacts restent dans des valeurs plutôt proches ce qui veut dire qu'ils ne sont pas significativement différents.

Le faible impact du béton de bois sur le changement climatique s'explique par l'utilisation du bois : lors de sa croissance, l'arbre capte une grande quantité de CO<sub>2</sub>, ce qui constitue ce qu'on appelle un puits carbone. Contrairement à l'utilisation du bois brut dans la construction, les copeaux de bois utilisés pour le béton de bois ne seront pas brûlés en fin de vie puisqu'ils ont été minéralisés. Le CO<sub>2</sub> habituellement réémis lors de l'incinération du bois n'est donc pas présent ici puisque les blocs en béton de bois seront recyclés en tant que granulats légers ou mis en décharge en tant que déchets inertes.

A propos du cas 3, où le bois utilisé pour les copeaux provient de chutes de l'industrie primaire du bois, le résultat pour le changement climatique est étonnamment mauvais. Cette constatation vient simplement du fait que le captage du CO<sub>2</sub> durant de la croissance de l'arbre est comptabilisé lors de la première utilisation du bois. Ici, étant donné qu'il s'agit de la deuxième utilisation de ce bois, le puits carbone n'est donc pas pris en considération. En réalité, cette valeur n'est pas vraiment représentative car il semble bien entendu plus avantageux d'utiliser du bois provenant de résidus de fabrication pour les copeaux plutôt que de couper de nouveaux arbres pour cette utilisation.

Afin de comprendre pourquoi le scénario utilisant du béton de bois ne se démarque pas significativement du béton classique pour la plupart des impacts, il est plus facile de se plonger dans le détail des éléments qui induisent ces impacts.

La **Figure 98** met en évidence, pour le cas 2, l'importance des étapes du cycle de vie sur les impacts environnementaux. On note à première vue, que proportionnellement, ce sont les matériaux qui induisent le plus d'impacts, suivis de l'étape de fin de vie, puis du transport et enfin de la production. Malgré un stockage de CO<sub>2</sub> grâce au bois, l'impact de l'étape de fin de vie sur le changement climatique reste élevé. Cette proportion provient du traitement non-écologique de l'isolant polyuréthane.

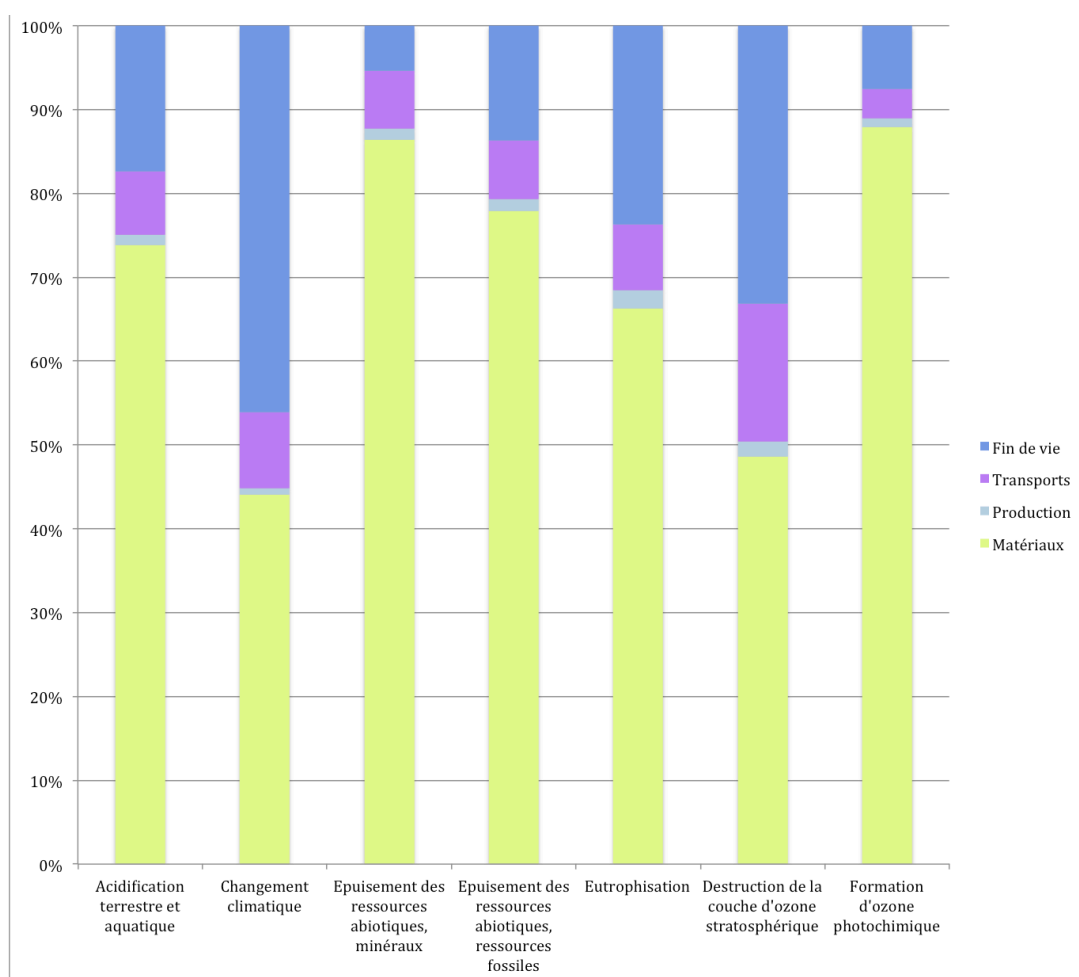


FIGURE 98 - CAS 2 : IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX SELON LES ÉTAPES DU CYCLE DE VIE

Ensuite, il semble intéressant de regarder en détails ce qui se passe au niveau des matériaux. Grâce à la **Figure 99** on remarque que l'isolant en polyuréthane est le plus mauvais élément environnementalement parlant suivi du béton classique de remplissage. Par conséquent, il a été décidé d'étudier les scénarios avec le béton mousse de remplissage (cas 4) et l'isolant en cellulose (cas 5).

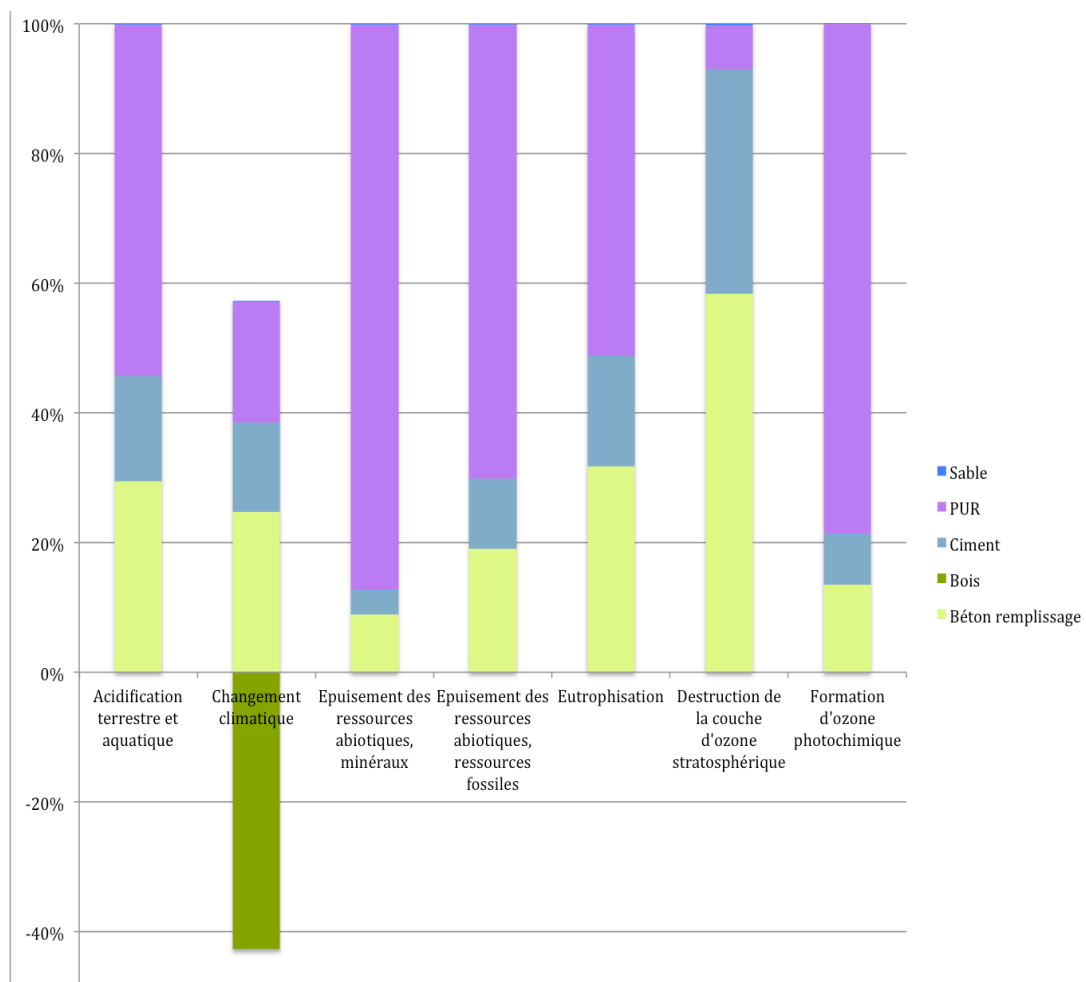


FIGURE 99 - CAS 2 : IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES MATÉRIAUX

L'utilisation du béton mousse comme béton de remplissage (cas 4) permet de réduire significativement la plupart des impacts environnementaux. En effet, le béton mousse étant plus léger que le béton classique, cela offre, d'une part, l'avantage de réduire la quantité d'isolant supplémentaire nécessaire et, d'autre part, la diminution du poids lors du transport.

En comparant la **Figure 100** avec la **Figure 101** on peut voir, en vert clair la réduction des impacts dû au béton mousse comparé au béton classique. Tous les autres graphiques non présentés ici sont placés en annexe page 163.

En ce qui concerne le choix de la cellulose comme isolant (cas 5), le bilan global est meilleur que pour le cas 2, mais les valeurs sont moins avantageuses pour l'épuisement des minéraux et pour la destruction de la couche d'ozone. Après analyse du cas, ces valeurs extrêmes proviennent de l'utilisation du sel de bore pour le traitement de la cellulose avant utilisation.

Néanmoins, comparé au polyuréthane qui est d'origine pétrochimique, la cellulose, d'origine végétale, est bien meilleure d'un point de vue environnemental (**Tableau 23**).

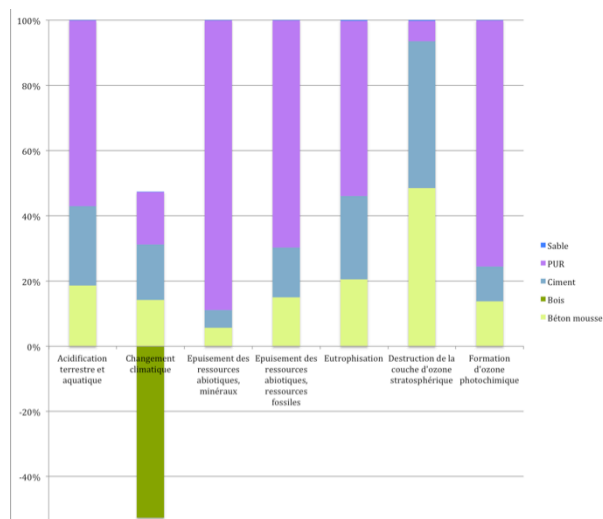


FIGURE 100 - CAS 4 : IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES MATÉRIAUX

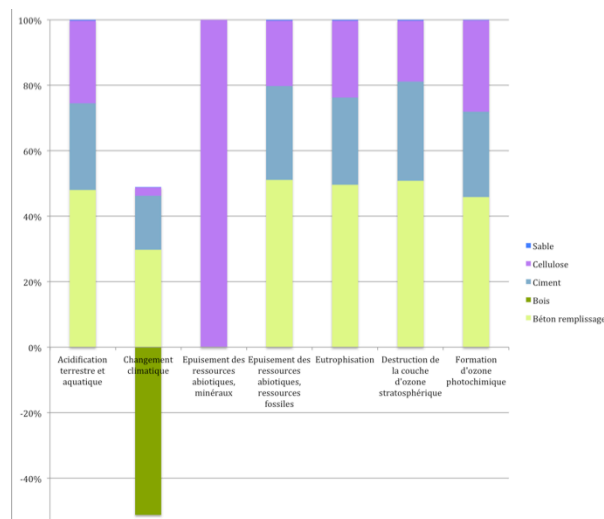


FIGURE 101 - CAS 5 : IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES MATÉRIAUX

TABLEAU 23 - COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ISOLANT PUR ET CELLULOSE

Catégorie d'impacts	PUR	Cellulose
Acidification terrestre et aquatique	7,08E-02	2,03E-02
Changement climatique	1,75E+01	1,96E+00
Epuisement des ressources abiotiques, minéraux	8,93E-05	6,97E-03
Epuisement des ressources abiotiques, ressources fossiles	3,27E+02	3,49E+01
Eutrophisation	1,53E-02	4,53E-03
Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	8,96E-08	2,83E-07
Formation d'ozone photochimique	8,17E-03	8,61E-04

## Conclusion

En résumé, l'utilisation du bloc en béton de bois offre certains avantages comparés au bloc traditionnel, notamment un effet bénéfique en ce qui concerne les émissions de CO<sub>2</sub> mais des améliorations restent à faire.

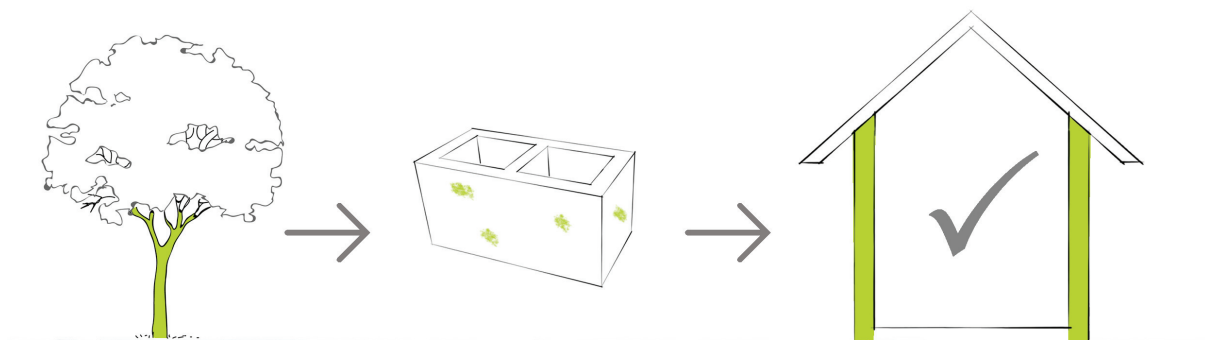
Le béton mousse de remplissage et l'isolant en cellulose diminuent déjà fortement la plupart des impacts. On pourrait donc éventuellement imaginer un scénario proposant la mise en œuvre du béton mousse et de la cellulose simultanément.

Par ailleurs, d'autres isolants écologiques pourraient également être utilisés afin de trouver le compromis produisant les impacts les plus faibles possibles.

En fin de compte, il est clair que l'isolant polyuréthane est à proscrire et qu'il est préférable de diminuer un maximum l'utilisation de ciment, ce qui, aujourd'hui, reste encore difficile. On pourrait par exemple imaginer une préminéralisation des copeaux à la chaux à la place du ciment. Il serait également idéal de trouver une alternative de traitement au sel de bore pour la cellulose.

Pour finir, il faut rappeler que pour réaliser cette analyse de cycle de vie, un grand nombre d'hypothèses ont été faites et beaucoup d'aspects ont été approximés. Il faut donc rester prudent quant aux résultats obtenus, les utiliser avec précaution tout en étant conscient de ce qui se cache derrière et ne pas les prendre pour acquis.

## CHAPITRE 5 – CONCLUSION





## 5. Conclusions et perspectives

Le béton de bois est un matériau de construction relativement récent qui s'inscrit dans la tendance actuelle de l'utilisation des matériaux bio-sourcés. Ces matériaux à empreinte écologique réduite, permettent de construire des habitats sains pour les usagers.

Le bois, matériau renouvelable, est ici utilisé sous forme de copeaux qui servent de granulats dans le béton. Mis en œuvre principalement en tant que remplissage isolant et non porteur, le béton de bois semblait présenter des caractéristiques intéressantes à exploiter. Par la suite, l'idée était alors d'en faire un matériau à la fois isolant et porteur en lui donnant la forme de bloc de coffrage. Jusqu'alors, la plupart des études menées sur le béton de bois, se penchaient sur sa microstructure et ses caractéristiques à l'état brut mais peu d'entre elles abordaient ses propriétés à l'échelle de la paroi.

Dans ce travail, l'objectif principal était d'étudier la pertinence de l'utilisation du bloc de coffrage en béton de bois pour une paroi de bâtiment et de juger s'il pouvait potentiellement constituer une alternative sérieuse au bloc de béton classique.

Pour réaliser cette étude, il était tout d'abord nécessaire de faire le point sur les blocs existants pour mieux situer la place qu'occupe le bloc de béton de bois.

Dans la pratique, une longue série d'essais ont été menés en laboratoire sur des blocs en béton de bois fournis par l'usine de préfabrication Prefer. De ces valeurs mesurées sont ressorties plusieurs constatations.

La masse volumique atteinte est un des points les plus intéressants du béton de bois ( $800 \text{ kg/m}^3$ ) étant donné que le poids est réduit de plus de moitié par rapport à un bloc traditionnel ( $2000 \text{ kg/m}^3$ ). Cet avantage permet d'alléger considérablement la charge à porter lors de la construction d'un mur et de réduire les efforts fournis par les maçons.

La très bonne perméabilité à la vapeur d'eau ( $\mu = 4$ ) du béton de bois offre des murs respirants, ce qui contribue à une atmosphère saine au sein de l'habitat.

L'aspect isolant du bloc est également avantageux puisque, rempli de béton traditionnel, il atteint un  $\lambda$  de  $0,21 \text{ W/m.K}$ . Le béton de bois seul possède une conductivité de  $0,11 \text{ W/m.K}$ . Cependant, ce résultat n'est pas suffisant pour construire un mur répondant aux exigences de la PEB pour laquelle il serait nécessaire d'ajouter une couche d'isolant supplémentaire.

En ce qui concerne la résistance en compression, on sait que le béton de bois seul n'est pas suffisant ( $1,5 \text{ MPa}$ ) pour être porteur, mais une fois banché, on atteint une valeur équivalente au parpaing traditionnel ( $8 \text{ MPa}$ ) ce qui convient parfaitement pour la construction de bâtiments de hauteur modérée.

Enfin, la résistance en flexion des parois est tout à fait adaptée pour reprendre la poussée du béton frais coulé à l'intérieur du bloc.

Une partie des valeurs obtenues a permis de compléter l'encodage des données pour les deux simulations réalisées dans la dernière partie du travail.

La première simulation consiste à modéliser le comportement hygrothermique d'une paroi contenant le bloc en béton de bois. Le logiciel WUFI Pro© a révélé qu'il n'existait pas de

problème de condensation ou de dégradation par l'humidité si le bloc est recouvert sur son côté extérieur. De plus, on peut confirmer qu'un des points forts du béton de bois est son excellente régulation de l'humidité intérieure. Cette aptitude présente le grand avantage d'offrir un confort supérieur aux habitants grâce au stockage de l'humidité dans le mur pendant les périodes humides et à sa rediffusion lors des périodes plus sèches.

La seconde simulation, concernant l'analyse de cycle de vie sur le logiciel OpenLCA, démontre que l'utilisation du béton de bois émet moins de CO<sub>2</sub> comparé au bloc de béton traditionnel. C'est un premier progrès pour le développement du béton de bois mais des alternatives restent à trouver pour réduire au maximum les impacts environnementaux. On peut noter notamment la grande influence du type de béton de remplissage et d'isolant associé dans la globalité des impacts de la paroi.

En raison de certains paramètres non maîtrisés, il convient de rester prudent dans l'interprétation des résultats. Par exemple, lors des expérimentations, les essais ont été réalisés sur des blocs de béton de bois dont la géométrie ne correspond pas à celle du bloc de coffrage définitif. Les résultats offrent donc une première idée du comportement mais restent limités dans leur application.

De plus, le présent travail s'est concentré sur les caractéristiques mécaniques, thermiques, hygrothermiques et écologiques du béton de bois mais il reste encore d'autres aspects, non étudiés dans ce mémoire, à vérifier pour arriver à des conclusions plus complètes.

Le bloc de béton de bois a de l'avenir. Des investigations futures tenteront d'améliorer, entre autres, les propriétés mécaniques du bloc tout en conservant son aspect isolant.

Le but ultime serait de trouver un moyen pour que le bloc de béton de bois soit porteur seul, sans passer pas la technique de banchage.

Par la suite, selon le même type d'approche multicritères, les avancées dans le domaine permettront d'utiliser des matériaux plus appropriés dans un complexe de paroi contenant du béton de bois. Par exemple, il semble primordial de trouver l'enduit intérieur et extérieur idéal ainsi que l'isolant avec des performances optimales et des impacts environnementaux faibles. Une étude plus poussée sur la géométrie du bloc pourrait également compléter ce travail. Il convient en effet d'optimiser la forme pour une mise en œuvre facilitée, notamment par l'intégration de l'isolant dans, ou contre, le bloc comme la plupart des concurrents le proposent.

En conclusion, le bloc de coffrage en béton de bois semble être effectivement une alternative prometteuse au bloc traditionnel.

La principale avancée tient dans le rôle du béton de bois, passé du statut de simple remplissage isolant à celui de partie intégrante structurelle du mur.

La tendance actuelle qui vise le bien-être, le respect de la nature et le désir d'un habitat sain semble favoriser l'intérêt pour les matériaux bio-sourcés.

Il reste cependant des progrès à faire, en particulier pour intégrer l'idée de l'emploi des matériaux composites à base végétale dans les habitudes des concepteurs, constructeurs et clients. Promouvoir la construction durable reste un défi pour les architectes qui doivent convaincre les candidats bâtisseurs

## 6. Table des figures

FIGURE 1 - STRUCTURE DE L'ÉTUDE .....	7
FIGURE 2 - RÔLE DE SÉPARATION DES PAROIS .....	9
FIGURE 3 - MODES DE DÉPERDITION DE CHALEUR DANS LE BATIMENT (CALCULEO.FR) .....	10
FIGURE 4 - SCHÉMA DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE (ENERGIEPLUS-LESITE.BE).....	11
FIGURE 5 - SCHÉMA DE L'OBJECTIF PEB (DGO4 ET CIFFUL, 2015, P. 9) .....	13
FIGURE 6 - NIVEAU K (DGO4 ET CIFFUL, 2015, P. 54) .....	15
FIGURE 7 - BLOC PLEIN (COECK.BE) .....	18
FIGURE 8 - BLOC PERFORÉ (GEDIMAT.FR) .....	18
FIGURE 9 - BLOC CREUX (COECK.BE) .....	18
FIGURE 10 - BLOC À BANCHER (LESMATERIAUX.FR) .....	19
FIGURE 11 - MISE EN OEUVRE DU BLOC STEPOC (BETONDELALOMME.BE) .....	20
FIGURE 12 - COULAGE DU BÉTON DANS LES BLOCS (BETONDELALOMME.BE) .....	20
FIGURE 13 - BLOC RTH (BLOCALIANS.FR) .....	21
FIGURE 14 - BLOC EASY-THERM (EASY-THERM.FR) .....	21
FIGURE 15 - MONOMUR DE TERRE CUITE (MONOMUR.COM).....	22
FIGURE 16 - MAÇONNERIE ROULÉE® (WIENERBERGER.FR).....	22
FIGURE 17 - BLOC YTONG (YTONG.FR) .....	23
FIGURE 18 - STRCUTURE CELLULAIRE (FeBeCEL) .....	23
FIGURE 19 - PIERRE PONCE (FIBREVERTE.COM) .....	24
FIGURE 20 - POUZZOLANE (BETON-GRANULAT.COM) .....	24
FIGURE 21 - VERMICULITE (FAUX-ROCK.COM) .....	24
FIGURE 22 - ARGILE EXPANSÉE (ISOLATION.OOREKA.FR) .....	24
FIGURE 23 - SCHISTE EXPANSÉ (FIBREVERTE.COM) .....	24
FIGURE 24 - PERLITE EXPANSÉE (REPPHEL.NL).....	24
FIGURE 25 - MÂCHEFER (TECHNIQUES-INGENIEUR.FR).....	24
FIGURE 26 - CENDRES VOLANTES FRITTÉES (TECHNIQUES-INGENIEUR.FR) .....	24
FIGURE 27 - POLYSTYRÈNE EXPANSÉ (ISOVARIANT.BE) .....	24
FIGURE 28 - COPEAUX DE BOIS (123RF.COM) .....	24
FIGURE 29 - CONSTRUCTION EN OSSATURE BOIS ET BOTTES DE PAILLE (APROPAILLE.BE).....	27
FIGURE 30 - BÉTON DE CHANVRE BANCHÉ (TERREVIVANTE.ORG).....	28
FIGURE 31 - BÉTON DE CHANVRE PROJETÉ (PIOEUVRE.FR).....	28
FIGURE 32 - BLOCS EN BÉTON DE CHANVRE (INATER.NET).....	28
FIGURE 33 - ROSACE D'ATTACHE DES BLOCS DE BÉTON DE CHANVRE (ISOHEMP.BE) .....	28
FIGURE 34 - PLANTE DE MISCANTHUS (BELATLERNATIVE.BE).....	29
FIGURE 35 - BLOC DE BÉTON DE MISCANTHUS (BÉLALTERNATIVE.BE) .....	29
FIGURE 36 - TEXTURE DU BÉTON DE BOIS .....	30
FIGURE 37 - PAROI PRÉFABRIQUÉE EN BÉTON DE BOIS (PREFER.BE).....	32
FIGURE 38 - MISE EN OEUVRE DES BLOCS EN BÉTON DE BOIS (ARCHIEXPO.FR) .....	34
FIGURE 39 - BLOCS EN BÉTON DE BOIS PRÉSENTS SUR LE MARCHÉ.....	35
FIGURE 40 - BLOCS DE BÉTON DE BOIS PREFER POUR ESSAIS.....	35
FIGURE 41 - PLANIFICATION DES ESSAIS.....	39
FIGURE 42 - BLOC ACTUEL .....	40
FIGURE 43 - FUTUR BLOC DE COFFRAGE .....	40
FIGURE 44 - PESÉE ET MESURE D'UN BLOC.....	44
FIGURE 45 - FORME DES VIDES .....	45
FIGURE 46 - BLOCS STOCKÉS EN CHAMBRE HUMIDE .....	46
FIGURE 47 - DISPOSITIF D'ÉGOUTTAGE.....	46
FIGURE 48 - PROTECTION DE LA BALANCE .....	46
FIGURE 49 - EVOLUTION DE LA MASSE DES BLOCS EN FONCTION DU TEMPS.....	48

FIGURE 50 - PYCNOMÈTRE À GAZ.....	50
FIGURE 51 - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU PYCNOMÈTRE À GAZ (APROPAILLE, 2016, P. 41) .....	51
FIGURE 52 - COPEAUX SATURÉS DANS L'EAU .....	51
FIGURE 53 - COPEAUX À L'ÉTUVE.....	51
FIGURE 54 - SCELLAGE DE L'ÉCHANTILLON SUR LA COUELLE CONTENANT DU $\text{CaCl}_2$ .....	54
FIGURE 55 - ASSEMBLAGES STOCKÉS DANS LE LOCAL CONDITIONNÉ.....	54
FIGURE 56 - PRISE DE MASSE AU COURS DU TEMPS (ÉCHANTILLON 1V1A) .....	54
FIGURE 57 - PRISE DE MASSE AU COURS DU TEMPS (ÉCHANTILLON 2V1A) .....	55
FIGURE 58 - CLASSEMENT DES COEFFICIENTS $\mu$ SELON LES RECETTES.....	57
FIGURE 59 - MACHINE AUX PLAQUES CHAUDES.....	59
FIGURE 60 - LOGICIEL RELIÉ AUX CAPTEURS DES PLAQUES CHAUDES.....	59
FIGURE 61 - BLOC CENTRÉ SUR LA PLAQUE .....	60
FIGURE 62 - PLAQUE SUPÉRIEURE REDESCENDUE, ESSAI EN COURS.....	60
FIGURE 63 - ESSAI AVEC DEUX BLOCS COTE À COTE .....	60
FIGURE 64 - ÉPROUVETTES PRÊTES POUR L'ESSAI DE TRACTION.....	63
FIGURE 65 - MISE EN PLACE DE L'ÉPROUVETTE DANS LA MACHINE.....	64
FIGURE 66 - RUPTURE DANS L'ÉCHANTILLON.....	64
FIGURE 67 - DÉFAUTS DANS LE BLOC 1R1-2.....	65
FIGURE 68 - DÉFAUTS DANS LE BLOC 2RH3-1 .....	65
FIGURE 69 - FACIÈS DE RUPTURE.....	66
FIGURE 70 - RUPTURE DANS LES BLOCS 60% HR.....	67
FIGURE 71 - RUPTURE DANS LES BLOCS 95% HR.....	67
FIGURE 72 - VÉRIFICATION DE PLANÉITÉ DU BLOC .....	68
FIGURE 73 - PRESSE DE COMPRESSION.....	68
FIGURE 74 - BLOC CENTRÉ DANS LA PRESSE .....	68
FIGURE 75 - FISSURE DE RUPTURE DANS UN BLOC .....	70
FIGURE 76 - FACIÈS DE RUPTURE DU BLOC.....	70
FIGURE 77 - RUPTURE DANS UN GRANULAT.....	70
FIGURE 78 - ESSAI DE FLEXION À TROIS POINTS .....	72
FIGURE 79 - FISSURE DE RUPTURE DANS L'ÉPROUVETTE 3V32.....	74
FIGURE 80 - COURBES CHARGE-DÉPLACEMENT POUR LA RECETTE 3 .....	74
FIGURE 81 - VERSION DU LOGICIEL WUFI PRO© UTILISÉE.....	78
FIGURE 82 - ANALYSE DU CLIMAT EXTÉRIEUR DE LIÈGE.....	81
FIGURE 83 - ANALYSE DU CLIMAT INTÉRIEUR.....	81
FIGURE 84 - ANIMATION POUR LE CAS 1.....	82
FIGURE 85 - CAS 1 : TENEUR EN EAU TOTALE POUR LA PAROI .....	83
FIGURE 86 - CAS 3 : TENEUR EN EAU TOTALE POUR LA PAROI .....	83
FIGURE 87 - CAS 1: TENEUR EN EAU DANS LE BÉTON DE BOIS PARTIE GAUCHE .....	84
FIGURE 88 - CAS 1: TENEUR EN EAU DANS LE BÉTON DE BOIS PARTIE DROITE .....	84
FIGURE 89 - CAS 1: TEMPÉRATURES DANS LE BÉTON DE BOIS PARTIE GAUCHE .....	84
FIGURE 90 - CAS 4 : TENEUR EN EAU DU BÉTON DE BOIS AVEC CLIMAT IMPOSÉ.....	85
FIGURE 91 - CAS 4 : ATTÉNUATION DES TEMPÉRATURES DANS LE BÉTON DE BOIS .....	86
FIGURE 92 - CAS 2 : VARIATIONS D'HUMIDITÉ RELATIVE.....	86
FIGURE 93 - CAS 4 : TENEUR EN EAU DU BÉTON DE BOIS CÔTÉ EXTÉRIEUR .....	87
FIGURE 94 - CAS 4 : RISQUE DE CONDENSATION.....	87
FIGURE 95 - SCHÉMA DE L'ANALYSE EN CYCLE DE VIE (SERVICE-INDUSTRIE.FR) .....	89
FIGURE 96 - CAS 2 : ENCODAGE DES INPUTS/OUTPUTS DANS OPENLCA.....	92
FIGURE 97 - COMPARAISON DES CAS SELON LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX .....	95
FIGURE 98 - CAS 2 : IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX SELON LES ÉTAPES DU CYCLE DE VIE .....	96
FIGURE 99 - CAS 2 : IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES MATÉRIAUX.....	97
FIGURE 100 - CAS 4 : IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES MATÉRIAUX.....	98
FIGURE 101 - CAS 5 : IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES MATÉRIAUX.....	98

## 7. Table des tableaux

TABLEAU 1 - VALEURS $U_{MAX}/R_{MIN}$ : RÉGLEMENTATION PEB DEPUIS LE 1 <sup>ER</sup> JANVIER 2014 (DGO4 ET CIFFUL, 2015, P. 53)	14
TABLEAU 2 - CARACTÉRISTIQUES DES BLOCS DE BÉTON DE BOIS DES CONCURRENTS	36
TABLEAU 3 - RÉCAPITULATIF DES CARACTÉRISTIQUES DES DIFFÉRENTS BLOCS	37
TABLEAU 4 - COMPOSITION DU BÉTON DE BOIS EN KG/M <sup>3</sup> SELON LES 4 RECETTES DE PREFER	40
TABLEAU 5 - COMPOSITION DU BÉTON DE REMPLISSAGE POUR 1M <sup>3</sup> (PREFER)	41
TABLEAU 6 - INVENTAIRE DES BLOCS PAR ESSAIS	42
TABLEAU 7 - MASSE VOLUMIQUE APPARENTE DES BLOCS À 60% HR	47
TABLEAU 8 - MASSE VOLUMIQUE APPARENTE DES BLOCS À 95% HR	48
TABLEAU 9 - CLASSEMENT DES MASSES VOLUMIQUES SELON LES RECETTES	49
TABLEAU 10 - POURCENTAGE DE PRISE DE MASSE DES BLOCS REMPLIS SELON L'HUMIDITÉ RELATIVE	49
TABLEAU 11 - MASSE VOLUMIQUE DES COPEAUX DE BOIS MINÉRALISÉS	52
TABLEAU 12 - COEFFICIENT DE RÉSISTANCE À LA DIFFUSION DE VAPEUR D'EAU SELON LES RECETTES	57
TABLEAU 13 - COEFFICIENT DE CONDUCTIVITÉ THERMIQUE SELON LES RECETTES	61
TABLEAU 14 - ADHÉRENCE EN TRACTION ENTRE LE BÉTON DE BOIS ET LE BÉTON DE REMPLISSAGE	65
TABLEAU 15 - RÉSISTANCE EN COMPRESSION DES BLOCS REMPLIS	69
TABLEAU 16 - RÉSISTANCE EN COMPRESSION DU BÉTON DE BOIS (PREFER)	71
TABLEAU 17 - RÉSISTANCE EN FLEXION DES PAROIS SELON LES RECETTES DE BÉTON DE BOIS	73
TABLEAU 18 - SYNTHÈSE DES VALEURS OBTENUES SUR LES BLOCS EN BÉTON DE BOIS	76
TABLEAU 19 - DESCRIPTIF DES PAROIS ÉTUDIÉES DANS WUFI©	79
TABLEAU 20 - CHOIX DES MATÉRIAUX DANS WUFI©	80
TABLEAU 21 - CARACTÉRISTIQUES À PRENDRE EN COMPTE POUR L'ACV DES CAS 1 ET 2	91
TABLEAU 22 - VALEURS DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX SELON LES CAS	94
TABLEAU 23 - COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ISOLANT PUR ET CELLULOSE	98

## 8. Bibliographie

### Articles – Livres - Publications

Al-Homoud, M.S. (2005). Performance Characteristics and Practical Applications of Common Building Thermal Insulation Materials. *Building and Environment* 40, n° 3: 353-66.  
doi:10.1016/j.buildenv.2004.05.013.

Al-Jabri, K.S., Hago, A.W., Al-Nuaimi, A.S. et Al-Saidy, A.H. (2005). Concrete Blocks for Thermal Insulation in Hot Climate. *Cement and Concrete Research* 35, n° 8: 1472-79.  
doi:10.1016/j.cemconres.2004.08.018.

aPROpaille. (2016). *Vadémécum 2 : La paille - parois performantes*. Document pdf reçu par email.

Beaumier, J-L. (2007). *L'isolation phonique écologique : matériaux, mise en œuvre*. Mens, France : Terre vivante, 139 p.

Bissonnette, B., Courard, L., Jolin, M., Thomassin, M., Vaysburd, A., Garbacz, A. et von Fay, K.F. (2014). Adhérence des réparations en béton : évaluation et facteurs d'influence. *Quinzième édition des Journée Scientifiques du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton*. Repéré à [https://orbi.ulg.ac.be/bitstream/2268/171851/1/RF2B\\_2014\\_Douai\\_Bissonnette\\_et\\_coll\\_rev.pdf](https://orbi.ulg.ac.be/bitstream/2268/171851/1/RF2B_2014_Douai_Bissonnette_et_coll_rev.pdf)

Calvat, G. (2009). *Les murs et les planchers : Collection Construire de A à Z*. Paris, France : Gallimard, éditions Alternatives, 110 p.

Coatanlem, P., Jauberthie, R. et Rendell, F. (2006). Lightweight Wood Chipping Concrete Durability. *Construction and Building Materials* 20, n° 9: 776-81.  
doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.01.057.

Courard, L. (2011). *Matériaux de construction* (version 2011-2012). Université de Liège. Edition : Centrale des cours de l'AEES.

Cox, J., Sizaïre, J., Meulders, P., Van Overmeire, E., Ingelaere, A. (2009). FeBeCel, *Le Béton Cellulaire : Matériau d'Avenir*. Bruxelles, Belgique : Jacques Sizaïre, 122 p.

Dubois, S., McGregor, F., Evrard, A., Heath, A. et Lebeau F. (2014). An Inverse Modelling Approach to Estimate the Hygric Parameters of Clay-Based Masonry during a Moisture Buffer Value Test. *Building and Environment* 81: 192-203.  
doi:10.1016/j.buildenv.2014.06.018.

Evrard, A. (mai 2008). *Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials*. Thèse, Ecole Polytechnique de Louvain, Unité d'Architecture.

Evrard, A., Louis, A., Biot, B. et Dubois, S. (2012). Moisture equilibrium in straw bale walls. *PLEA2012 - 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture Lima, Perú*. Repéré à <http://plea-arch.org/ARCHIVE/2012/files/T08-20120130-0048.pdf>, consulté le 30.05.2016.

GeMMe – Laboratoire des Matériaux de Construction. (2009). Rapport d'essai LMC/09/112. *Prefer, Essais pour l'agrément des panneaux préfabriqués à base de copeaux de bois minéralisés*. Document pdf reçu par email. Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège.

Grimont, R. (juin 2008). *Etude de la minéralisation et des mécanismes d'adhérence dans les bétons de bois*. Travail de fin d'études, Université de Liège.

Jelle, B.P. (2011). Traditional, State-of-the-Art and Future Thermal Building Insulation Materials and Solutions – Properties, Requirements and Possibilities. *Energy and Buildings* 43, n° 10: 2549-63.  
doi:10.1016/j.enbuild.2011.05.015.

Jolliet, O., Saadé, M., Crettaz, P. et Shaked, S. (2010). *Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan*. 2<sup>ème</sup> mise à jour et augmentée. Lausanne, Suisse : Presses polytechniques et universitaires romandes, 302 p.

Léonard, A. et Belboom, S. (2014). Analyse de cycle de vie – écoconception (CHIM0699). Université de Liège.

Menet, J-L. et Gruescu I-C. (2014). *L'éco-conception dans le bâtiment : en 37 fiches-outils*. Paris, France : Dunod, 392 p.

Minet, J. et Evrard, A. (2007). *Bétons de chanvre-chaux : un matériau composite durable pour la régulation hygrothermique des bâtiments*. UCL : Département d'architecture, d'urbanisme et de génie civil environnemental & Lhoist : Recherche et Développement. Document pdf reçu par email.

Mouton, Y. (2010). *Matériaux organiques spécifiques pour la construction*. Paris, France : Lavoisier, 368 p.

Oliva, J-P. (2009). *L'isolation écologique : conception, matériaux, mise en œuvre*. Mens, France : Terre vivante, 238 p.

Papadopoulos, A.M. (2005). State of the Art in Thermal Insulation Materials and Aims for Future Developments. *Energy and Buildings* 37, n° 1: 77-86.  
doi:10.1016/j.enbuild.2004.05.006.

Papadopoulos, A.M. et Giama, E. (2007). Environmental Performance Evaluation of Thermal Insulation Materials and Its Impact on the Building. *Building and Environment* 42, n°5: 2178-87. doi:10.1016/j.buildenv.2006.04.012.

Parmentier, V. (juin 2012). *Tentative de fixation du CO<sub>2</sub> dans les blocs de béton à base de fibres végétales et granulats recyclés*. Travail de fin d'études, Université de Liège.

Prefer. (2007). *Etude de faisabilité : Logement Basse énergie - Béton de Bois*. Document pdf reçu par email.

Prefer. (2008). *Texte pour cahier des charges des panneaux préfabriqués en béton de bois*. Document word reçu par email.

Prefer. (2008). *Dossier Architectes – Panneaux préfabriqués en béton de bois*. Document pdf reçu par email.



Roosen, M. (2016). *Sociologie dans ses rapports à l'architecture et à l'urbanisme : partie V - Chapitre I : territoires de vie et développement de la personne – Habiter*. Université de Liège.

Rosolen, W. (juin 2010). *Contribution à l'étude des bétons à granulats bio-sourcés et application au béton de miscanthus*. Travail de fin d'études, Université de Liège.

Ünal, O., Uygunoğlu, T. et Yildiz, A. (2007). Investigation of Properties of Low-Strength Lightweight Concrete for Thermal Insulation. *Building and Environment* 42, n° 2: 584-90. doi:10.1016/j.buildenv.2005.09.024.

Van den Heede, P. et De Belie, N. (2012). Environmental Impact and Life Cycle Assessment (LCA) of Traditional and 'green' Concretes: Literature Review and Theoretical Calculations. *Cement and Concrete Composites* 34, n° 4: 431-42. doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004. (Van den Heede et De Belie, 2012)

Walker, R., Pavia, S. et Mitchell, R. (2014). Mechanical Properties and Durability of Hemp-Lime Concretes. *Construction and Building Materials* 61: 340-48. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.02.065.

Yang, D., Sun, W., Liu, Z. et Zheng, K. (2003). Research on Improving the Heat Insulation and Preservation Properties of Small-Size Concrete Hollow Blocks. *Cement and Concrete Research* 33, n° 9: 1357-61. doi:10.1016/S0008-8846(03)00066-8.

## Normes

NBN EN 15498:2008. *Produits préfabriqués en béton - Blocs de coffrage en béton utilisant des copeaux de bois comme granulat - Propriétés et performances des produits*. Bruxelles.

EN 772-13:2000. *Méthodes d'essai des éléments de maçonnerie – Partie 13 : Détermination de la masse volumique absolue sèche et de la masse volumique apparente sèche des éléments de maçonnerie (excepté les pierres naturelles)*. Bruxelles.

NBN EN 12390-7:2000. *Essai pour béton durci – Partie 7 : Masse volumique du béton durci (+AC:2004)*. Bruxelles.

EN ISO 12572:2011. *Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment – Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau*.

ISO 8302:1991. *Isolation thermique – Détermination de la résistance thermique et des propriétés connexes en régime stationnaire – Méthode de la plaque chaude gardée*.

NBN EN1542:1999. *Produits et systèmes pour la protection et le réparation des structures en béton – Méthodes d'essais – Mesurage de l'adhérence par traction directe*.

EN 772-1:2000. *Méthodes d'essai des éléments de maçonnerie – Partie 1 : Détermination de la résistance à la compression*. Bruxelles.

NBN EN 12390-3:2009. *Essais pour béton durci – Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes (+AC:2011)*. Bruxelles.

EN 15026:2008. *Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments – Evaluation du transfert d'humidité par simulation numérique.*

EN 15804+A1:2014. *Contribution des ouvrages de construction au développement durable – Déclarations environnementales sur les produits – Règles régissant les catégories de produits de construction.*

EN 15978:2012. *Contribution des ouvrages de construction au développement durable – Évaluation de la performance environnementale des bâtiments - Méthode de calcul.*

ISO 14010:1996. *Lignes directrices pour l'audit environnemental – Principes généraux.*

ISO 14044:2006. *Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices.*

## Ressources internet

118000 SAS. (2015). *Construction maison : un bloc en déchets de bois.* Repéré à <http://www.maison-construction.com/autoconstruction-blocs/construction-maison-un-bloc-surprenant.html#.VsrlxcevJGg>, consulté le 22.02.2016.

aPROpaille. (2015). *Accueil.* Repéré à <http://projets.icedd.be/apropaille/index.php/fr/>, consulté le 17.03.2016.

ARPE Midi-Pyrénées SPL. (2010). *Fiche matériau : brique monomur terre cuite.* Document pdf. Repéré à [https://www.arpe-mip.com/files/EXPO\\_ECOMAT2008/MA01\\_fiche\\_materiau\\_brique\\_monomur\\_terre\\_cuite.pdf](https://www.arpe-mip.com/files/EXPO_ECOMAT2008/MA01_fiche_materiau_brique_monomur_terre_cuite.pdf), consulté le 15.03.2016.

Aufray, M. (2009). *Adhésion et adhérence des matériaux.* Document pdf. Repéré à <http://maelenn.aufray.free.fr/cours/adhesion-adherence-2009.pdf>, consulté le 13.05.2016.

Baehrel. (2013). *Blocs de coffrage, déclaration des performances n°2.* Document pdf. Repéré à [http://www.beton-baehrel.com/medias/certificats/blocs\\_de\\_coffrage\\_en\\_beton.pdf](http://www.beton-baehrel.com/medias/certificats/blocs_de_coffrage_en_beton.pdf), consulté le 22.02.2016.

BelAlternative sprl. (2009). *Le Miscanthus dans la construction.* Repéré à <http://www.belalternative.be/AlternHome-le-Miscanthus.html>, consulté le 13.03.2016.

Béton de la Lomme s.a. *Blocs de coffrage StepocLomme.* Repéré à <http://www.betondelalomme.be/fr/blocs-coffrage-stepoclomme>, consulté le 6.03.2016.

Bionergies. (2008). *Legnobloc: document technique d'application.* Document pdf. Repéré à <http://www.travauxchezvous.fr/pdf/document-technique-dapplication.pdf>, consulté le 22.02.2016.

Biot, B. (2015). Plate-forme Maison Passive asbl, service hygrothermie. *Rapport d'expertise.* Document pdf. Repéré à [http://relay.maisonpassive.be/pmp-hygrothermie/?page\\_id=281](http://relay.maisonpassive.be/pmp-hygrothermie/?page_id=281), consulté le 16.04.2016.

Blocalians. *Gamme bloc béton*. Repéré à [http://www.blocalians.fr/index.php?option=com\\_content&view=article&id=5&Itemid=3](http://www.blocalians.fr/index.php?option=com_content&view=article&id=5&Itemid=3), consulté le 29.02.2016.

Branders, A. (2011). *WUFI®*. Document pdf. Repéré à [http://www.bepassive.be/bonus/\\_details/wufi2d.pdf](http://www.bepassive.be/bonus/_details/wufi2d.pdf), consulté le 16.04.2016.

Celtys. (2013). *DoP: Blocs de coffrage Verticals-blocs*. Document d'accompagnement intégrant la DdP. Document pdf. Repéré à <http://www.celtys.fr/medias/3/7/9/11/1382703003.pdf>, consulté le 15.05.2016.

Coeck. (2012). *Blocs en béton*. Repéré à <http://www.coeck.be/fr/producten/>, consulté le 6.03.2016.

CSTB (2009). *Avis Technique 16/09-584: RTh*. Document pdf. Repéré à <http://www.perinetcie.fr/bloc-rth/>, consulté le 4.03.2016.

CSTB (2012). *Document Technique d'Application. Référence Avis Technique 16/12-642: Thermibloc*. Document pdf. Repéré à <http://www.cstb.fr/pdf/atec/GS16-Q/AQ120642.pdf>, consulté le 22.02.2016.

CSTC, Division Energie et Climat. (2009). *Matériau d'isolation thermique*. Document pdf. Repéré à [http://www.epbd.be/media/pdf/donnees\\_produits\\_peb/procedures/doc\\_1\\_1\\_S\\_a\\_FR\\_isolant%20thermique\\_v2\\_2\\_20090804.pdf](http://www.epbd.be/media/pdf/donnees_produits_peb/procedures/doc_1_1_S_a_FR_isolant%20thermique_v2_2_20090804.pdf), consulté le 10.04.2016.

Deutsches Institut für Bautechnik. (2013). *(Fixolite) European Technical Approval ETA-13/0256*. Document pdf. Repéré à <http://www.fixolite.be/sites/fixolite.be/files/Zulassung%20ETA-13-0256%20EN.pdf>, consulté le 22.02.2016.

Deutsches Institut für Bautechnik. (2013). *(Isospan) Europäische Technische Zulassung ETA-05/0261*. Document pdf. Repéré à <http://www.isospan.eu/fr/download.html>, consulté le 22.02.2016.

DGO4 et CIFFUL. (2015). *Le guide PEB*. Document pdf. Repéré à [http://www.leguidepeb.be/images/divers/le\\_guide\\_PEB\\_2015\\_BIS.pdf](http://www.leguidepeb.be/images/divers/le_guide_PEB_2015_BIS.pdf), consulté le 18.03.2016.

Doubeton. (2014). *Blocs à empiler*. Document pdf. Repéré à [http://www.doubeton-blocks.be/pdf\\_dop/fr/BLOCS%20A%20EMPILER%20ST06.pdf](http://www.doubeton-blocks.be/pdf_dop/fr/BLOCS%20A%20EMPILER%20ST06.pdf), consulté le 15.03.2016.

Douterloigne. (2012). *Fiche technique – Blocs à empiler*. Document pdf. Repéré à [http://www.douterloigne.be/images/dbimages/docs/02\\_13\\_BB\\_FR\\_FICHE\\_STAPELBLOK.pdf](http://www.douterloigne.be/images/dbimages/docs/02_13_BB_FR_FICHE_STAPELBLOK.pdf), consulté le 15.03.2016.

Easy-Therm. *Le bloc béton nouvel R*. Repéré à <http://www.easy-therm.fr>, consulté le 6.03.2016.

Ecobati Scrl. *Maison passive*. Repéré à <http://www.ecobati.be/fr/services/conseils/lexique/passive.html>, consulté le 31.05.2016.

Energie+, Architecture et Climat, Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI), Université catholique de Louvain, réalisé avec le soutien de la Wallonie - DGO4. *La conductivité thermique des matériaux*. Repéré à <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15348>, consulté le 28.02.2016.

Fédération Française des Tuiles et Briques (FFTB). (2016). *Monomur : qu'est ce que c'est ?* Repéré à <http://www.monomur.com/le-produit/monomur-qu-est-ce-que-c-est/>, consulté le 6.03.2016.

Fixolite s.a. *Blocs de coffrage isolant*. Repéré à <http://www.fixolite.be/fr/produits/blocs-coffrage-isolant>, consulté le 22.02.2016.

Fixolite. (2009). Brochure : *Blocs de construction isolants en aggloméré bois-ciment. La performance au service de l'éco-construction*. Document pdf. Repéré à [http://www.fixolite.be/sites/fixolite.be/files/Brochure\\_Blocs\\_Fixolite\\_ENTETE\\_VERTEmodif.pdf](http://www.fixolite.be/sites/fixolite.be/files/Brochure_Blocs_Fixolite_ENTETE_VERTEmodif.pdf), consulté le 22.02.2016.

Heinrick&Bock. (2013). Bloc de coffrage, déclaration des performances n°HBWBC01. Document pdf. Repéré à <http://www.heinrich-bock.com/files/HBWBC01-blocs-coffrage.pdf>, consulté le 22.05.2016.

Hilti Belgium. (2012). Hubaut Eric pour Prefer. *Compte rendu d'essais de traction*. Document pdf reçu par email.

Holcim s.a. (2011). *CEM III/A 42,5 N LA*. Document pdf. Repéré à [http://www.holcim.be/fileadmin/templates/BE/doc/Produits\\_et\\_services/cement/catalogue/OB\\_CEMIIIA425NLA\\_C0123\\_FR.pdf](http://www.holcim.be/fileadmin/templates/BE/doc/Produits_et_services/cement/catalogue/OB_CEMIIIA425NLA_C0123_FR.pdf), consulté le 7.04.2016.

IsoHemp s.a. (2014). *Guide de mise en œuvre*. Document pdf. Repéré à <http://isohemp.be/wp-content/uploads/2014/01/Guide-mise-en-oeuvre-IsoHemp-2.0.pdf>, consulté le 10.03.2016.

Isolabloc. (2015). *Le futur se construit*. Repéré à <http://www.isolabloc.fr>, consulté le 22.02.2016.

Isospan Baustoffwerk GmbH. (2014). Brochure : *Spécifications techniques et programme de livraison*. Document pdf. Repéré à <http://www.isospan.eu/fr/download.html>, consulté le 22.02.2016.

Isospan Euregio. (2015). *La formule pour le Bloc Bois Ciment*. Repéré à <http://www.isospan-euregio.nl/fr/>, consulté le 22.02.2016.

Isotex Srl. (2015). *Catalogue produits*. Document pdf. Repéré à <http://www.blocchiisotex.com/wp-content/uploads/2015/07/Prodotti.pdf>, consulté le 22.02.2016.

Isotex Srl. (2015). *La gamme des blocs Isotex*. Repéré à <http://www.isotexfrance.com/les-blocs-isotex/>, consulté le 22.02.2016.

Isover France. (2012). *Plumes de canard*. Repéré à <http://www.toutsurlisolation.com/Choisir-son-isolant/Les-isolants/Isolants-en-laines-animales/Plumes-de-canard>, consulté le 18.03.2016.

Istituto Giordano S.p.A.. (2010). *Rapport d'essai N.271003*. Document pdf Repéré à [http://www.blocchiisotex.com/wp-content/uploads/2015/07/RAPPORT-D\\_ESSAI\\_271003\\_LAMBDA-Ia.pdf](http://www.blocchiisotex.com/wp-content/uploads/2015/07/RAPPORT-D_ESSAI_271003_LAMBDA-Ia.pdf), consulté le 22.02.2016.

Ke, Y., Beaucour, A.L., Ortola, S., Dumontet, H. et Cabrillac, R. (2006). *Comportement mécanique des bétons de granulats légers : étude expérimentale et modélisation*. Document pdf. Repéré à [http://oldgc.iut-nimes.fr/internet/augc/Papiers/046\\_ke.pdf](http://oldgc.iut-nimes.fr/internet/augc/Papiers/046_ke.pdf), consulté le 17.03.2016.

Lamure, A. (2006). *Adhésion et adhérence des matériaux*. Document pdf. Repéré à [http://www.inp-toulouse.fr/\\_ressources/documents/TICE/Mat%25C3%25A9riaux%2520et%2520polym%25C3%25A8res/01Extrait\\_Adhesion\\_et\\_Adherence.pdf?download=true](http://www.inp-toulouse.fr/_ressources/documents/TICE/Mat%25C3%25A9riaux%2520et%2520polym%25C3%25A8res/01Extrait_Adhesion_et_Adherence.pdf?download=true), consulté le 13.05.2016.

Legnobloc Srl. (2016). Legnobloc. Repéré à <http://www.gruppolegnobloc.it>, consulté le 22.02.2016.

Legnobloc France. (2011). *Brochure : Construire avec la Nature. Bloc à bancher écologique bois et ciment*. Document pdf. Repéré à <http://www.ebs-surelevation.fr/wp-content/uploads/2013/09/LEGNOBLOC-MURS.pdf>, consulté le 22.02.2016.

Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer. (2015). *Produits de construction et matériaux bio-sourcés*. Repéré à <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Produits-de-construction-et.html>, consulté le 28.03.2016.

Pauchet, W. (2004). *Les granulats légers*. Référence TBA1112. Repéré à <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-th3/techniques-du-batiment-construire-en-beton-arme-43805210/les-granulats-legers-tba1112/>, consulté le 29.02.2016.

Pauchet, W. (2005). *Les bétons spéciaux - les bétons de granulats végétaux*. Référence TBA1022. Repéré à <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-th3/techniques-du-batiment-connaître-les-matériaux-de-la-construction-43804210/les-betons-speciaux-tba1022/les-betons-de-granulats-vegetaux-sl10054913.html>, consulté le 24.03.2016.

Plessis-Montafidou, A. et Barthou, B. (2011). *Consultation technologique, rapport Easy-Therm*. CERIB. Document pdf. Repéré à <http://blog.easy-therm.fr/performance-thermique-easytherm>, consulté le 25.02.2016.

Prefer, Groupe Gustave Portier Industries SA. *Blocs en béton*. Repéré à <http://www.prefer.be/pages/0125/BLOCS-EN-BETON.fr.php>, consulté le 2.02.2016.

Robischon, C. (2014). *Performance énergétique : même maison, calculs différents entre France, Allemagne et Suisse*. Repéré à <http://www.lemoniteur.fr/article/performance-energetique-meme-maison-calculs-differents-entre-france-allemande-et-suisse-24745431>, consulté le 28.03.2016.

RVO : De Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (2015). *Energieprestatie (EPC)*. Repéré à <http://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/gebouwen/energieprestatie>, consulté le 29.03.2016.

Service Public Fédéral Belge. (2016). *Certificats de performance énergétique*. Repéré à [http://www.belgium.be/fr/environnement/consommation\\_durable/economie\\_d\\_energie/labels/construction](http://www.belgium.be/fr/environnement/consommation_durable/economie_d_energie/labels/construction), consulté le 28.03.2016.

Show Les Pixels. (2013). *Legnobloc RT 2012 Maison Passive BBC parpaing agglomur autoconstructeur - Officiel SwPx*. [Vidéo]. Repéré à [https://www.youtube.com/watch?v=tqNx\\_Jqc-b8](https://www.youtube.com/watch?v=tqNx_Jqc-b8), consulté le 22.02.2016.

Servaes, R., Allacker, K., Debacker, W., Delem, L., De Nocker, L., De Troyer, F., Janssen, A., Peeters, K., Spirinckx, C. et Van Dessel, J. (2013). Profil environnemental des éléments de construction. Document pdf. Repéré à <http://www.ovam.be/sites/default/files/atoms/files/Profil-Environmental-2015.pdf>, consulté le 25.05.2016.

Xelis Groupe. (2015). *Qu'est-ce que le Thermibloc ?* Repéré à <http://www.thermibloc.fr/le-thermibloc/qu-est-ce-que-le-thermibloc/>, consulté le 22.02.2016.

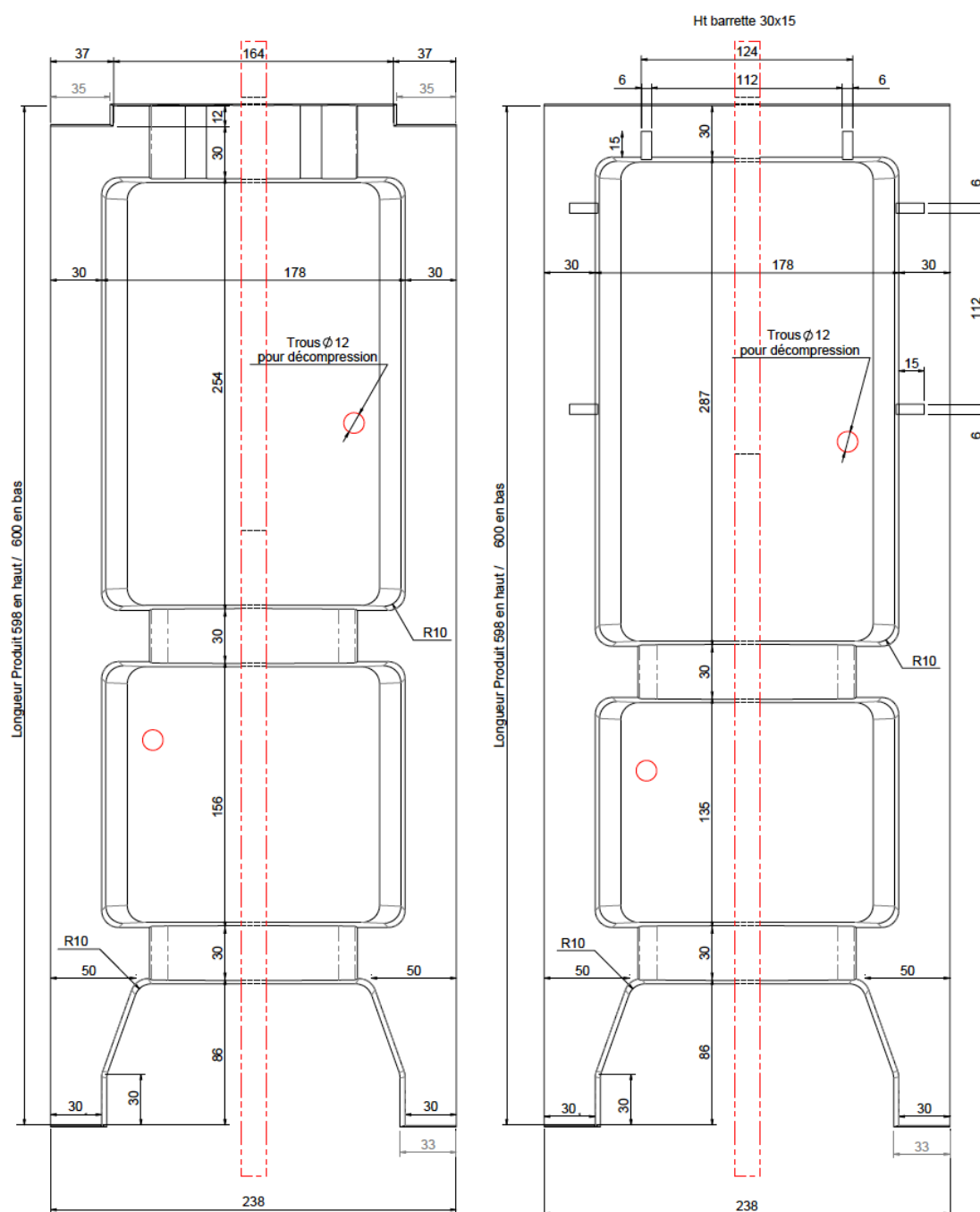
Xelis Groupe. (2014). *Eco-construire en Bloc Monomur Isolant Thermibloc*. Document pdf. Repéré à [http://www.xelis-groupe.fr/wp-content/uploads/2016/01/FLYER\\_4\\_PAGES2013.pdf](http://www.xelis-groupe.fr/wp-content/uploads/2016/01/FLYER_4_PAGES2013.pdf), consulté le 6.03.2016.


Xelis Groupe. (2014). *Fiche technique : bloc à bancher Thermibloc*. Document pdf. Repéré à <http://www.xelis-groupe.fr/espace-pro/documentation/>, consulté le 22.02.2016.

# ANNEXES



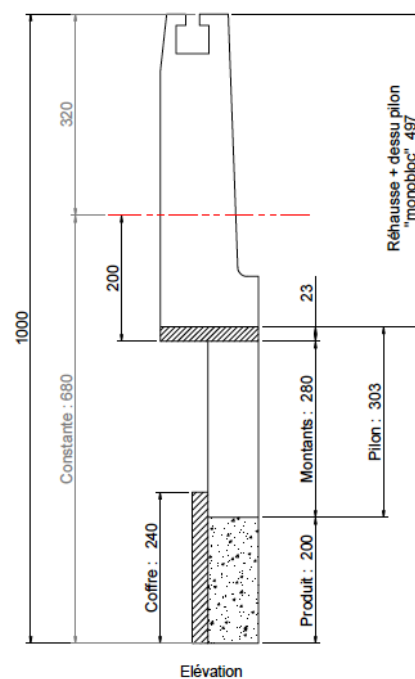
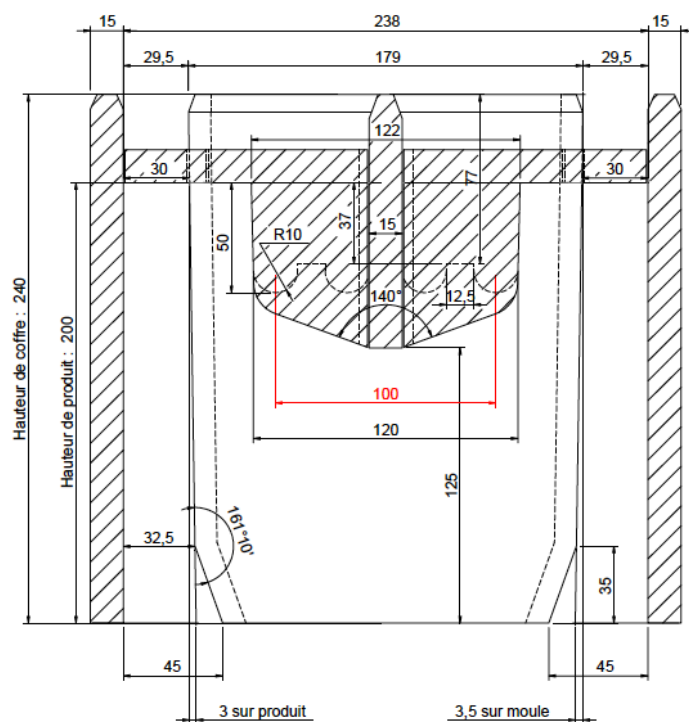
## Futur moule bloc de coffrage Prefer



<b>Client : PREFER</b>	<b>10 produits comprenant :</b>	
<b>N° de moule : 3B-4 /1</b>	9 produits standards	
Moule à STEPOC 24 x 20 x 60	1 produit d'angle	
<b>Presse : Quadra 12</b>		
Barrettes 77 x 15		

Ce document est la propriété de RAMPF GROUP. Il ne peut être reproduit ou communiqué sans leur autorisation écrite ( loi du 14 Juillet 1909 )

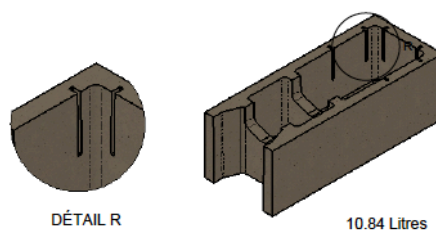
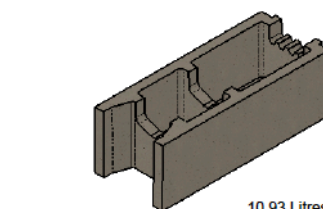
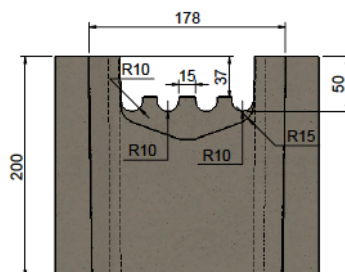
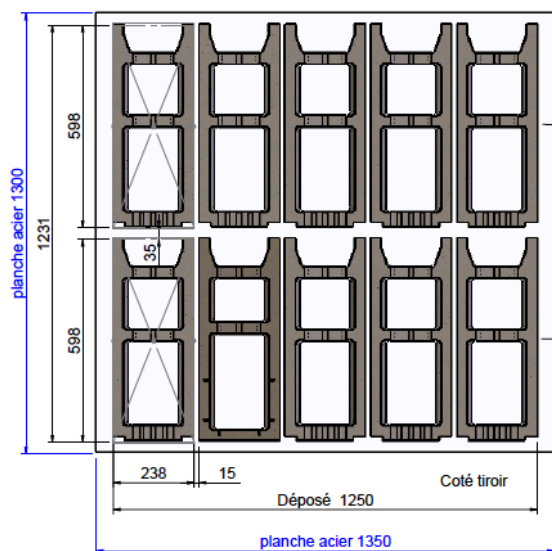
tirage du : 19/01/2016




## Barrette Mi Dur

Disposition des produits sur la planche  
Vue de dessus

Côté grande table



Planches métalliques

Client : PREFER	10 produits comprenant :	
N° de moule : 3B-4 /1	9 produits standards	
Moule à STEPOC 24 x 20 x 60	1 produit d'angle	
Presse : Quadra 12		
Barrettes 77 x 15		

Ce document est la propriété de RAMPF GROUP. Il ne peut être reproduit ou communiqué sans leur autorisation écrite ( loi du 14 Juillet 1909 )

tirage du : 19/01/2016

## Recette 1



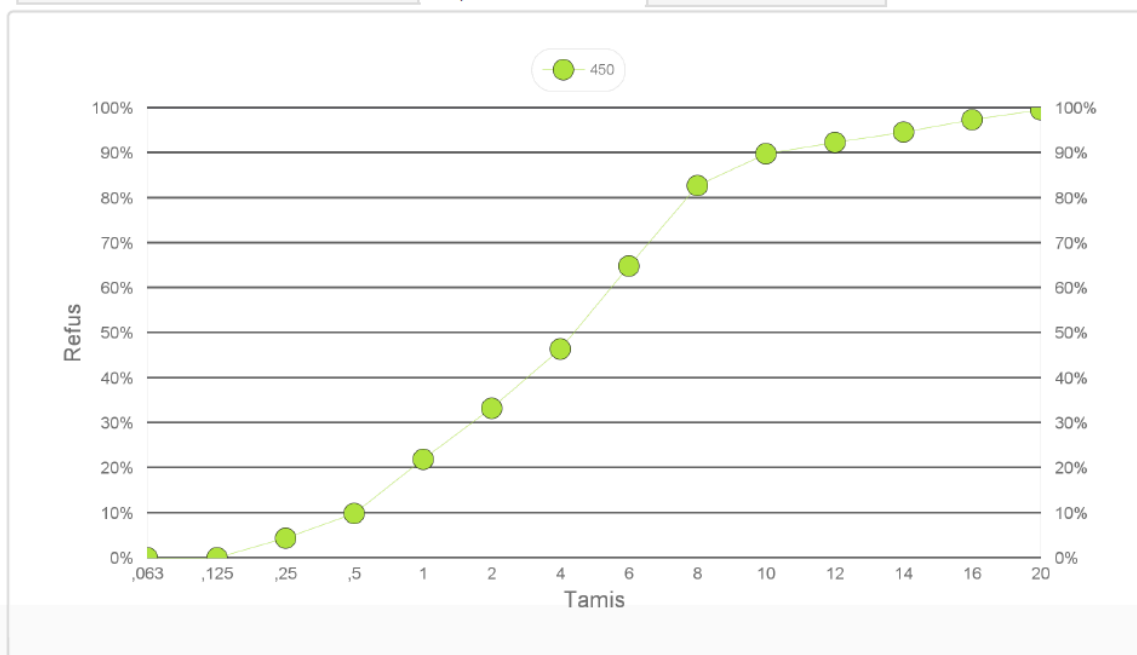
### RECETTE

DOC LAB 02 04  
Rév 0 - 08/08/2015

Produit Bloc Résistance à 28 J: Classe de Béton bois - Scorie  
NuméroRecette 450 à 1J: résistance :  
Date de modification 15/10/2015 7J:

Fournisseur	Type	Matière première	Masse SEC	Volume	Alcalin	Bilan Alcalin
Rheinische	Agrégat	Sable 0/2		0,00l	0,0001	0,000kg/m³
Cameuse	Agrégat	CC 2/6		0,00l	0,0001	0,000kg/m³
Carrières et fours à Chaux	Agrégat	CC 2/8		0,00l	0,0001	0,000kg/m³
Cameuse	Agrégat	CC 0/2 - 0/4		0,00l	0,0001	0,000kg/m³
BauMineral	Agrégat	Scorie	130kg	100,00l		0,000kg/m³
CCB	Ciment	CEM III 42,5 A	180kg	60,00l	0,009	1,820kg/m³
CILE	EAU	Eau	200kg	200,00l		0,000kg/m³
Argex	Agrégat	Argex 4/8 - AM 4/8 650		0,00l		
Argex	Agrégat	Argex 0/4 AR 0/4 650		0,00l		
BRS Collas	Agrégat	CC 2/8		0,00l	0,0001	0,000kg/m³
Prefer	Agrégats	Copeaux de bois	290kg	483,33l		0,000kg/m³

AIR	20,00%	169l		
TOTAL	800kg	1012l		
Total sec	600kg		Bilan Alcalin / Chlorure	1,62kg/m³ / 0,100%
E/C	1,111		Volume Pâte/Gravier	260l 583l
E/C Efficace	1,111		Teneur en fines	186kg



## Recette 2

prefer®

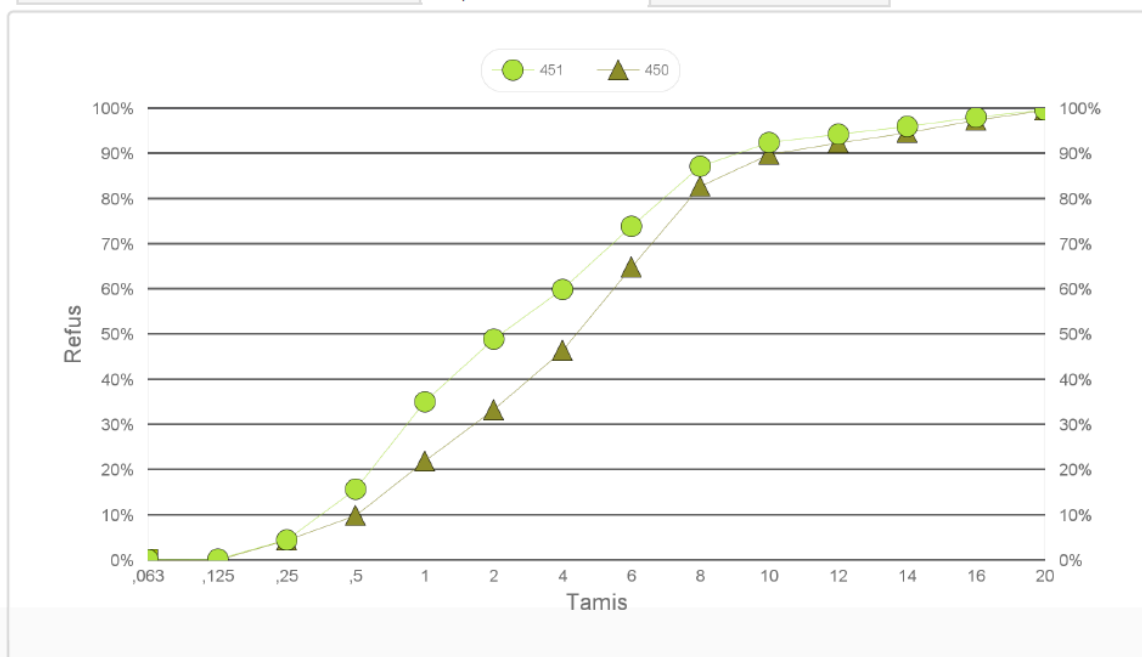
### RECETTE

DOC LAB 02 04  
Rév 0 - 08/08/2015

Produit Bloc Résistance à 28 J: Classe de Béton bois - Scorie -  
NuméroRecette 451 à 28 J: résistance :  
Date de modification 1J: 7J:

Fournisseur	Type	Matière première	Masse SEC	Volume	Alcalin	Bilan Alcalin
Rheinische	Agrégat	Sable 0/2	45kg	16,98l	0,0001	0,005kg/m³
Cameuse	Agrégat	CC 2/6		0,00l	0,0001	0,000kg/m³
Carrières et fours à Chaux	Agrégat	CC 2/8		0,00l	0,0001	0,000kg/m³
Cameuse	Agrégat	CC 0/2 - 0/4		0,00l	0,0001	0,000kg/m³
BauMineral	Agrégat	Scorie	130kg	100,00l		0,000kg/m³
CCB	Ciment	CEM III 42,5 A	200kg	66,67l	0,009	1,800kg/m³
CILE	EAU	Eau	200kg	200,00l		0,000kg/m³
Argex	Agrégat	Argex 4/8 - AM 4/8 650		0,00l		
Argex	Agrégat	Argex 0/4 AR 0/4 650		0,00l		
BRS Collas	Agrégat	CC 2/8		0,00l	0,0001	0,000kg/m³
Prefer	Agrégats	Copeaux de bois	280kg	466,67l		0,000kg/m³

AIR	20,00%	170l		
TOTAL	855kg	1020l		
Total sec	655kg		Bilan Alcalin / Chlorure	1,80kg/m³ / 0,102%
E/C	1,000		Volume Pâte/Gravier	267l 584l
E/C Efficace	0,998		Teneur en fines	208kg



## Recette 3



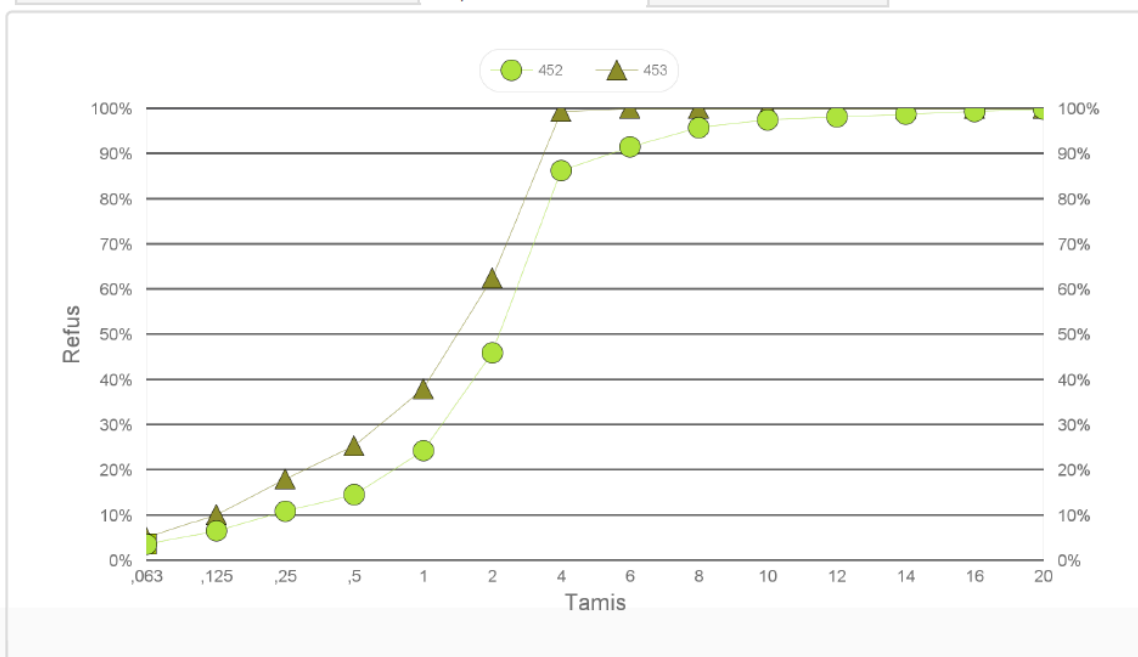
### RECETTE

DOC LAB 02 04  
Rév 0 - 08/08/2015

Produit Bloc Résistance à 28 J: Classe de Béton bois - Scorie Argex  
NuméroRecette 452 à 28 J:  
Date de modification 15/10/2015 1J:  
7J:

Fournisseur	Type	Matière première	Masse SEC	Volume	Alcalin	Bilan Alcalin
Rheinische	Agrégat	Sable 0/2		0,00l	0,0001	0,000kg/m³
Cameuse	Agrégat	CC 2/6		0,00l	0,0001	0,000kg/m³
Carrières et fours à Chaux	Agrégat	CC 2/8		0,00l	0,0001	0,000kg/m³
Cameuse	Agrégat	CC 0/2 - 0/4		0,00l	0,0001	0,000kg/m³
BauMineral	Agrégat	Scorie	40kg	30,77l		0,000kg/m³
CCB	Ciment	CEM III 42,5 A	200kg	66,67l	0,009	1,800kg/m³
CILE	EAU	Eau	200kg	200,00l		0,000kg/m³
Argex	Agrégat	Argex 4/8 - AM 4/8 650		0,00l		
Argex	Agrégat	Argex 0/4 AR 0/4 650	125kg	104,17l		0,000kg/m³
BRS Collas	Agrégat	CC 2/8		0,00l	0,0001	0,000kg/m³
Prefer	Agrégats	Copeaux de bois	250kg	416,67l		0,000kg/m³

AIR	20,00%	164l		
TOTAL	815kg	982l		
Total sec	615kg		Bilan Alcalin / Chlorure	1,80kg/m³ / 0,100%
E/C	1,000		Volume Pâte/Gravier	267l 552l
E/C Efficace	1,000		Teneur en fines	218kg



## Recette 4



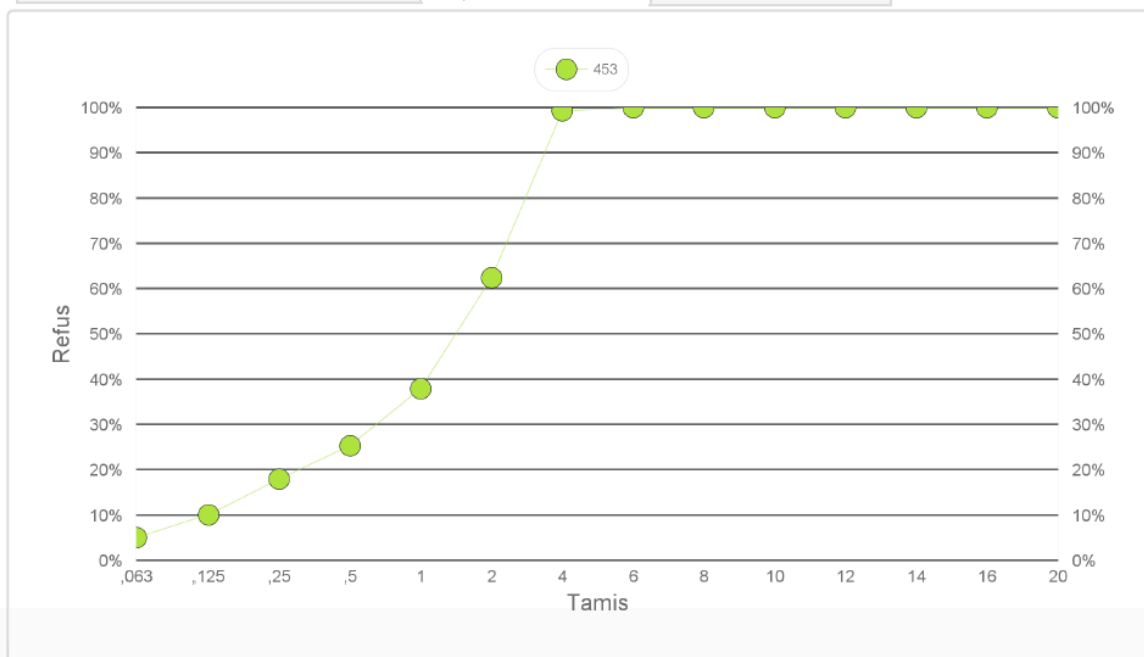
### RECETTE

DOC LAB 02 04  
Rév 0 - 08/08/2015

Produit Bloc Résistance à 28 J: Classe de résistance : Béton bois - Argex - CC0/2  
 NuméroRecette 453  
 Date de modification 15/10/2015 1J: 7J:

Fournisseur	Type	Matière première	Masse SEC	Volume	Alcalin	Bilan Alcalin
Rheinische	Agrégat	Sable 0/2		0,00l	0,0001	0,000kg/m³
Cameuse	Agrégat	CC 2/6		0,00l	0,0001	0,000kg/m³
Carrières et fours à Chaux	Agrégat	CC 2/8		0,00l	0,0001	0,000kg/m³
Cameuse	Agrégat	CC 0/2 - 0/4	45kg	17,31l	0,0001	0,005kg/m³
BauMineral	Agrégat	Scorie		0,00l		
CCB	Ciment	CEM III 42,5 A	200kg	66,67l	0,009	1,800kg/m³
CILE	EAU	Eau	210kg	210,00l		0,000kg/m³
Argex	Agrégat	Argex 4/8 - AM 4/8 650		0,00l		
Argex	Agrégat	Argex 0/4 AR 0/4 650	125kg	104,17l		0,000kg/m³
BRS Collas	Agrégat	CC 2/8		0,00l	0,0001	0,000kg/m³
Prefer	Agrégats	Copeaux de bois	290kg	483,33l		0,000kg/m³

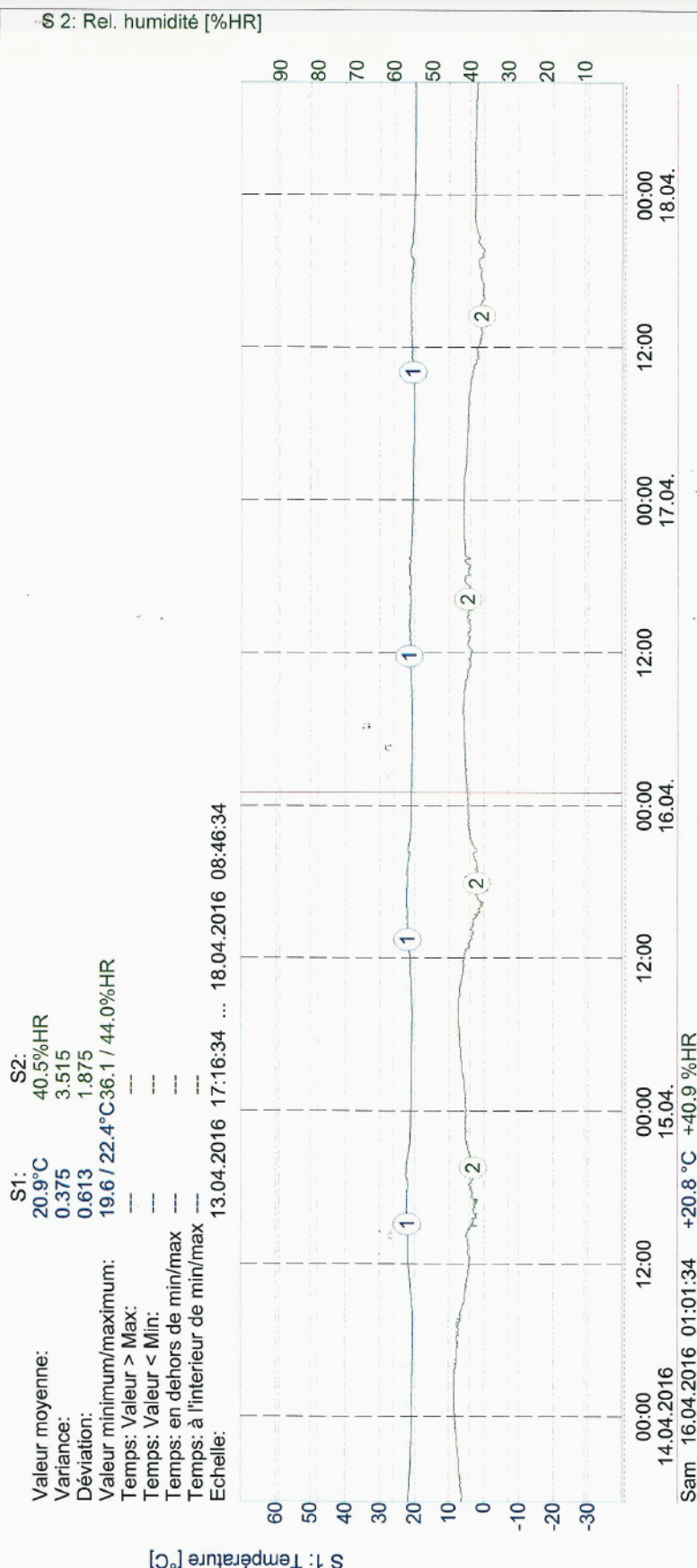
AIR	20,00%	176l		
TOTAL	870kg	1058l		
Total sec	660kg		Bilan Alcalin / Chlorure	1,80kg/m³ / 0,102%
E/C	1,050		Volume Pâte/Gravier	277l 605l
E/C Efficace	1,050		Teneur en fines	231kg



## Température et humidité relative labo



Ecolog TH2 ID:87734 ID-S2:201124037  
 Date de lecture: 18.04.2016 09:33:51  
 Intervalle d'enregistrement: 3 min  
 Description du module:  
 Description données:  
 \\FSALMC04\Doc temporaire\Marie relevé local 0-839.MDF





## Masse volumique

	Blocs	Longueur [cm]	largeur [cm]	Hauteur [cm]	Volume extérieur [cm3]	Volume apparent [cm3]	Masse [g]	Masse volumique apparente [kg/m3]	Remarques
Vides	1V1	38,9	13,8	19,6	10521,7	7100,2	5122	721,38	3 fissures
	1V2	38,9	13,8	19,5	10468,0	7020,1	5322	758,11	Tru au fond, fissures 2 cotés
	1V3	38,7	13,6	19,4	10210,6	6775,5	4943	729,54	Fissure haut 1 coté
	1V4	38,9	13,6	19,7	10422,1	7000,6	5017	716,65	Fissure 1 coté, 1 coin abimé et 1 milieu arrete coté abimé
	2V1	38,8	13,8	20,2	10815,9	7418,2	6306	850,07	3 fissures, 1 coin abimé
	2V2	38,7	13,5	19,9	10396,8	7003,8	6023	859,97	fissures 2 cotés
	2V3	39	13,7	19,7	10525,7	7116,7	5877	825,81	3 fissures, 1 coin abimé
	2V4	39	13,6	19,8	10501,9	7106,9	6039	849,73	3 fissures, 1 coin abimé
	3V1	39,4	13,6	20	10716,8	7347,6	6099	830,07	/
	3V2	38,9	14,2	19,9	10992,4	7480,6	5878	785,77	fissures 2 cotés, 1 coin abimé
	3V3	38,7	13,7	20	10603,8	7268,9	5924	814,97	3 fissures
	3V4	38,8	13,5	19,6	10266,5	6873,5	6041	878,89	/
	4V1	39	13,7	20,4	10899,7	7426,1	5950	801,23	arrete et coin abimés
	4V2	39,2	13,9	20,5	11170,0	7773,1	5967	767,65	3 fissures, 1 arrete abimée
	4V3	39,2	13,7	19,8	10633,4	7228,7	5766	797,65	Milieu d'arrete abimé
	4V4	39	13,5	19,8	10424,7	7031,7	5657	804,50	Ségrégation: fines dans le bas
Remplis	1R1	38,9	13,8	19,3	10360,6	10360,6	11878	1146,46	Pas rempli totalement, déborde, 2 fissures
	1R2	38,7	13,8	19,3	10307,4	10307,4	11661	1131,33	2 fissures, coulée sur 1 coté
	2R1	39	13,7	20	10686,0	10686,0	13000	1216,55	Pas rempli totalement, 2 fissures, coulées cotés
	2R2	39	13,9	19,8	10733,6	10733,6	12581	1172,12	Déborde, 2 fissures, coulées sur 1 coté
	3R1	39	13,8	20	10764,0	10764,0	13418	1246,56	Pas rempli totalement, déborde
	3R2	38,9	13,8	20,2	10843,8	10843,8	13194	1216,74	Déborde, coulées
	4R1	39,1	14	20,6	11276,4	11276,4	13642	1209,78	Fissure 1 coté, arrete abimée, coulées
	4R2	39,1	13,9	20,5	11141,5	11141,5	13338	1197,14	Pas rempli totalement, déborde
Remplis humides	1Rh3	38,6	13,7	19,2	10153,3	10153,3	13463	1325,97	Pas rempli totalement, déborde, 2 fissures, coulée
	1Rh4	38,8	13,6	19,1	10078,7	10078,7	14131	1402,07	Dépôt blanc sur 2 faces, 2 fissures, déborde

	2Rh3	39,1	13,7	20,1	10767,0	10767,0	15244	1415,81	Coulée, déborde, 2 fissures, arrete/coin abimé
	2Rh4	39,1	13,7	20	10713,4	10713,4	15229	1421,49	Coulée, déborde, 2 fissures, arrete abimée
	3Rh3	39	13,8	20,1	10817,8	10817,8	15446	1427,83	Pas rempli totalement, déborde, coulée, 1 fissure, 1 coin abimé
	3Rh4	39,2	13,8	20,2	10927,4	10927,4	15593	1426,96	Coulée, déborde, 1 début fissure
	4Rh3	39	13,8	20,3	10925,5	10925,5	15664	1433,72	Déborde, dépot blanc sur 1 face, coulée sur 1 face
	4Rh4	39	13,7	20	10686,0	10686,0	15287	1430,56	Déborde, coulée
Cubes	4-1	14,7	14,7	14,8	3198,1	3198,1	2438,6	762,51	/
	4-2	14,6	14,7	14,8	3176,4	3176,4	2404,6	757,03	/
	4-3	14,8	14,7	14,9	3241,6	3241,6	2430,9	749,90	/
Nouveaux remplis	3-1	14,8	14,8	14,8	3241,8	3241,8	2704,9	834,38	/
	3-2	14,7	14,7	14,8	3198,1	3198,1	2723,8	851,68	/
	1R5	38,6	13,7	19	10047,6	10047,6	12240	1218,20	Déborde, 1 début fissure
	1R6	38,6	14	19	10267,6	10267,6	12533	1220,64	Coin bas abimé, déborde, 1 fissure
	1R7	38,8	13,9	19,8	10678,5	10678,5	13096	1226,39	Déborde peu, 1 fissure
	1R8	38,7	13,9	19,3	10382,0	10382,0	11280	1086,49	1 coin abimé
	1R9	38,6	13,8	18,8	10014,4	10014,4	11045	1102,91	2 débuts fissures
	2R5	38,7	13,7	20	10603,8	10603,8	13215	1246,25	Déborde peu, 2 débuts fissures
	2R6	39	13,7	19,7	10525,7	10525,7	13063	1241,06	Arrete abimée
	2R7	39,1	13,9	20,1	10924,1	10924,1	13572	1242,39	Deborde peu
	2R8	39,1	13,8	20	10791,6	10791,6	13365	1238,46	Deborde peu
	2R9	39	13,8	19,9	10710,2	10710,2	12990	1212,86	/
	3R5	39	13,9	19,8	10733,6	10733,6	13372	1245,81	Déborde, 1 fissure
	3R6	39,2	13,7	20	10740,8	10740,8	14108	1313,50	Déborde, coulée
	3R7	39	13,8	19,7	10602,5	10602,5	13440	1267,62	Déborde peu
	3R8	38,9	14	19,6	10674,2	10674,2	13039	1221,55	/
	3R9	39	13,9	19,9	10787,8	10787,8	12902	1195,98	Déborde peu
	4R5	39,1	13,9	20,3	11032,8	11032,8	13014	1179,57	Coin abimé
	4R6	39,3	13,8	20,4	11063,7	11063,7	13254	1197,97	Déborde peu
	4R7	39,2	13,9	20,5	11170,0	11170,0	13871	1241,80	Déborde
4R8	39	13,8	20,5	11033,1	11033,1	13128	1189,87	2 coins abimés	
4R9	38,9	14	20,1	10946,5	10946,5	13055	1192,62	2 fissures, déborde peu	

Blocs	Vide 1				Vide 2			
	Longueur [cm]	largeur [cm]	Hauteur [cm]	Volume [cm3]	Longueur [cm]	largeur [cm]	Hauteur [cm]	Volume [cm3]
1V1	14,3	6,6	18	1698,8	14,5	6,6	18	1722,6
1V2	14,5	6,8	18	1774,8	14,3	6,5	18	1673,1
1V3	14,5	6,6	18	1722,6	14,2	6,7	18	1712,5
1V4	14,5	6,6	18	1722,6	14,3	6,6	18	1698,8
2V1	14,3	6,6	18	1698,8	14,3	6,6	18	1698,8
2V2	14,5	6,5	18	1696,5	14,5	6,5	18	1696,5
2V3	14,5	6,5	18	1696,5	14,2	6,7	18	1712,5
2V4	14,3	6,7	18	1724,6	14,5	6,4	18	1670,4
3V1	14,3	6,6	18	1698,8	14,5	6,4	18	1670,4
3V2	14,5	6,6	18	1722,6	14,2	7	18	1789,2
3V3	14,3	6,7	18	1724,6	14,2	6,3	18	1610,3
3V4	14,5	6,5	18	1696,5	14,5	6,5	18	1696,5
4V1	14,3	6,6	18	1698,8	14,5	6,8	18	1774,8
4V2	14,1	6,7	18	1700,5	14,5	6,5	18	1696,5
4V3	14,5	6,5	18	1696,5	14,6	6,5	18	1708,2
4V4	14,5	6,5	18	1696,5	14,5	6,5	18	1696,5

	0	22'	44'	66'	106'
	Masse 1	Masse 2	Masse 3	Masse 4	Masse 5
1Rh3	13493	13489	13485	13474	13463
1Rh4	14159	14153	14147	14135	14131
2Rh3	15270	15262	15259	15252	15244
2Rh4	15254	15245	15243	15238	15229
3Rh3	15463	15459	15456	15449	15446
3Rh4	15608	15606	15601	15596	15593
4Rh3	15678	15674	15673	15669	15664
4Rh4	15312	15306	15300	15291	15287

MV 1 [kg/m3]	MV 5 [kg/m3]	Différence [kg/m3]	%
1328,92	1325,97	2,95	0,222
1404,85	1402,07	2,78	0,198
1418,23	1415,81	2,41	0,170
1423,82	1421,49	2,33	0,164
1429,40	1427,83	1,57	0,110
1428,34	1426,96	1,37	0,096
1435,00	1433,72	1,28	0,089
1432,90	1430,56	2,34	0,163

### Correspondance masse volumique des blocs remplis mesurée et calculée

Blocs remplis	Masse volumique mesurée [kg/m3]	Masse volumique calculée [kg/m3]
Recette 1	1162	1241
Recette 2	1224	1331
Recette 3	1244	1324
Recette 4	1201	1310

## Pycnomètre

En effet, considérons qu'à température ambiante ( $T_a$ ) une masse  $M$  connue d'un échantillon de volume  $V_{ech}$  est introduite dans une cellule de volume  $V_{cell}$ .

Dans un premier temps, la vanne est fermée et une pression  $P_1$  est appliquée dans le volume  $V_{cell}$ . L'équation des gaz parfaits pour ce volume s'écrit alors :

$$P_1(V_{cell} - V_{ech}) = n_c RT_a$$

Dans le volume d'expansion  $V_{exp}$ , qui est à pression atmosphérique, on a :

$$P_a V_{exp} = n_e RT_a$$

A l'ouverture de la vanne, il s'établit une pression intermédiaire  $P_2$  dans l'ensemble des deux volumes :

$$P_2(V_{cell} - V_{ech} + V_{exp}) = n_c RT_a + n_e RT_a$$



La combinaison des équations précédentes permet d'obtenir le volume de l'échantillon en fonction de paramètres connus :



$$V_{ech} = V_{cell} - \frac{V_{exp}}{\frac{P_1 - P_a}{P_2 - P_a} - 1}$$



En connaissant la masse de l'échantillon introduit, on obtient la masse volumique :



$$MV = \frac{M_{ech}}{V_{ech}}$$

## Résultats pycnomètre

		Université de Liège - Laboratoire de Géotechnologies				
		Essai au pycnomètre à gaz				
Dossier :		Opérateur : IP				
<b>Calibration Vcell et Vexp</b>						
Vcell :		144,5629		Tare :		
Vexp :		71,9423		Tare+ech :		
<b>Calcul échantillon:</b>						
Nom échantillon :		bois humide		Long. Plug (cm):		
Masse (gr) :		49,368		diam. plug(cm):		
Date de mesure :		8/03/16		Vtot plug (cm³):		
Opérateur :		IP		Vmort(cm³):		
Vsample=Vcell-Vmort-Vexp/((P1/P2)-1)		porosite % = INT((Vtot - Vs(i)) / Vtot) * 100				
	P1	P2	cm³ Vs	gr/cm³ densité	cm³ Volume por	% porosite
1	19,124	11,57	34,37328	1,43623		
2	19,08	11,53	34,69605	1,42287		
3	19,33	11,684	34,62648	1,42573		
4	19,215	11,617	34,56636	1,42821		
5						
6						
7						
8						
9						
nb.mesure:		4	Moyenne :	34,5655	1,4283	-

		Université de Liège - Laboratoire de Géotechnologies				
		Essai au pycnomètre à gaz				
Dossier :		Opérateur : IP				
<b>Calibration Vcell et Vexp</b>						
Vcell :		36,9655		Tare :		
Vexp :		21,3115		Tare+ech :		
<b>Calcul échantillon:</b>						
Nom échantillon :		bois humide		Long. Plug (cm):		
Masse (gr) :		12,619		diam. plug(cm):		
Date de mesure :		8/03/16		Vtot plug (cm³):		
Opérateur :		IP		Vmort(cm³):		
Vsample=Vcell-Vmort-Vexp/((P1/P2)-1)		porosite % = INT((Vtot - Vs(i)) / Vtot) * 100				
	P1	P2	cm³ Vs	gr/cm³ densité	cm³ Volume por	% porosite
1	18,62	10,59	8,85980	1,42430		
2	18,785	10,68	8,88323	1,42054		
3	18,845	10,718	8,85960	1,42433		
4						
5						
6						
7						
8						
9						
nb.mesure:		3	Moyenne :	8,8675	1,4231	-

		Université de Liège - Laboratoire de Géotechnologies				
		Essai au pycnomètre à gaz				
Dossier :		Opérateur : IP				
<b>Calibration Vcell et Vexp</b> Vcell : 36,9655 Vexp : 21,3115 Tare : 8,368 Tare+ech : 16,885						
<b>Calcul échantillon:</b> Nom échantillon : bois sec (etuve 105°C) Masse (gr) : 8,517 Date de mesure : 15/03/16 Opérateur : IP Long. Plug (cm): 0 diam. plug(cm): 0 Vtot plug (cm³): 0,000 Vmort(cm³): 0,000 $V_{sample} = V_{cell} - V_{mort} - V_{exp} / ((P1/P2) - 1)$ porosite % = $INT((V_{tot} - V_{s(i)}) / V_{tot}) * 100$						
	P1	P2	cm³ Vs	gr/cm³ densite	cm³ Volume por	% porosite
1	19,609	11,747	5,12294	1,66252		
2	19,148	11,474	5,10100	1,66967		
3	19,496	11,682	5,10462	1,66849		
4						
5						
6						
7						
8						
9						
	nb.mesure:	3	Moyenne :	5,1095	1,6669	-

		Université de Liège - Laboratoire de Géotechnologies				
		Essai au pycnomètre à gaz				
Dossier :		Opérateur : IP				
<b>Calibration Vcell et Vexp</b> Vcell : 36,9655 Vexp : 21,3115 Tare : 8,368 Tare+ech : 23,21						
<b>Calcul échantillon:</b> Nom échantillon : bois saturé (+/-100%) Masse (gr) : 14,842 Date de mesure : 15/03/16 Opérateur : IP Long. Plug (cm): 0 diam. plug(cm): 0 Vtot plug (cm³): 0,000 Vmort(cm³): 0,000 $V_{sample} = V_{cell} - V_{mort} - V_{exp} / ((P1/P2) - 1)$ porosite % = $INT((V_{tot} - V_{s(i)}) / V_{tot}) * 100$						
	P1	P2	cm³ Vs	gr/cm³ densite	cm³ Volume por	% porosite
1	19,585	10,684	11,38500	1,30365		
2	19,854	10,838	11,34726	1,30798		
3	19,54	10,656	11,40321	1,30156		
4	19,32	10,536	11,40335	1,30155		
5						
6						
7						
8						
9						
	nb.mesure:	4	Moyenne :	11,3847	1,3037	-

## Perméabilité à la vapeur d'eau

Perméabilité à la vapeur d'eau												
		Temps en secondes:	0	7200	25200	86400	111600	172800	259200	284400	356400	604800
		Date et heure:	14/03 à 9h	14/03 à 11h	14/03 à 16h	15/03 à 9h	15/03 à 16h	16/03 à 9h	17/03 à 9h	17/03 à 16h	18/03 à 12h	21/03 à 9h
		Temps en heures:	0	2	7	24	31	48	72	79	99	168
	Volume à soustraire [cm3]	Masse à soustraire [g]	Masse départ [g]	Masse 2	Masse 3	Masse 4	Masse 5	Masse 6	Masse 7	Masse 8	Masse 9	Masse 10
	1V1a	365	721,38	262,94	877,50	877,56	878,17	879,66	881,48	882,02	883,66	889,29
	1V1b	295	721,38	212,95	910,61	910,68	911,31	912,91	914,85	915,41	917,21	923,15
	1V1c	395	721,38	284,69	869,15	869,21	869,74	871,18	872,91	873,41	875,05	880,43
	2V1a	382	850,07	324,51	967,08	966,99	967,22	967,67	968,31	970,11	971,56	976,34
	2V1b	365	850,07	310,03	1050,85	1050,70	1050,89	1051,27	1052,95	1053,25	1054,44	1058,61
	2V1c	380	850,07	322,73	1042,84	1042,85	1043,04	1044,06	1045,30	1045,67	1046,93	1051,33
	3V1a	315	830,07	261,47	726,37	726,38	726,65	726,98	728,58	728,91	729,92	733,39
	3V1b	146	830,07	121,19	957,36	957,39	957,66	958,13	960,23	960,66	962,06	966,93
	3V1c	86	830,07	71,41	1021,89	1021,89	1022,17	1023,18	1024,43	1024,84	1026,08	1030,39
	4V1a	485	801,23	388,92	956,97	956,98	957,40	957,86	960,11	960,55	962,01	967,01
	4V1b	453	801,23	363,16	970,57	970,57	970,98	971,49	973,80	974,21	975,69	980,69
	4V1c	368	801,23	294,85	959,08	959,15	959,57	960,05	962,36	962,80	964,22	969,15

	14/03 à 9h30	14/03 à 11h30	15/03 à 9h	15/03 à 16h	16/03 à 9h	17/03 à 9h	18/03 à 12h	21/03 à 9h	Moyenne
Température [°C]	22	21,6	20,9	21	21,2	22,3	21,3	20,4	21,3
HR [%]	56,7	68,3	52,5	61	52,5	58,6	55,5	64,5	67,1
Pression [mm mercure]	755	755	749	749	747	749	746	747	749,6



Vitesse de variation de masse G [kg/s]						
m2-m1	m3-m2	m4-m3	m5-m4	m6-m5	m7-m6	m8-m7
0	0,003	0,010	0,021	0,016	0,021	0,021
-0,004	0,004	0,010	0,024	0,016	0,022	0,022
0	0,003	0,009	0,021	0,015	0,020	0,020
0,007	-0,002	0,004	0,018	0,010	0,016	0,015
0,003	-0,007	0,003	0,015	0,008	0,014	0,012
-0,006	-0,002	0,003	0,017	0,009	0,014	0,015
-0,001	0,000	0,004	0,013	0,009	0,012	0,013
-0,006	-0,001	0,004	0,019	0,010	0,017	0,017
-0,003	-0,001	0,005	0,017	0,010	0,014	0,016
-0,001	-0,001	0,007	0,018	0,012	0,018	0,017
-0,006	-0,002	0,007	0,020	0,012	0,018	0,016
-0,007	0,001	0,007	0,019	0,013	0,018	0,017

A [m2]	Psat_ext [Pa]	Psat_int [Pa]	d [m]	$\delta a = ((0,083 * p0) / (Rv * T * p)) * (T / 273)^{1,81}$	p0 [Pa]	T [K]	p [Pa]	Rv
0,0225	170235,092	0	0,035	7,09409E-07	101325	294,4875	99941,5043	4
Densité de flux vap		Perméance vap	Résistance vap	Perméabilité vap	Facteur de résistance vap	Epaisseur d'air équivalente pour la diffusion de vap		
$g = G/A$	$W = G / (A * \Delta p)$	$Z = 1/W$	$\delta = W * d$	$\mu = \delta a / \delta$	$Sd = \mu * d$			
0,93	5,43E-06	184019,27	1,90E-07	3,73	0,13			
0,99	5,82E-06	171841,03	2,04E-07	3,48	0,12			
0,89	5,24E-06	190822,33	1,83E-07	3,87	0,14			
0,74	4,33E-06	230990,02	1,52E-07	4,68	0,16			
0,61	3,58E-06	279670,47	1,25E-07	5,67	0,20			
0,68	3,97E-06	252033,64	1,39E-07	5,11	0,18			
0,81	4,78E-06	208998,61	1,67E-07	4,24	0,15			
0,76	4,44E-06	225151,75	1,55E-07	4,56	0,16			
0,68	3,99E-06	250843,33	1,40E-07	5,08	0,18			
0,78	4,59E-06	217642,61	1,61E-07	4,41	0,15			
0,80	4,68E-06	213778,09	1,64E-07	4,33	0,15			
0,79	4,63E-06	215825,51	1,62E-07	4,37	0,15			

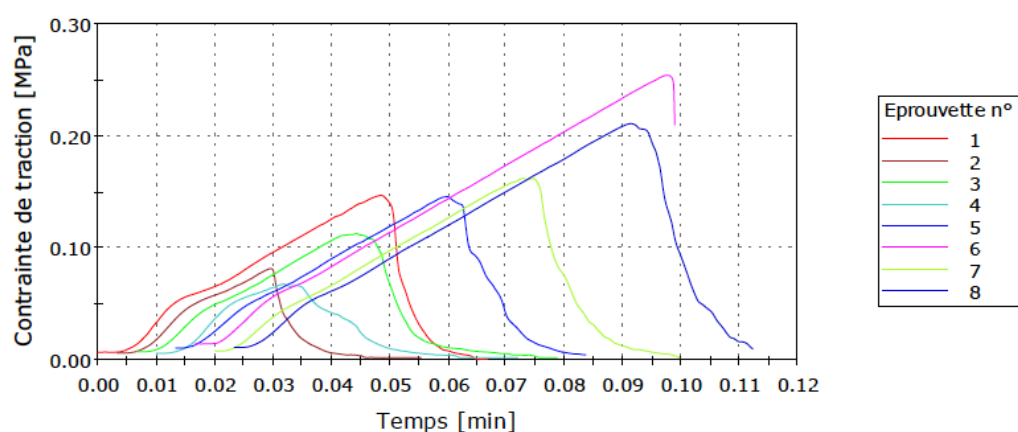
## Adhérence

jeudi 28 avril 2016

TFE 2016 Marie Adhérence traction .is\_tens

No Rapport	TFE 2016 M. LAMALLE
Nom de l'essai	Adhérence traction
Norme	EN 1542
Opérateur	ADA
Cellule [kN]	200
Vitesse	0,05 MPa/s
Température [�C]	18,6
Humidité [%]	45,5
Etat	21�C 60%
Type	R

Eprouvette 1   8

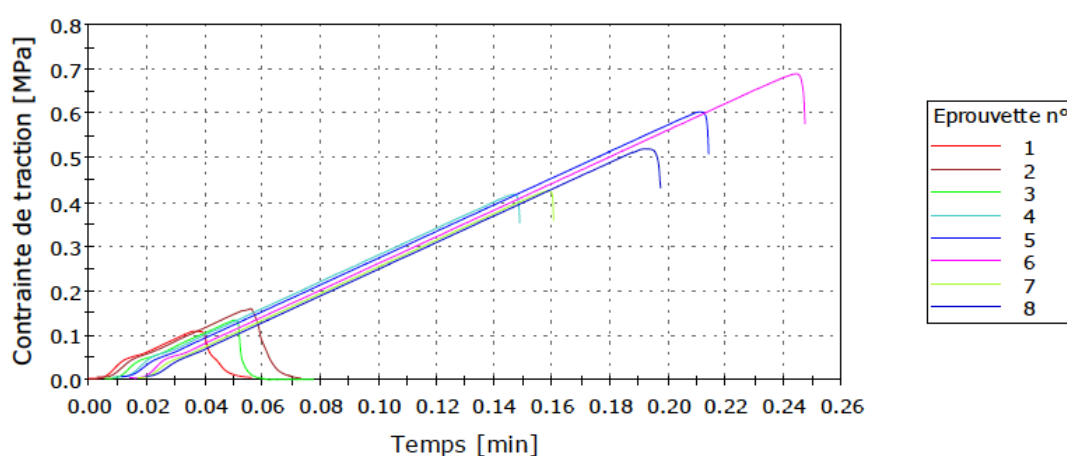


	N�	Charge rupture [kN]	Contra�nte rupture [N/mm^2]	Larg. [mm]	Long. [mm]	Epais moy [mm]	Type A [%]	Type A/B [%]	Type B [%]
1	1R1-1	1,46	0,15	99,0	99,7	67,0	0	90	10
2	1R1-2	0,83	0,08	100,1	100,3	66,0	0	95	5
3	2R1-1	1,14	0,11	100,5	100,2	66,0	0	80	20
4	2R1-2	0,68	0,07	100,5	99,2	66,0	0	90	10
5	3R1-1	1,47	0,15	100,5	99,8	67,0	0	65	35
6	3R1-2	2,52	0,25	99,9	99,3	67,0	0	90	10
7	4R1-1	1,64	0,16	100,6	100,2	65,0	0	50	50
8	4R1-2	2,12	0,21	100,0	100,3	67,0	0	5	95
Moy		1,48	0,15	100,1	99,9	66,4	0	71	29
E-T		0,62	0,06	0,53	0,45	0,74	0,00	30,64	30,64

Laboratoire des Matériaux de Construction - ULg

No Rapport	TFE 2016 M. LAMALLE
Nom de l'essai	Adhérence traction
Norme	EN 1542
Opérateur	ADA
Cellule [kN]	200
Vitesse	0,05 MPa/s
Température [°C]	18,6
Humidité [%]	45,5
Etat	21°C 60%
Type	RH

## Eprouvette 1 à 8



	N°	Charge rupture [kN]	Contraite rupture [N/mm <sup>2</sup> ]	Larg. [mm]	Long. [mm]	Epais moy [mm]	Type A [%]	Type A/B [%]	Type B [%]
1	1RH3-1	1,08	0,11	96,7	100,2	67,0	0	95	5
2	1RH3-2	1,62	0,16	99,5	100,2	64,0	0	50	50
3	2RH3-1	1,37	0,14	100,5	99,4	67,0	0	95	5
4	2RH3-2	4,12	0,42	98,2	100,2	10,0	0	40	60
5	3RH3-1	6,03	0,60	99,6	100,3	66,0	0	5	95
6	3RH3-2	6,79	0,69	98,2	100,3	67,0	0	20	80
7	4RH3-1	4,28	0,43	99,7	100,7	68,0	0	20	80
8	4RH3-2	5,21	0,52	99,6	100,5	66,0	0	20	80
Moy		3,81	0,38	99,0	100,2	59,4	0	43	57
E-T		2,21	0,22	1,21	0,38	19,99	0,00	34,84	34,84

## Flexion des parois

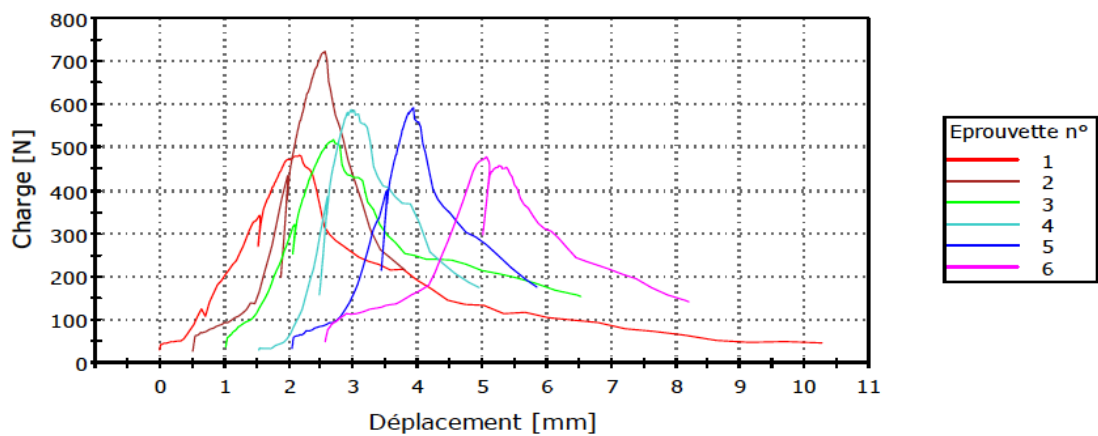
jeudi 19 mai 2016

TFE MARIE 2016 Recette 1.is\_flex

### FLEXION

Rapport n°	TFE Marie
Date	19/05/16
Opérateur	ADA
Norme	EN 15498 (2008)
Vitesse:	0,05 N/mm <sup>2</sup> /s
Température (°C)	21,9
Humidité relative (%)	45,9
Type	Recette 1
Etat	Vide
Long /e/ appuis	180, mm

Eprouvette 1 à 6



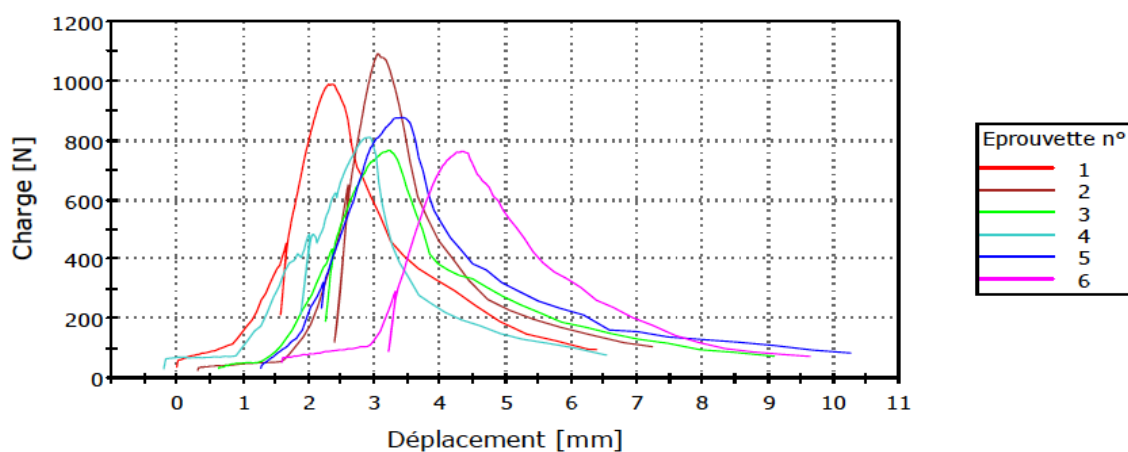
	N°	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Maximum Charge [N]	Contrainte flex [MPa] [MPa]
1	1V21	167	36	483	0,60
2	1V22	167	36	724	0,90
3	1V31	159	36	519	0,68
4	1V32	165	36	588	0,74
5	1V41	165	36	593	0,75
6	1V42	167	36	479	0,60
Moyenne		165	36	564	0,71
Ecart-type		3,1	0,0	92,4	0,1

Laboratoire des Matériaux de construction - ULg

## FLEXION

Rapport n°	TFE Marie
Date	19/05/16
Opérateur	ADA
Norme	EN 15498 (2008)
Vitesse:	0,05 N/mm <sup>2</sup> /s
Température (°C)	21,9
Humidité relative (%)	45,9
Type	Recette 2
Etat	Vide
Long /e/ appuis	180, mm

## Eprouvette 1 à 6

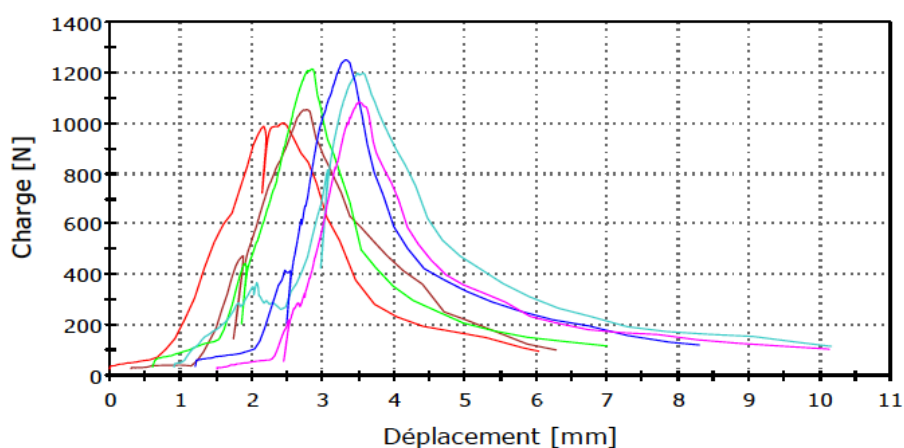


	N°	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Maximum Charge [N]	Contrainte flex [MPa] [MPa]
1	2V21	167	36	989	1,23
2	2V22	167	36	1091	1,36
3	2V31	165	36	768	0,97
4	2V32	167	36	812	1,01
5	2V41	168	36	877	1,09
6	2V42	169	36	765	0,94
Moyenne		167	36	884	1,10
Ecart-type		1,3	0,0	132,0	0,2

## FLEXION

Rapport n°	TFE Marie
Date	19/05/16
Opérateur	ADA
Norme	EN 15498 (2008)
Vitesse:	0,05 N/mm <sup>2</sup> /s
Température (°C)	21,9
Humidité relative (%)	45,9
Type	Recette 3
Etat	Vide
Long /e/ appuis	180, mm

## Eprouvette 1 à 6

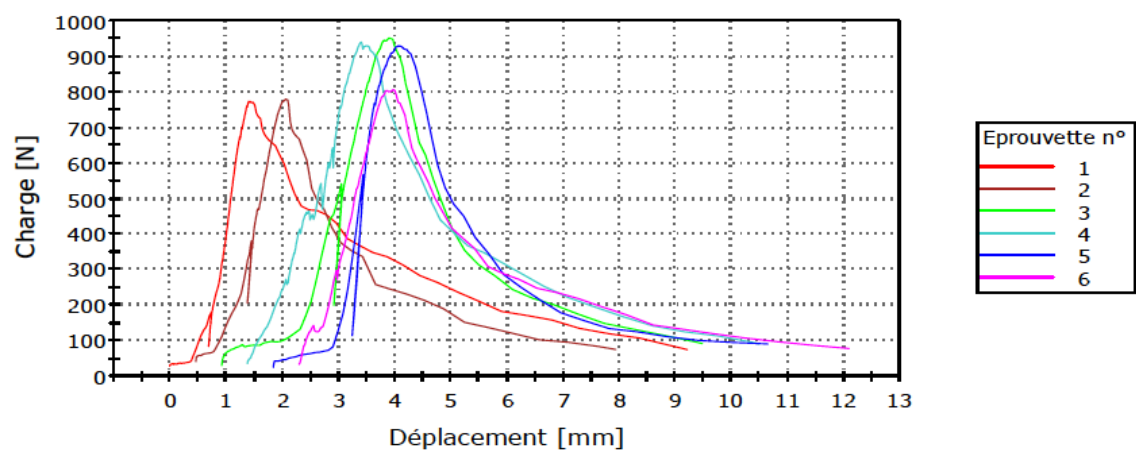


	N°	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Maximum Charge [N]	Contrainte flex [MPa] [MPa]
1	3V21	170	36	1002	1,23
2	3V22	163	36	1054	1,35
3	3V31	170	36	1214	1,49
4	3V32	170	36	1198	1,47
5	3V41	167	36	1250	1,56
6	3V42	166	36	1084	1,36
Moyenne		168	36	1134	1,41
Ecart-type		2,9	0,0	100,2	0,1

## FLEXION

Rapport n°	TFE Marie
Date	19/05/16
Opérateur	ADA
Norme	EN 15498 (2008)
Vitesse:	0,05 N/mm <sup>2</sup> /s
Température (°C)	21,9
Humidité relative (%)	45,9
Type	Recette 4
Etat	Vide
Long /e/ appuis	180, mm

## Eprouvette 1 à 6



	N°	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Maximum Charge [N]	Contrainte flex [MPa] [MPa]
1	4V21	172	36	774	0,94
2	4V22	172	36	780	0,94
3	4V31	172	36	951	1,15
4	4V32	175	36	939	1,12
5	4V41	167	36	929	1,16
6	4V42	167	36	806	1,01
Moyenne		171	36	863	1,05
Ecart-type		3,2	0,0	85,1	0,1



## WUFI Pro matériaux

Nom du matériau / Couche: Enduit extérieur minéral


Données matériaux: Info

Valeurs Basiques	
Densité [kg/m³]	1900,0
Porosité [m³/m³]	0,24
Chaleur spécifique, état sec [J/kgK]	850,0
Conductivité thermique, 10°C [W/mK]	0,8
Résistance à la diffusion [-]	25,0

Paramètres supplémentaires	
Teneur en Eau Référence [kg/m³]	45,0
Saturation Eau Capillaire "libre" [kg/m³]	210,0
Coefficient Absorption Eau [kg/m²s⁰.5]	0,00167
Supplém. hydrique de la conduct. therm. [%/M.-%]	8,0
Fct de la Tp - Correction de la Cond Th. [W/mK²]	0,0002

Humidité initiale à la construction [kg/m³]: 210,0

Epaisseur de la couche [m]: 0,01

Courbe: 

Fonctions Hygrothermiques

Stockage d'humidité (sorption)

Transfert d'eau liquide, (suction)

Transfert d'eau liquide, (redistribution)

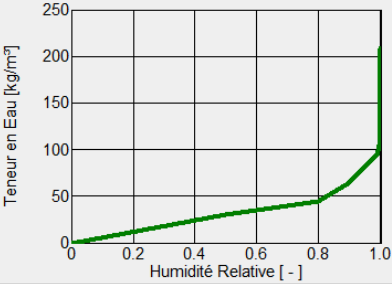
Résistance à la diffusion, (dépend humidité)

Conductivité thermique, (dépend humidité)

Conductivité thermique, Dépendant de la Température

Enthalpie, Dépendant de la Température

Graph:



Nom du matériau / Couche: PU (Cond. Th. : 0.03 W/mK)


Données matériaux: Info

Valeurs Basiques	
Densité [kg/m³]	40,0
Porosité [m³/m³]	0,95
Chaleur spécifique, état sec [J/kgK]	1500,0
Conductivité thermique, 10°C [W/mK]	0,03
Résistance à la diffusion [-]	50,0

Paramètres supplémentaires	
Fct de la Tp - Correction de la Cond Th. [W/mK²]	0,0002

Humidité initiale à la construction [kg/m³]: 0,0

Epaisseur de la couche [m]: 0,1

Courbe: 

Fonctions Hygrothermiques

Stockage d'humidité (sorption)

Transfert d'eau liquide, (suction)

Transfert d'eau liquide, (redistribution)

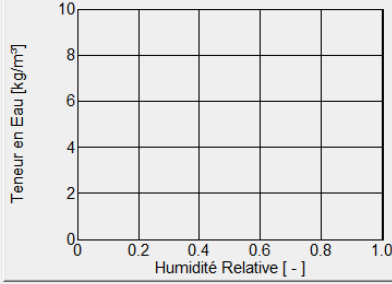
Résistance à la diffusion, (dépend humidité)

Conductivité thermique, (dépend humidité)

Conductivité thermique, Dépendant de la Température

Enthalpie, Dépendant de la Température

Graph:



Nom du matériau / Couche: Béton de bois


Données matériaux: Info

Valeurs Basiques	
Densité [kg/m³]	800
Porosité [m³/m³]	0,67
Chaleur spécifique, état sec [J/kgK]	850,0
Conductivité thermique, 10°C [W/mK]	0,1
Résistance à la diffusion [-]	4

Paramètres supplémentaires	
Teneur en Eau Référence [kg/m³]	17,0
Saturation Eau Capillaire "libre" [kg/m³]	97,0
Supplém. hydrique de la conduct. therm. [%/M.-%]	10,0
Fct de la Tp - Correction de la Cond Th. [W/mK²]	0,0002

Humidité initiale à la construction [kg/m³]: 100,0

Epaisseur de la couche [m]: 0,035

Courbe: 

Fonctions Hygrothermiques

Stockage d'humidité (sorption)

Transfert d'eau liquide, (suction)

Transfert d'eau liquide, (redistribution)

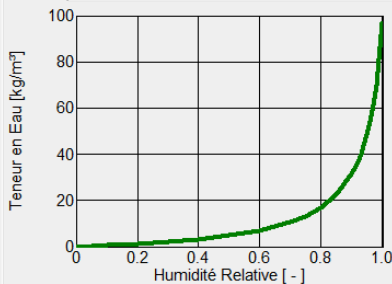
Résistance à la diffusion, (dépend humidité)

Conductivité thermique, (dépend humidité)

Conductivité thermique, Dépendant de la Température

Enthalpie, Dépendant de la Température

Graph:



Nom du matériau / Couche : Béton E/C=0.5


Données matériaux | Info

Valeurs Basiques	
Densité [kg/m³]	2300.0
Porosité [m³/m³]	0.18
Chaleur spécifique, état sec [J/kgK]	850.0
Conductivité thermique, 10°C [W/mK]	1.6
Résistance à la diffusion [-]	180.0

Paramètres supplémentaires	
Supplém. hydrique de la conduct. therm. [%/M.-%]	8.0
Fct de la Tp - Correction de la Cond Th. [W/mK²]	0.0002

Humidité initiale à la construction [kg/m³] : 150.0

Epaisseur de la couche [m] : 0.07

Courbe : 

Fonctions Hygrothermiques

Stockage d'humidité (sorption)

Transfert d'eau liquide, (suction)

Transfert d'eau liquide, (redistribution)

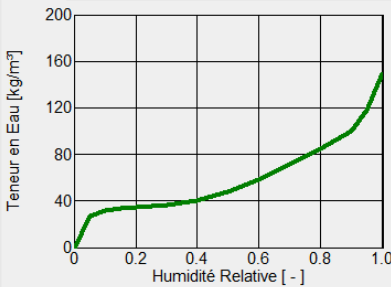
Résistance à la diffusion, (dépend humidité)

Conductivité thermique, (dépend humidité)

Conductivité thermique, Dépendant de la Température

Enthalpie, Dépendant de la Température

Graphes | Editer Tableau | fichier...



Nom du matériau / Couche : Plafonnage intérieur (Plâtre)


Données matériaux | Info

Valeurs Basiques	
Densité [kg/m³]	850.0
Porosité [m³/m³]	0.65
Chaleur spécifique, état sec [J/kgK]	850.0
Conductivité thermique, 10°C [W/mK]	0.2
Résistance à la diffusion [-]	8.3

Paramètres supplémentaires	
Supplém. hydrique de la conduct. therm. [%/M.-%]	8.0
Fct de la Tp - Correction de la Cond Th. [W/mK²]	0.0002

Humidité initiale à la construction [kg/m³] : 400.0

Epaisseur de la couche [m] : 0.01

Courbe : 

Fonctions Hygrothermiques

Stockage d'humidité (sorption)

Transfert d'eau liquide, (suction)

Transfert d'eau liquide, (redistribution)

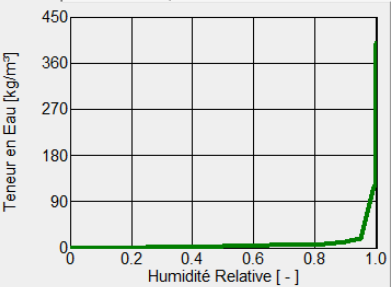
Résistance à la diffusion, (dépend humidité)

Conductivité thermique, (dépend humidité)

Conductivité thermique, Dépendant de la Température

Enthalpie, Dépendant de la Température

Graphes | Editer Tableau | fichier...



Nom du matériau / Couche : Panneau en fibres de bois


Données matériaux | Info

Valeurs Basiques	
Densité [kg/m³]	300.0
Porosité [m³/m³]	0.8
Chaleur spécifique, état sec [J/kgK]	1500.0
Conductivité thermique, 10°C [W/mK]	0.05
Résistance à la diffusion [-]	12.5

Paramètres supplémentaires	
Supplém. hydrique de la conduct. therm. [%/M.-%]	1.5
Fct de la Tp - Correction de la Cond Th. [W/mK²]	0.0002

Humidité initiale à la construction [kg/m³] : 1.5

Epaisseur de la couche [m] : 0.015

Courbe : 

Fonctions Hygrothermiques

Stockage d'humidité (sorption)

Transfert d'eau liquide, (suction)

Transfert d'eau liquide, (redistribution)

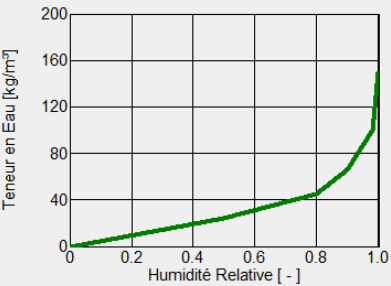
Résistance à la diffusion, (dépend humidité)

Conductivité thermique, (dépend humidité)

Conductivité thermique, Dépendant de la Température

Enthalpie, Dépendant de la Température

Graphes | Editer Tableau | fichier...



Nom du matériau / Couche **Fibre de cellulose**

Données matériaux | Info


Valeurs Basiques	
Densité [kg/m³]	50,0
Porosité [m³/m³]	0,95
Chaleur spécifique, état sec [J/kgK]	2000,0
Conductivité thermique, 10°C [W/mK]	0,034
Résistance à la diffusion [-]	1,8

Paramètres supplémentaires	
Supplém. hydrique de la conduct. therm. [%/M.-%]	0,5
Fct de la Tp - Correction de la Cond Th. [W/mK²]	0,0002

Humidité initiale à la construction [kg/m³]

Epaisseur de la couche [m]

Conductivité Thermique - Valeur Utile [W/mK]

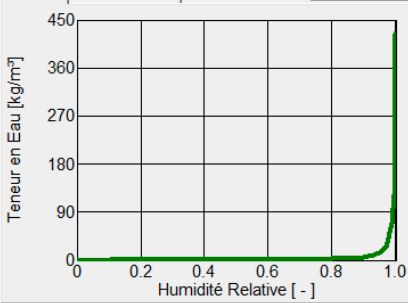
Courbe 

Fonctions Hygrothermiques

**Stockage d'humidité (sorption)**

Transfert d'eau liquide, (suction)  
 Transfert d'eau liquide, (redistribution)  
 Résistance à la diffusion, (dépend humidité)  
 Conductivité thermique, (dépend humidité)  
 Conductivité thermique, Dépendant de la Température  
 Enthalpie, Dépendant de la Température

Graphes | Editer Tableau |



Nom du matériau / Couche **Béton cellulaire (Masse vol. 500 kg/m³)**


Données matériaux | Info

Valeurs Basiques	
Densité [kg/m³]	500,0
Porosité [m³/m³]	0,77
Chaleur spécifique, état sec [J/kgK]	850,0
Conductivité thermique, 10°C [W/mK]	0,12
Résistance à la diffusion [-]	8,0

Paramètres supplémentaires	
Supplém. hydrique de la conduct. therm. [%/M.-%]	3,7
Fct de la Tp - Correction de la Cond Th. [W/mK²]	0,0002

Humidité initiale à la construction [kg/m³]

Epaisseur de la couche [m]

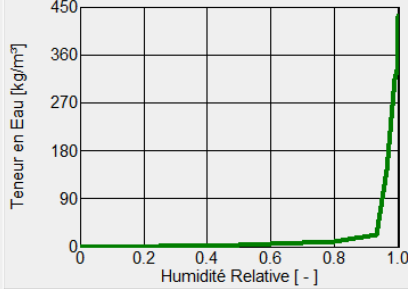
Courbe 

Fonctions Hygrothermiques

**Stockage d'humidité (sorption)**

Transfert d'eau liquide, (suction)  
 Transfert d'eau liquide, (redistribution)  
 Résistance à la diffusion, (dépend humidité)  
 Conductivité thermique, (dépend humidité)  
 Conductivité thermique, Dépendant de la Température  
 Enthalpie, Dépendant de la Température

Graphes | Editer Tableau |



## WUFI Pro encodage

WUFI® Pro 5.1 C:\Users\Marie\Desktop\WUFI\0517 Cas 1.W5P

Projet Entrées Calcul Sorties Options Base de Données Analyse des résultats ?

Projet

- Cas: 1 #1 bb + béton classique + F
  - Composant
    - Maillage, moniteurs
    - Orientation, inclinaison
    - Coefficients surfaciques
    - Conditions initiales
  - Simulation
    - Climat
    - Graph. Rapide

Projet/Cas: Cas 1: bb + béton classique + PUR/#1 bb + béton classique + PUR

Maillage, moniteurs Orientation/Inclinaison/Hauteur Coefficients surfaciques Conditions initiales

**Assemblage**

Nom de la Couche: Enduit extérieur minéral Epaisseur [m]: 0.01

Exterieur (coté gauche): 0.01 0.1 0.035 0.07 Intérieur (coté droit): 0.035 0.01

Données matériaux Sources et pertes

Nouvelle Couche Dupliquer Effacer

Editer maillage par:
 

- Graph
- Tableau

Attribuer à partir de:
 

- Base de Données Matériaux
- Exemple

Maillage:
 

- ☒ Maillage Automatique
- ☐ Grossier
- ☒ Moyenne
- ☐ Fin

Epaisseur totale: épaisseur: 0.26 m Performance thermique globale: Résistance thermique R: 3.96 m²K/W Coefficient U: 0.241 W/m²K

WUFI® Pro 5.1 C:\Users\Marie\Desktop\WUFI\0517 Cas 1.W5P

Projet Entrées Calcul Sorties Options Base de Données Analyse des résultats ?

Projet

- Cas: 1 #1 bb + béton classique + F
  - Composant
    - Maillage, moniteurs
    - Orientation, inclinaison
    - Coefficients surfaciques
    - Conditions initiales
  - Simulation
    - Climat
    - Graph. Rapide

Projet/Cas: Cas 1: bb + béton classique + PUR/#1 bb + béton classique + PUR

Maillage, moniteurs Orientation/Inclinaison/Hauteur Coefficients surfaciques Conditions initiales

**Orientation, inclinaison**

Inclinaison

Orientation, inclinaison: Sud-Ouest

Inclinaison [°]: 90

Hauteur Bâtiment/Coefficient Pluie

☐ Quantité de pluie calculée selon norme ASHRAE 160P

R1 [-]: 0

R2 [s/m]: 0.07

Note: Intensité Pluie: Pluie\*(R1+R2\*Vitesse du vent)

Bâtiment peu élevé, hauteur jusqu'à 10 m

WUFI® Pro 5.1 C:\Users\Marie\Desktop\WUFI\0517 Cas 1.W5P

Projet Entrées Calcul Sorties Options Base de Données Analyse des résultats ?

Projet

- Cas: 1 #1 bb + béton classique + F
  - Composant
    - Maillage, moniteurs
    - Orientation, inclinaison
    - Coefficients surfaciques
    - Conditions initiales
  - Simulation
  - Climat
  - Graph. Rapide

Projet/Cas: Cas 1: bb + béton classique + PUR/#1 bb + béton classique + PUR

Maillage, moniteurs Orientation/Inclinaison/Hauteur Coefficients surfaciques Conditions initiales

**Surface extérieure (coté gauche)**

Resistance thermique [m²K/W] 0.0588 Mur extérieur

☐ Dépend du Vent ☒ Comprend une partie de rayonnement basse fréquence

Epaisseur d'air équivalente Sd [m] — Sans Revêtement

Absorptivité (courte longueur d'onde) [-] 0.4 Défini par Utilisateur

Emissivité (grande longueur d'onde) [-] 0.9 Détails <<

Réflectivité courtes ondes du sol [-] 0.20

**Bilan explicite du rayonnement**

☒ Autoriser WUFI®

Emissivité longues ondes du sol [-] 0.90

Réflectivité longues ondes du sol [-] 0.10

nébulosité [-] 0.66 Pour plus d'information, référez-vous à l'aide en ligne.

Coeff. de pénétr. de l'eau (pluie) [-] 0.7 =f (inclinaison, hauteur du bâtiment)

**Surface intérieure (coté droit)**

Resistance thermique [m²K/W] 0.125 (Mur extérieur)

Epaisseur d'air équivalente Sd [m] — Sans Revêtement

WUFI® Pro 5.1 C:\Users\Marie\Desktop\WUFI\0517 Cas 1.W5P

Projet Entrées Calcul Sorties Options Base de Données Analyse des résultats ?

Projet

- Cas: 1 #1 bb + béton classique + F
  - Composant
    - Maillage, moniteurs
    - Orientation, inclinaison
    - Coefficients surfaciques
    - Conditions initiales
  - Simulation
  - Climat
  - Graph. Rapide

Projet/Cas: Cas 1: bb + béton classique + PUR/#1 bb + béton classique + PUR

Maillage, moniteurs Orientation/Inclinaison/Hauteur Coefficients surfaciques Conditions initiales

**Humidité initiale**

☒ constante dans le composant

☐ définie couche par couche

☐ lue dans un fichier

**Température initiale**

☒ constante dans le composant

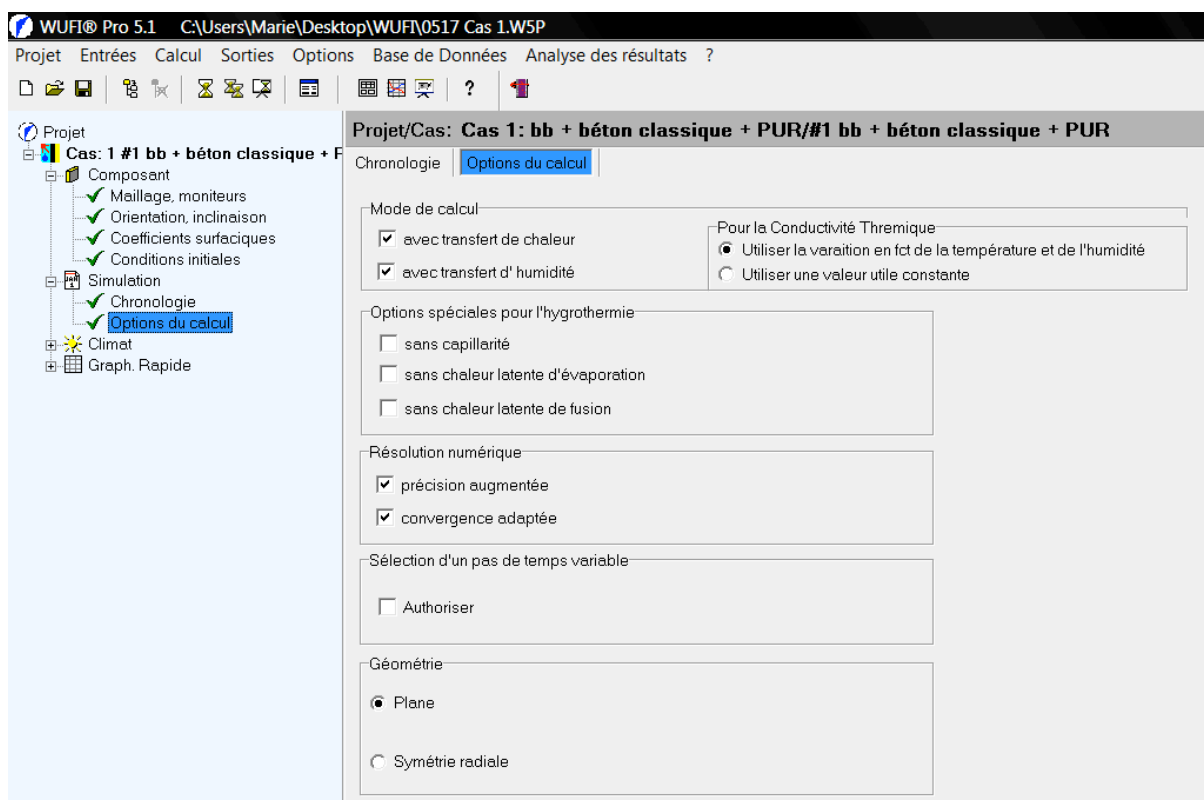
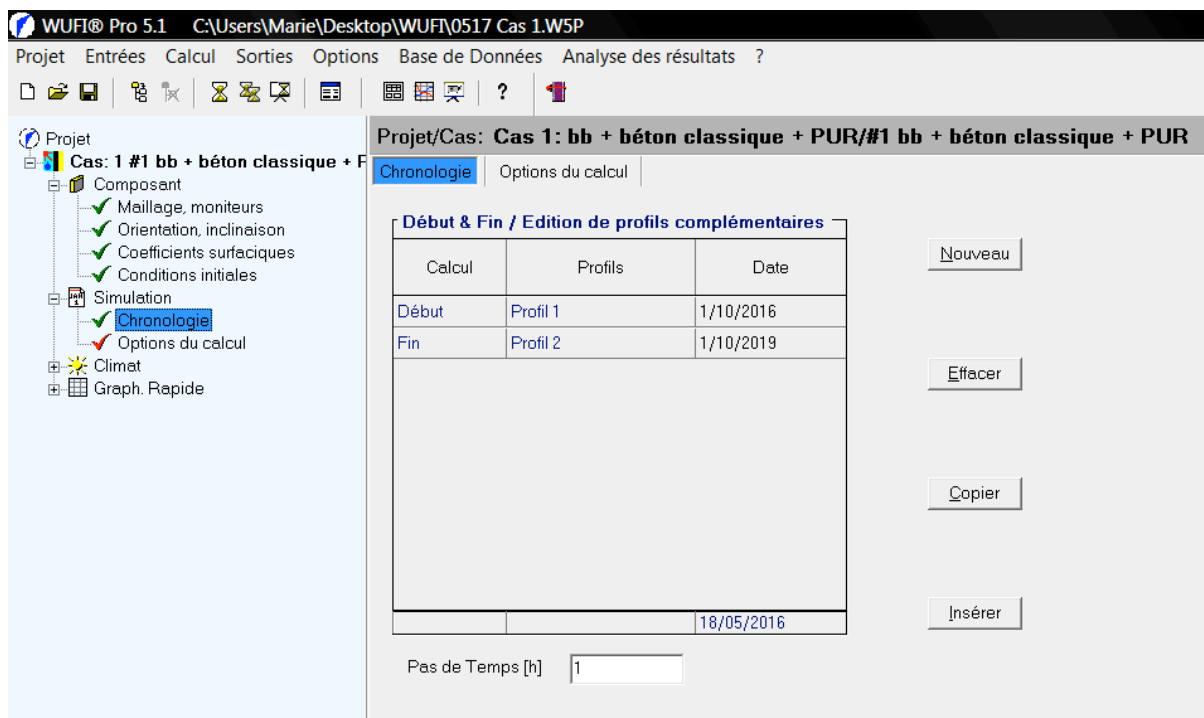
☐ lue dans un fichier

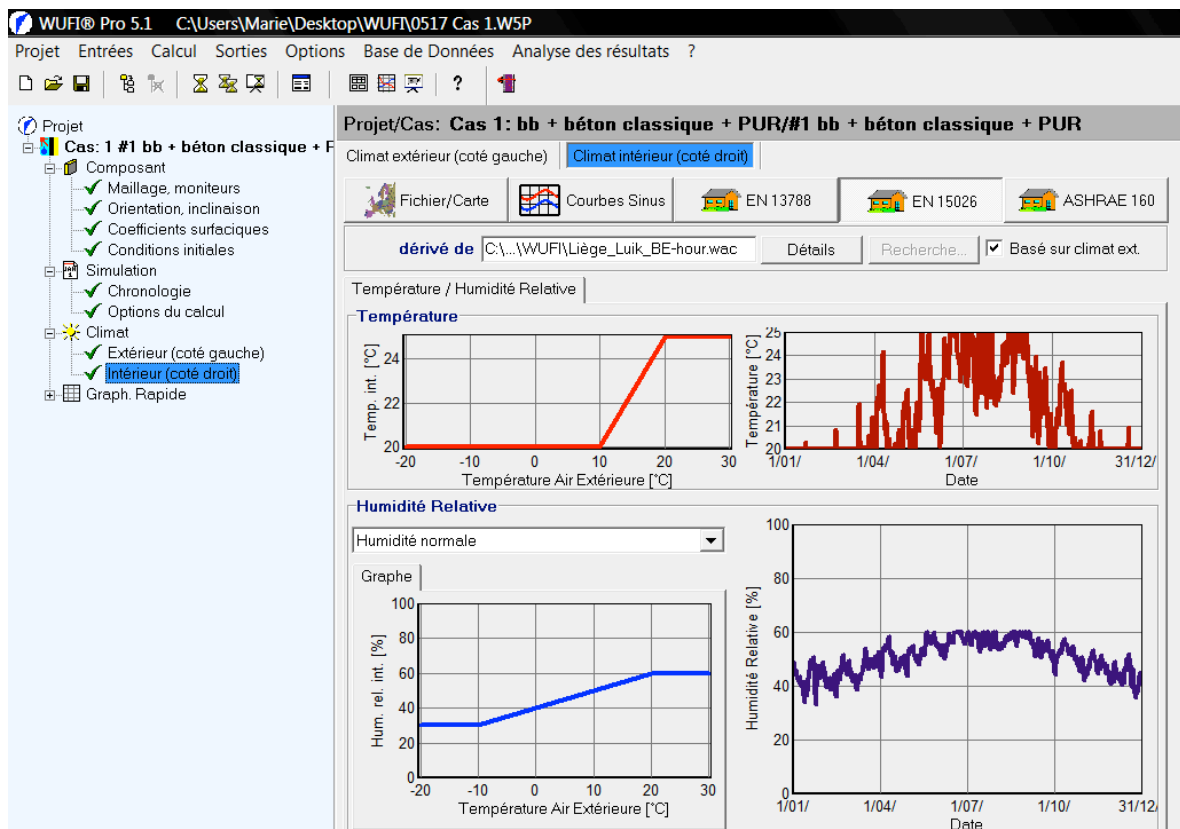
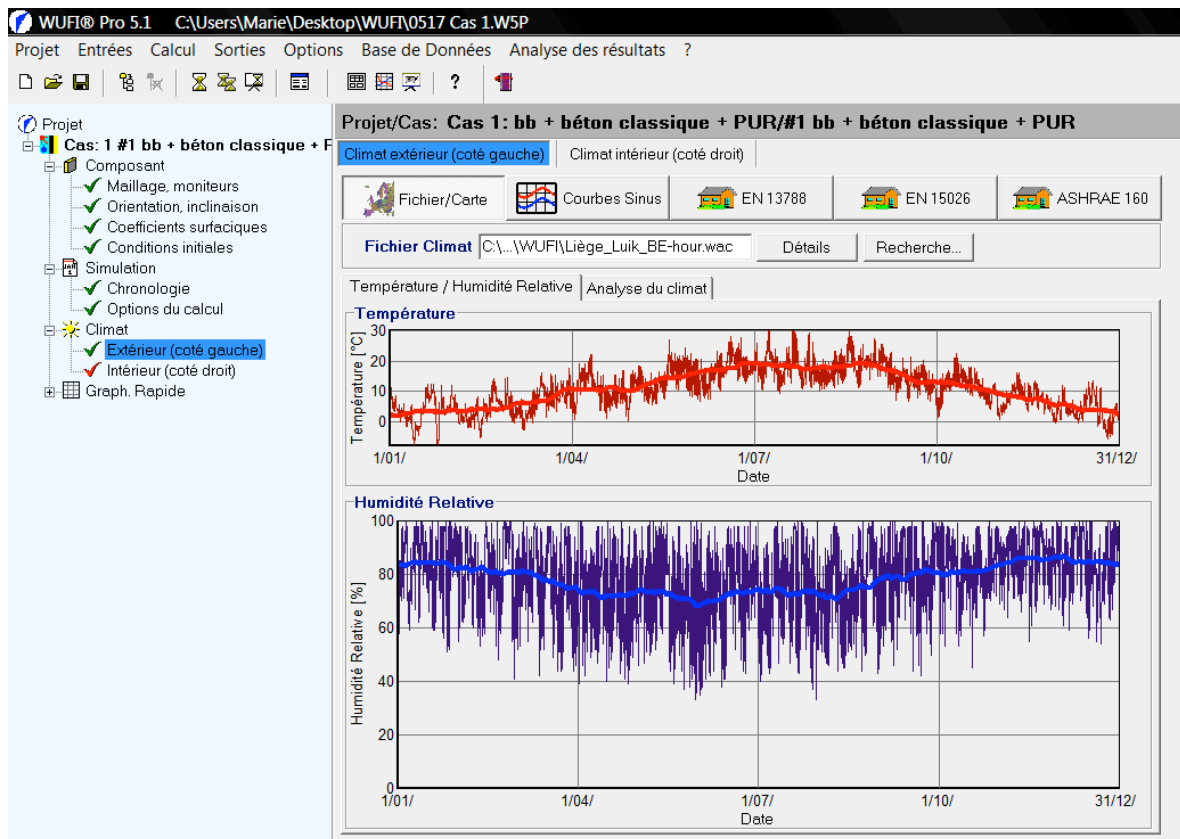
Humidité initiale à la construction [-] 0.80

Température initiale [°C] 20

**Teneur en eau des différentes couches**

No.	Matériau Couche	Epaisseur [m]	Teneur en Eau [kg/m³]
1	Enduit extérieur minéral	0.01	45.0
2	PU (Cond. Th. : 0.03 W/mK)	0.1	0.0
3	Béton de bois	0.035	17.0
4	Béton E/C=0.5	0.07	85.0
5	Béton de bois	0.035	17.0
6	Plafonnage intérieur (Plâtre)	0.01	6.3







## Meteonorm

### Liège (Luik) BE

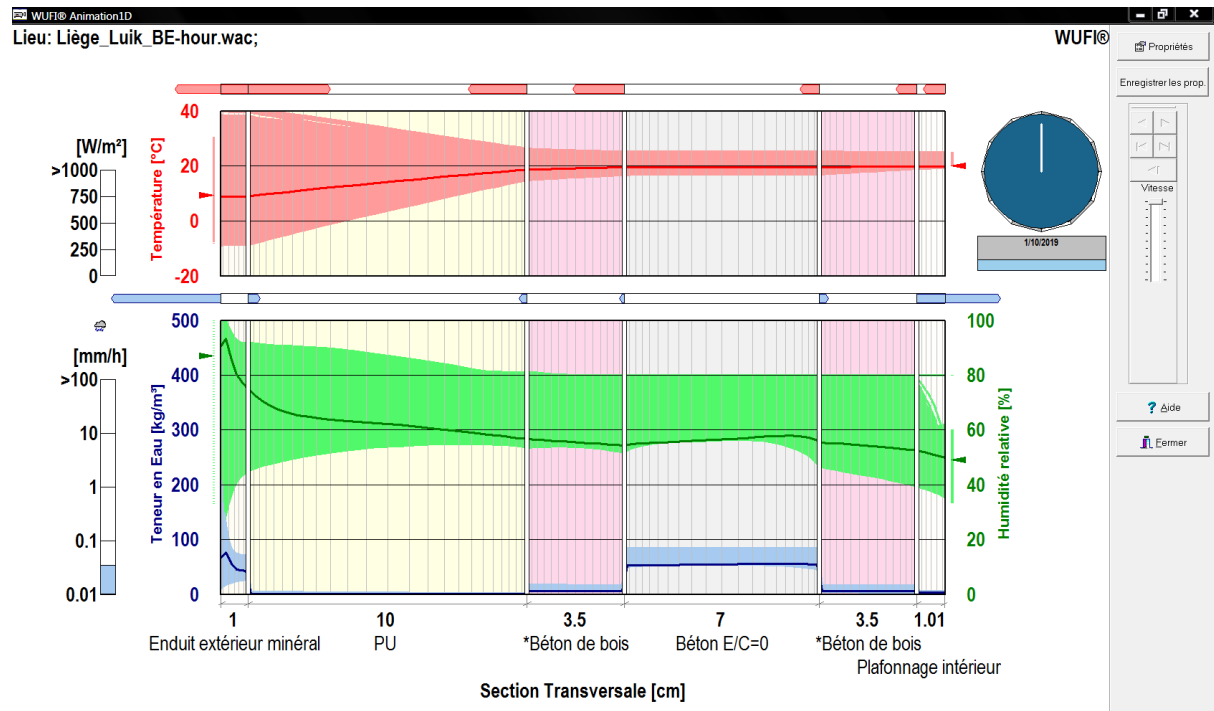
☀ Rayonnement		🌡 Température		☁ Précipitations			
☀ Durée d'insolation		☀ Rayonnement global journalier					
🌡 Température journalière		📊 Tableau de données					
	Gh kWh/m <sup>2</sup>	Dh kWh/m <sup>2</sup>	Bn kWh/m <sup>2</sup>	Ta °C	Td °C	FF m/s	
Janvier	23	16	28	3,3	0,7	4,8	
Février	33	21	36	4,1	1	4,5	
Mars	73	44	64	6,5	2,7	4,2	
Avril	119	69	94	10,3	5	3,6	
Mai	141	87	96	14,3	9	3,6	
Juin	154	76	126	17,2	11,6	3,2	
Juillet	156	75	133	18,5	13,1	3,5	
Août	123	73	85	18,2	13,2	3,2	
Septembre	90	49	86	15,2	11,1	3,4	
Octobre	57	37	49	11,5	8,3	4	
Novembre	25	16	33	7,3	4,8	4,3	
Décembre	16	11	24	3,5	1,2	4,3	
Année	1009	573	854	10,8	6,8	3,9	

#### Informations du résultat

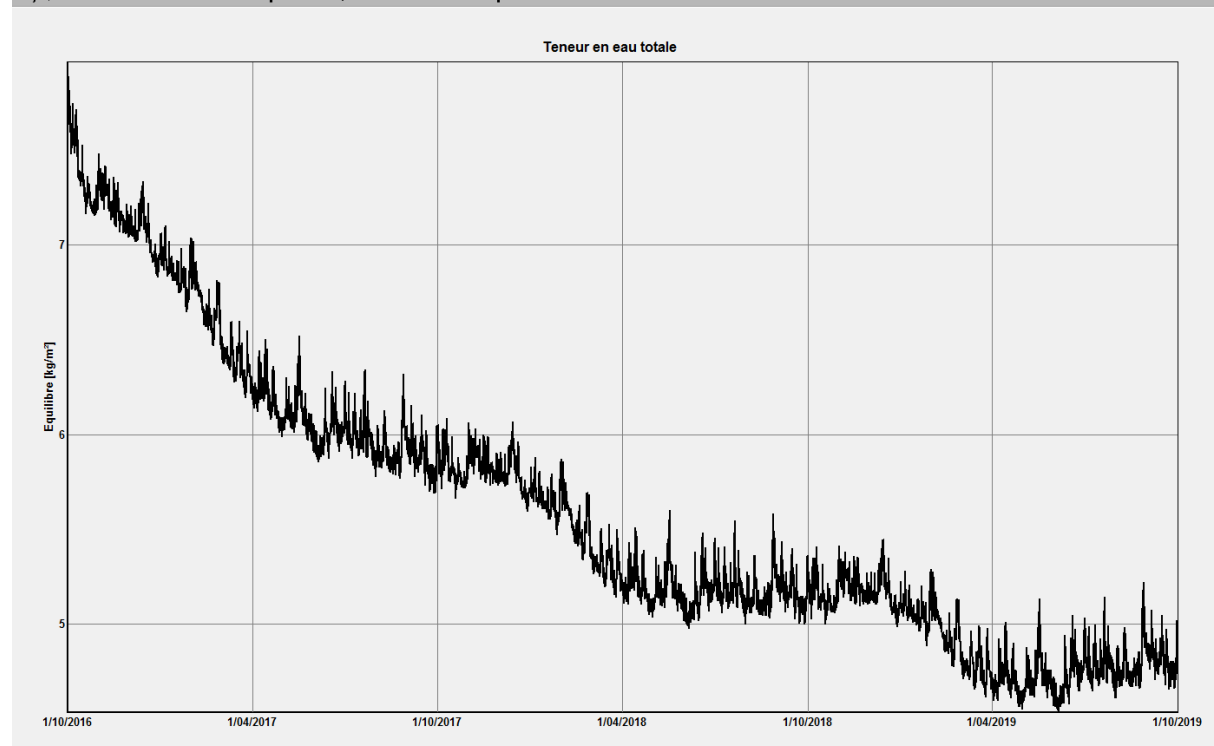
Incertitude des valeurs annuelles: Gh = 5%, Bn = 10%, Ta = 0,5 °C

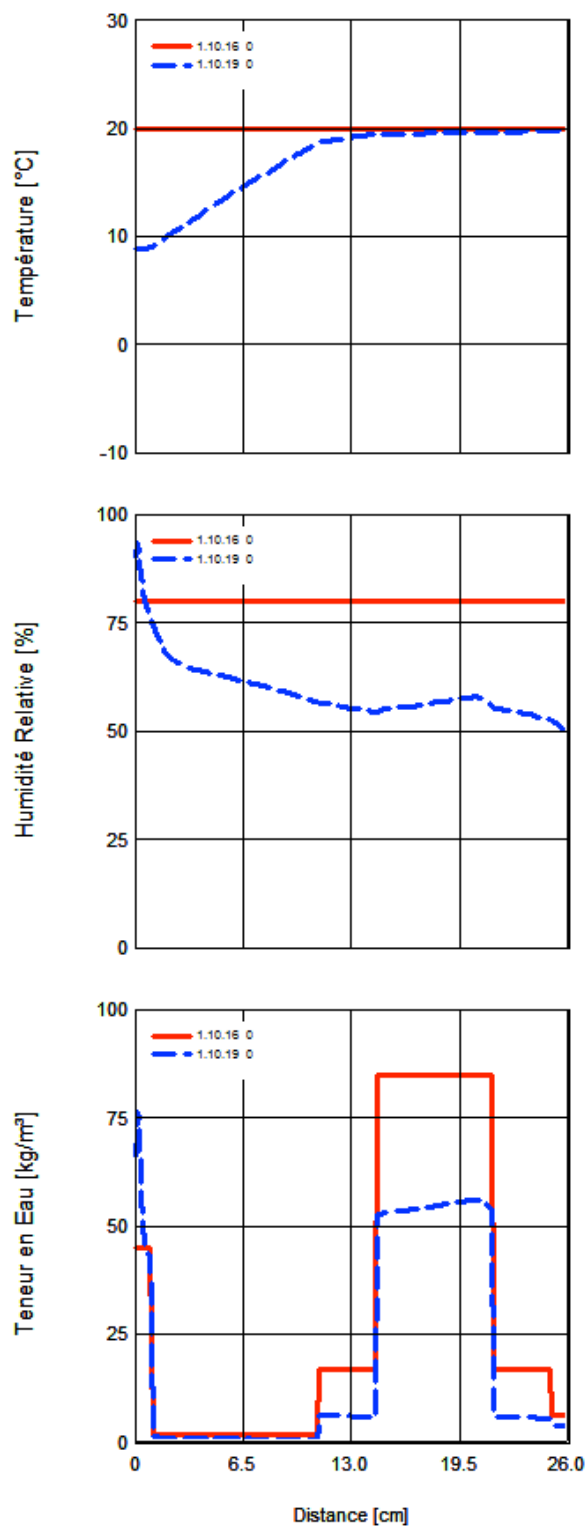
Tendance de Gh / décennie: - Variabilité de Gh / an 5,7%

## WUFI Pro résultats cas 1

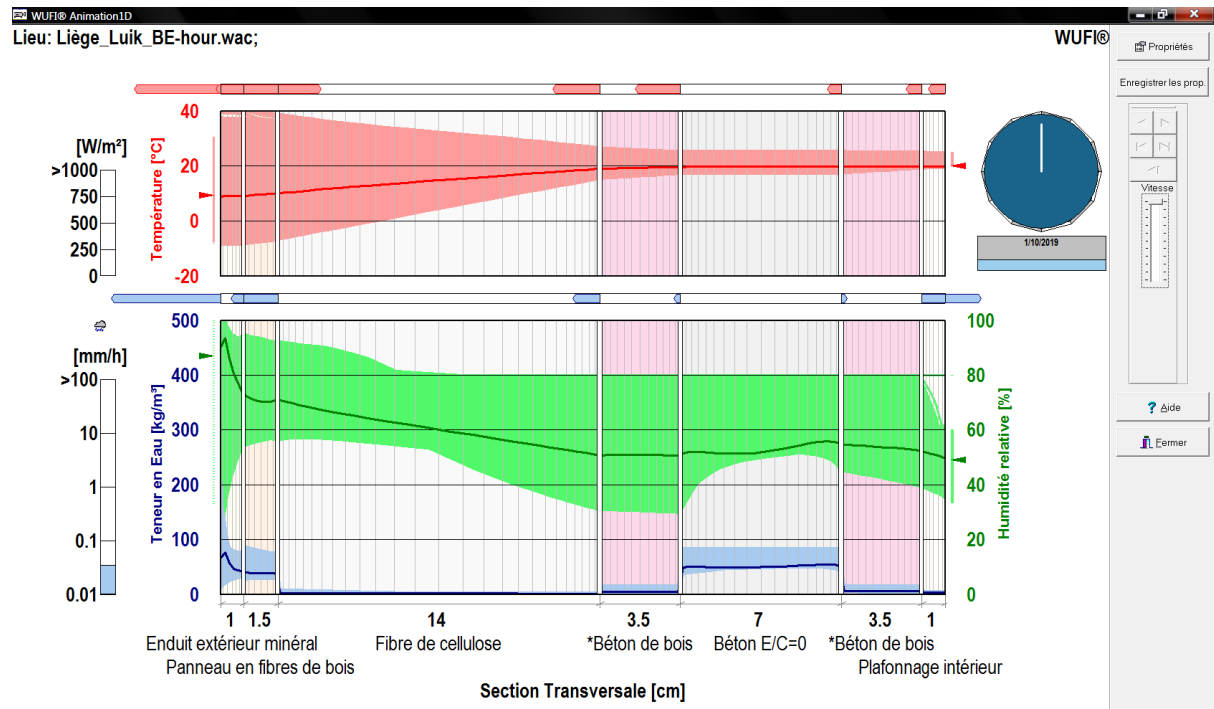


Projet/Cas: Cas 1: bb + béton classique + PUR/#1 bb + béton classique + PUR

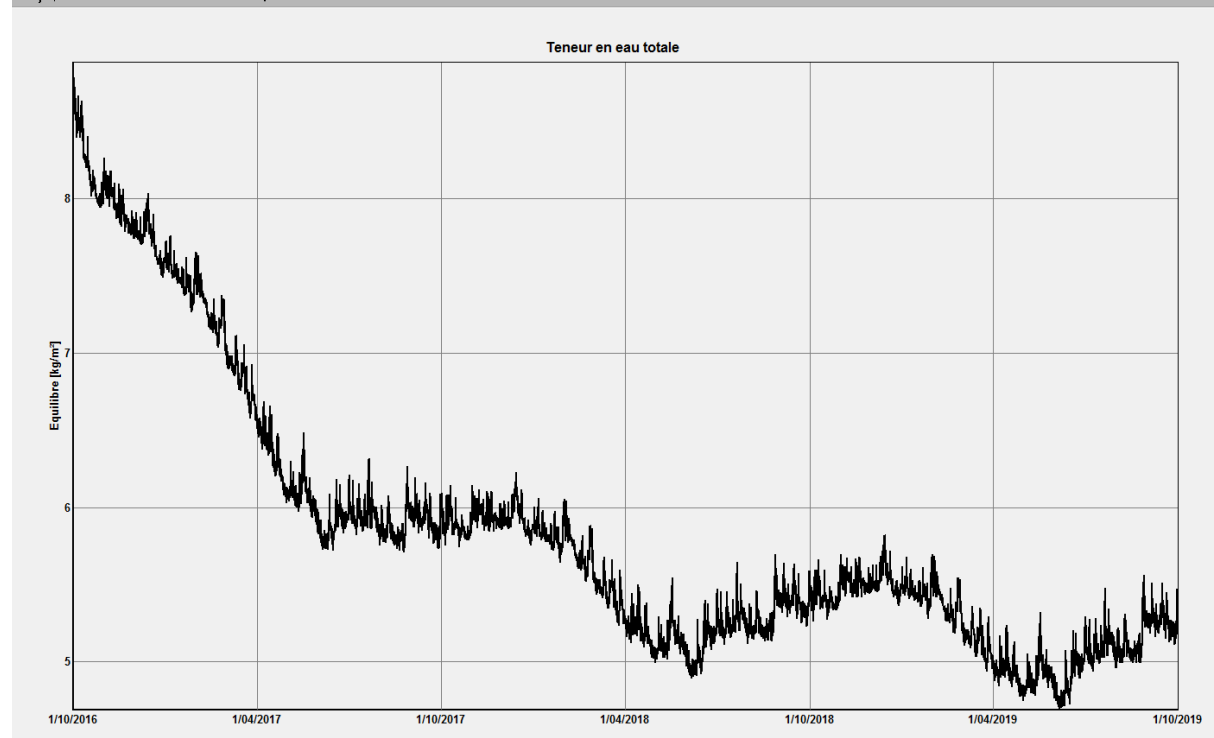


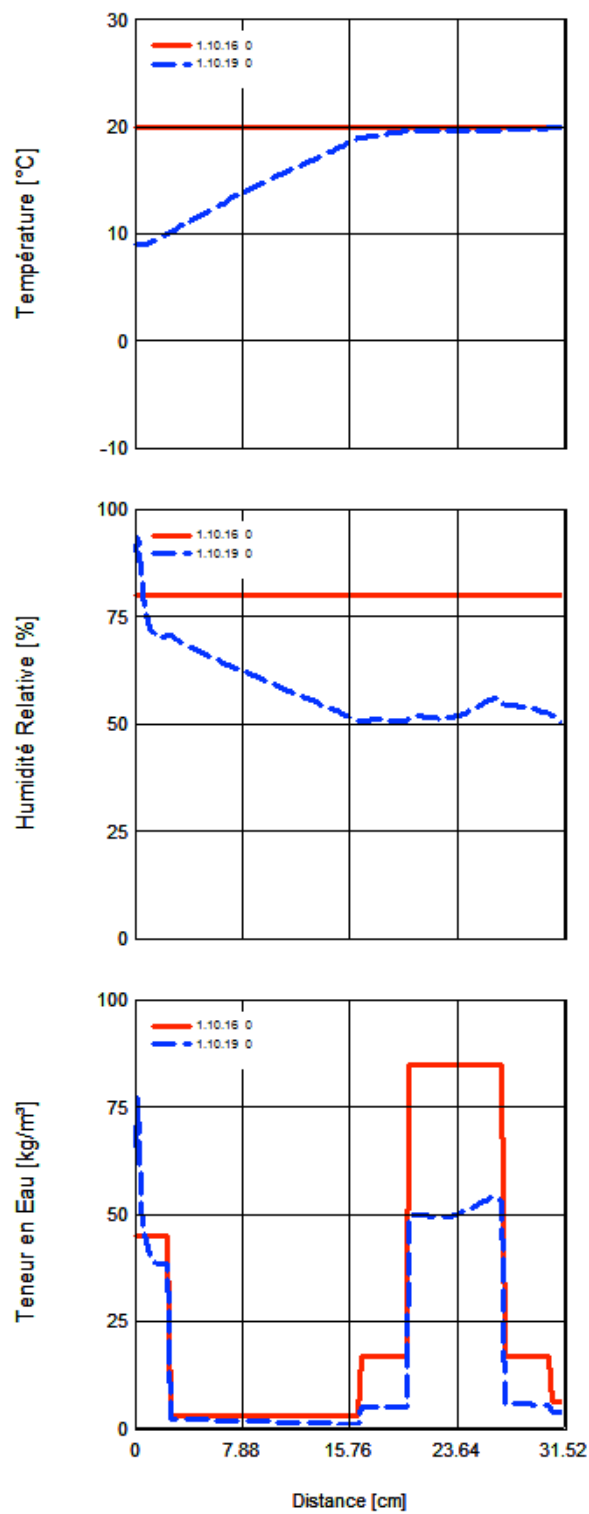


## WUFI Pro résultats cas 2

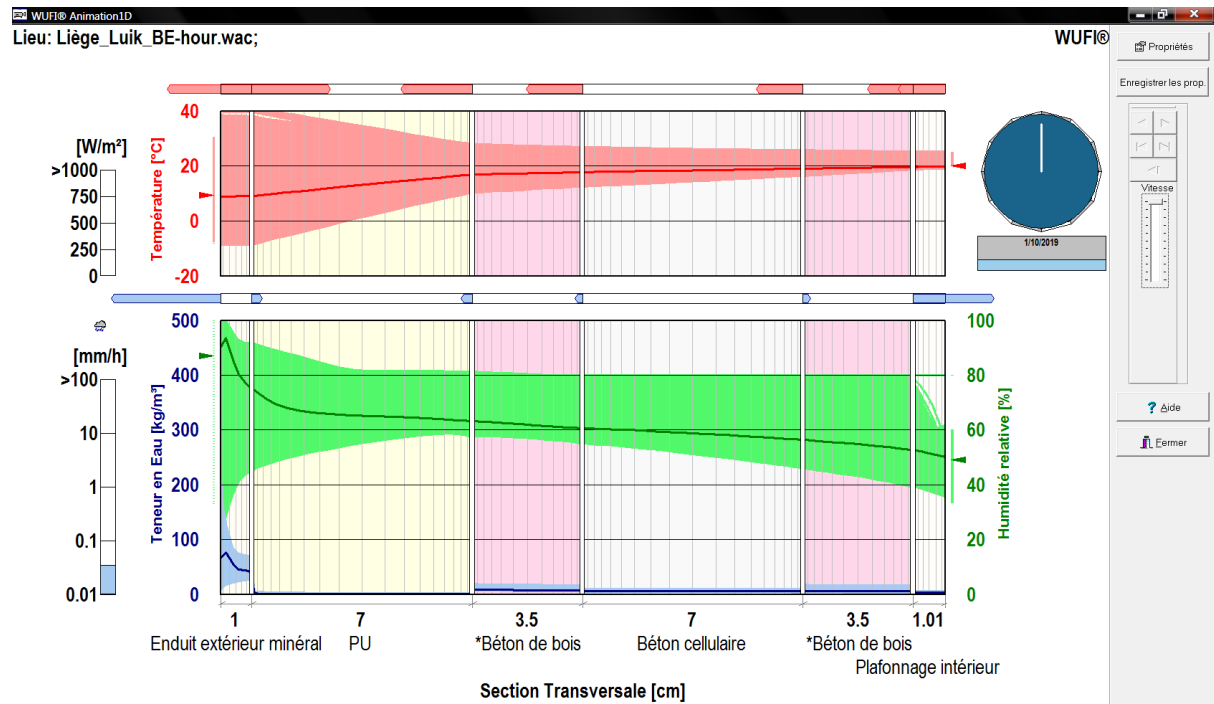


Projet/Cas: Cas 2: isolant cellulose/#2 isolant cellulose

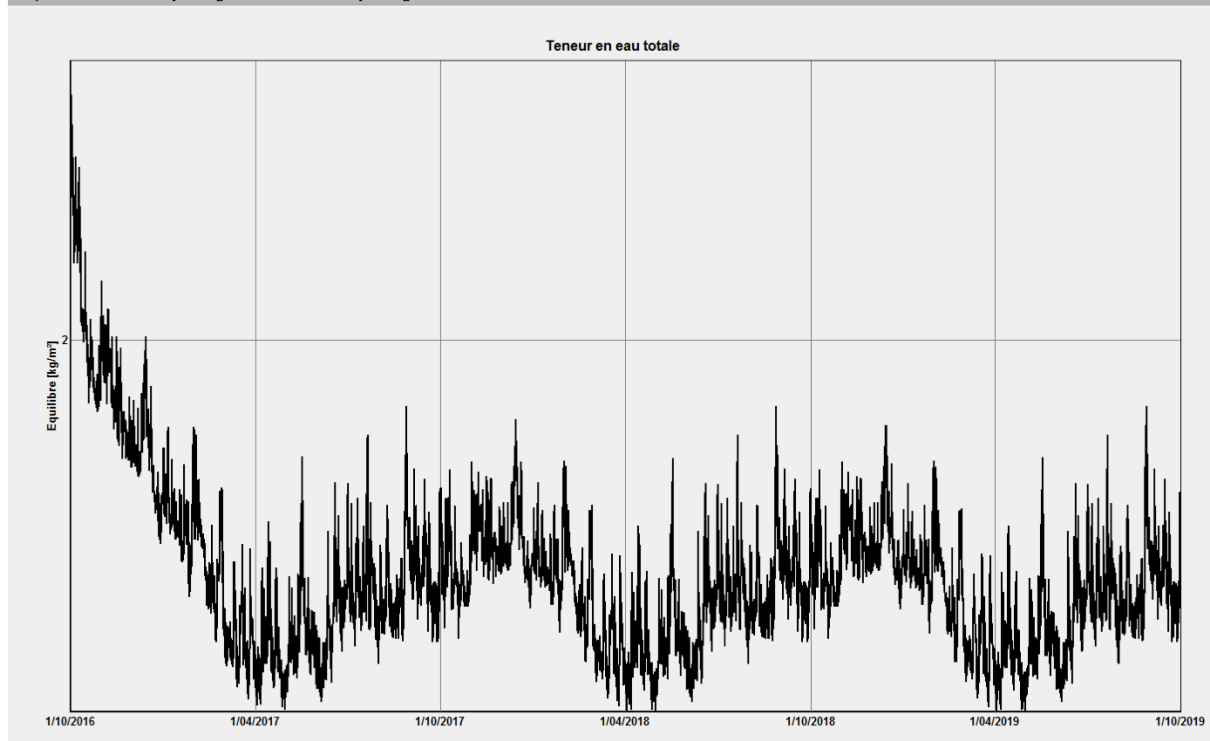


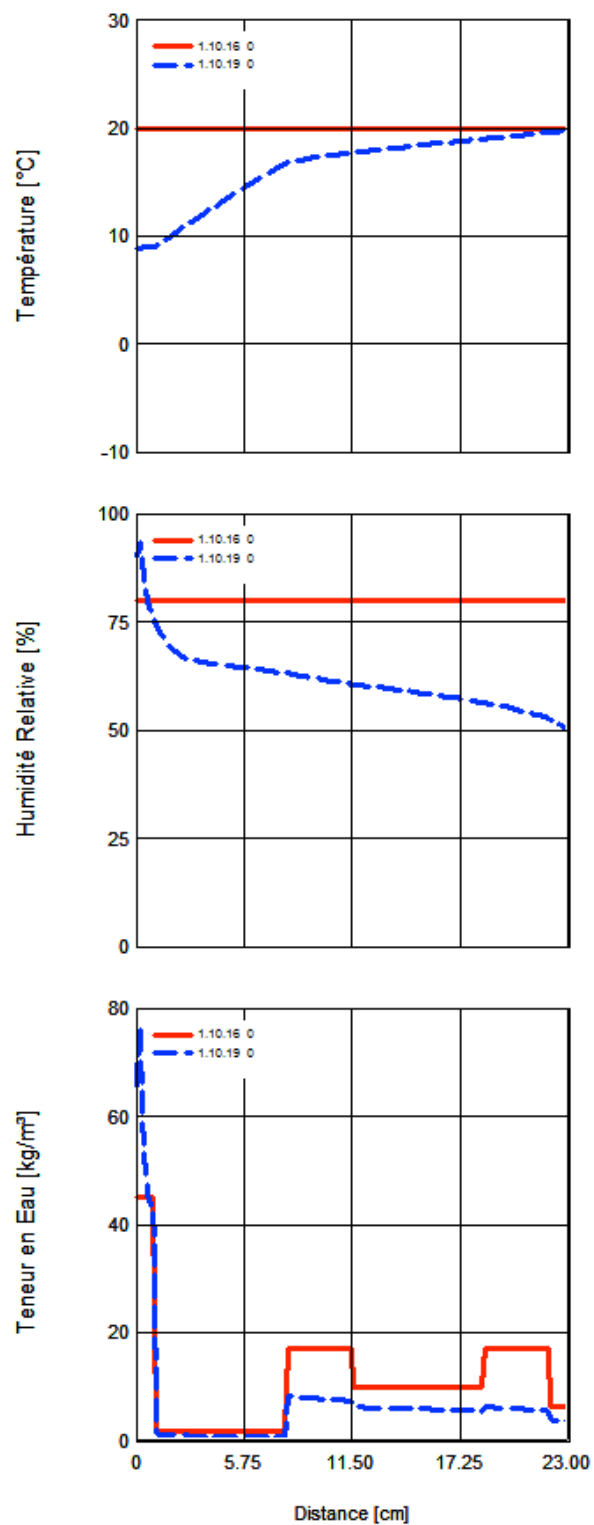


## WUFI Pro résultats cas 3



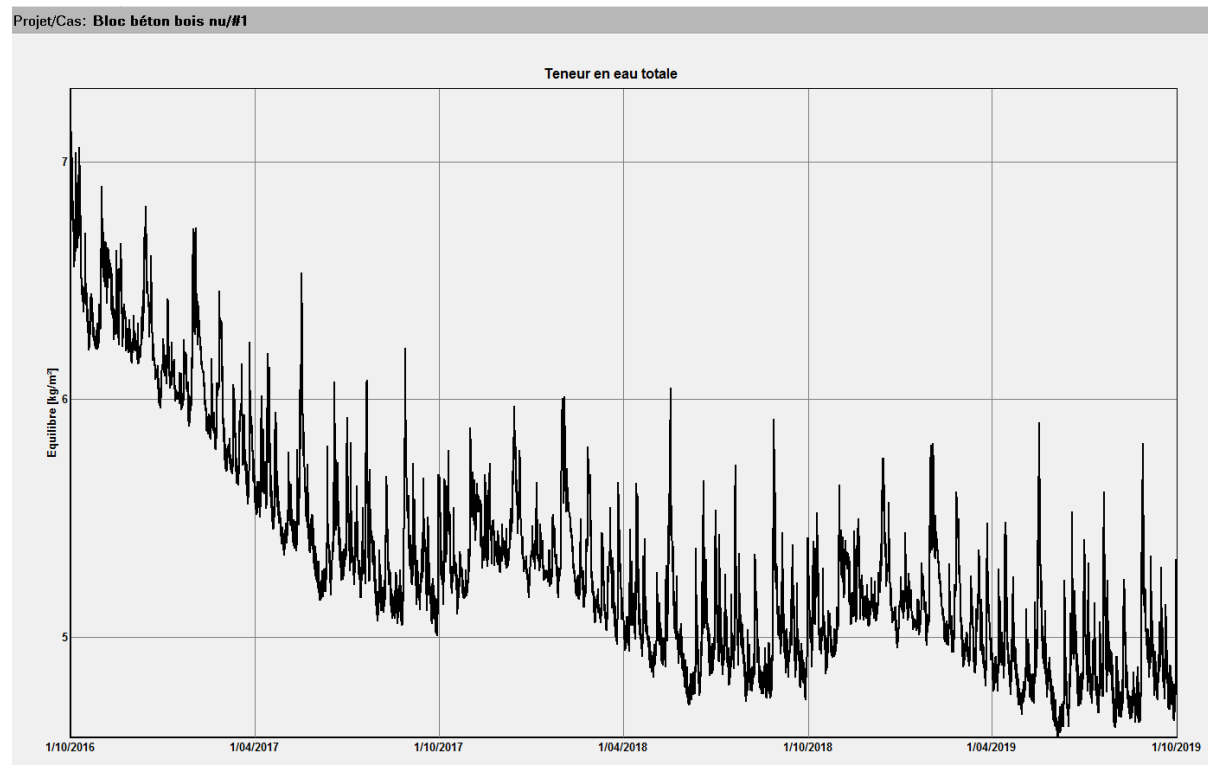
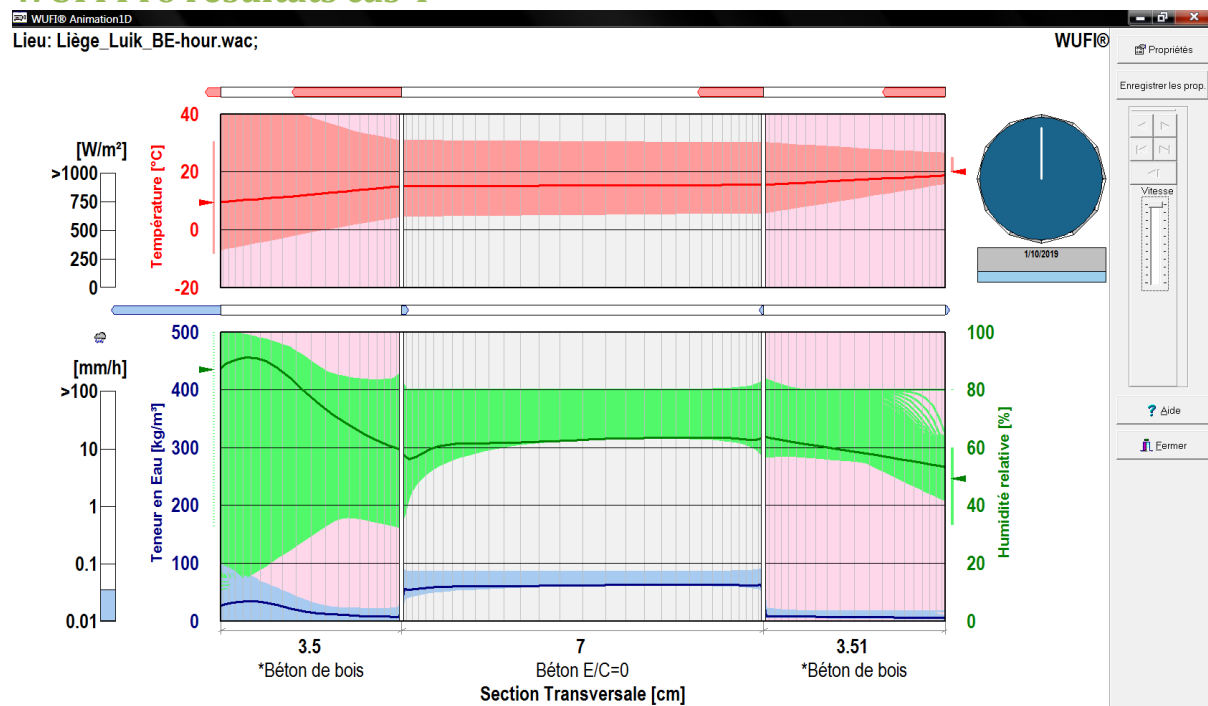
Projet/Cas: Cas 3: remplissage cellulaire/#3 remplissage cellulaire

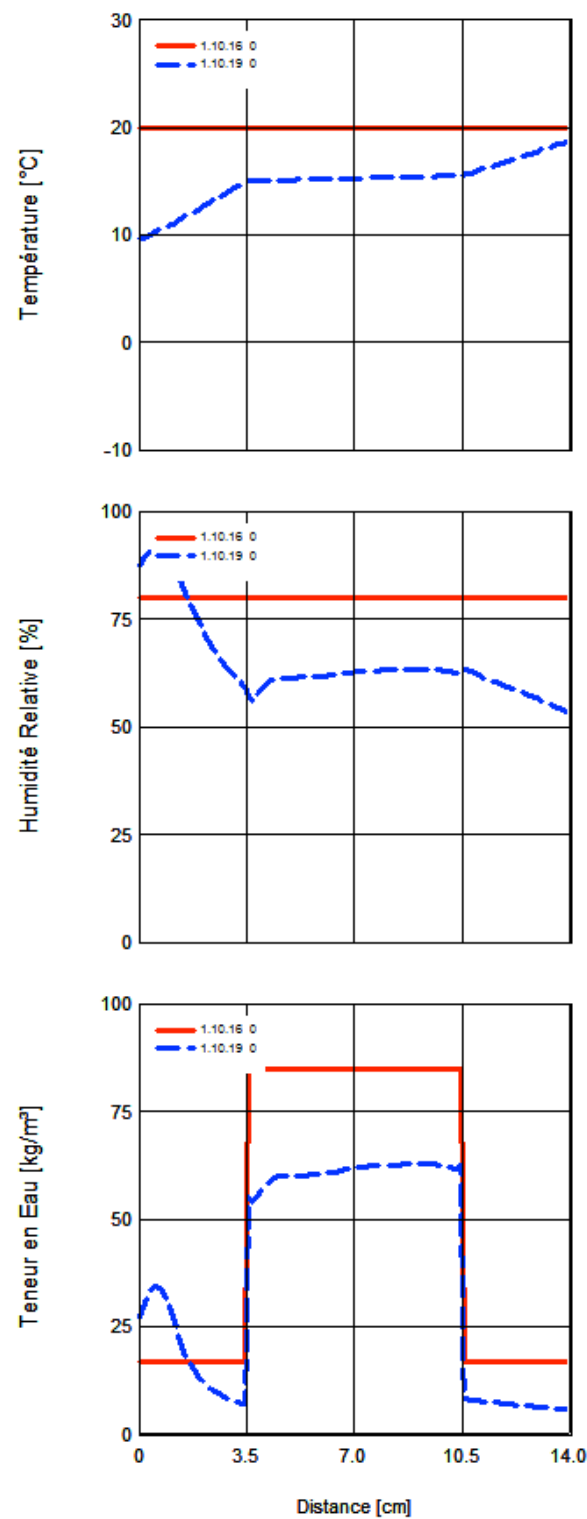




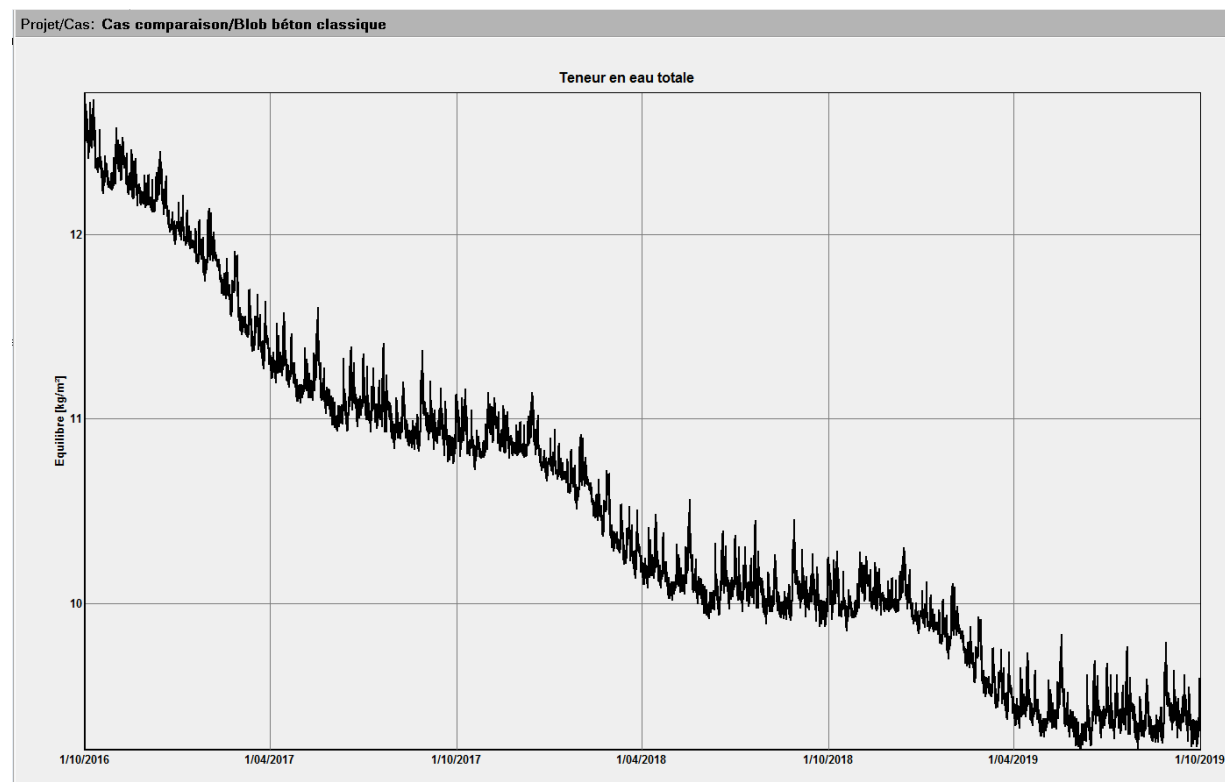
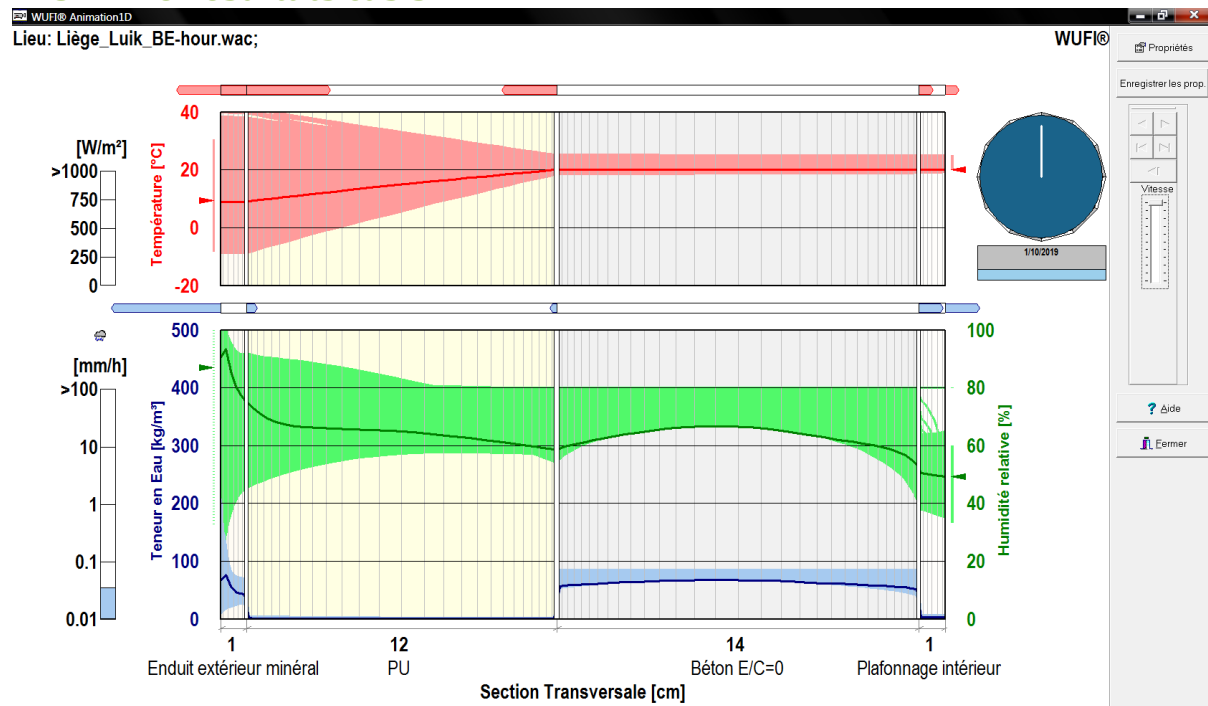


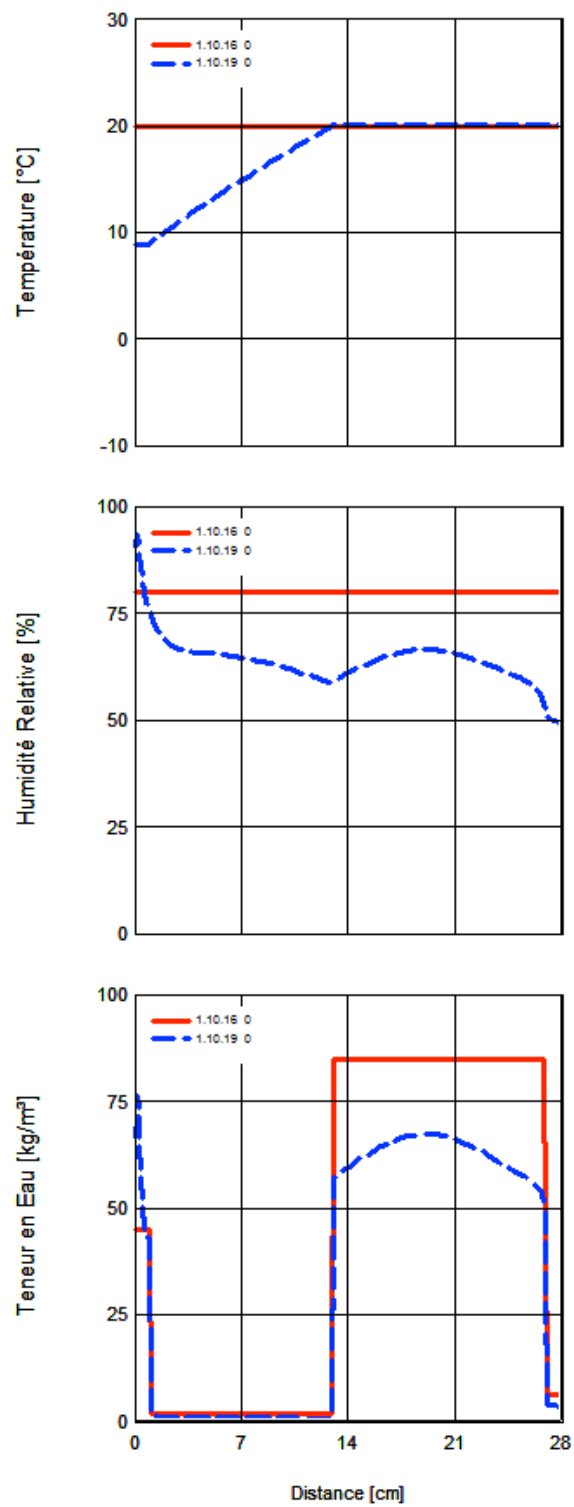
## WUFI Pro résultats cas 4





## WUFI Pro résultats cas 5





## MBV autres matériaux

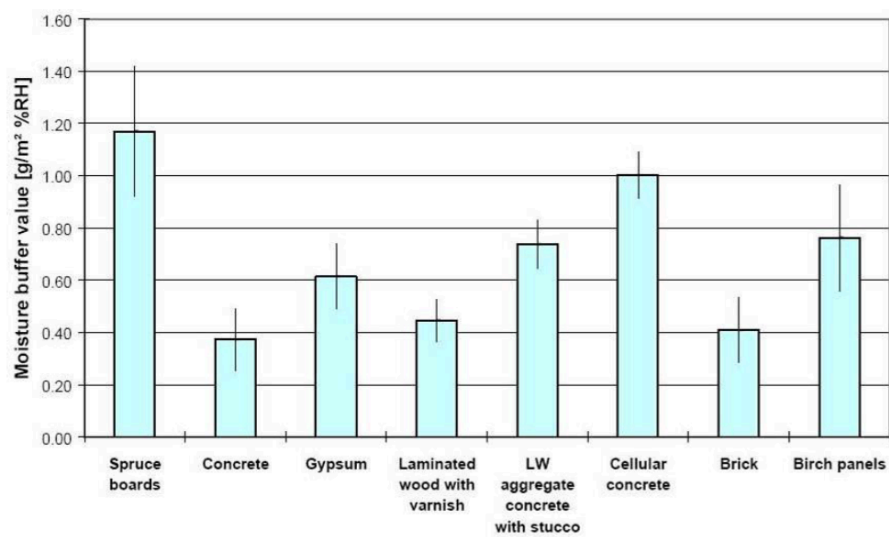


Figure 141 : Moisture buffer value of different material measured during Nordtest project<sup>58</sup>

<sup>58</sup> *Moisture buffering of building materials*, C. Rode et al., final report, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, 2005

(Evrard, 2008, page 107)

## LCIP: ACV Prefer

Laetitia Delem

18 février 2016

Flémalle

## Objectif et champ de l'étude



■ **Objectif:**

- Impact blocs béton « style stépoc » vs blocs similaires en béton de bois (caractéristiques des blocs: voir fichier Mathieu)
- Plus-value du béton de bois?
- Principaux impacts?

■ **Unité fonctionnelle: 1m<sup>2</sup> de mur porteur avec une valeur U=0.24 W/m<sup>2</sup>K**

- Capacité portante: indéfinie jusqu'à présent!⇒ne tient pas compte de la résistance à la compression plus faible du béton de bois.
- Différence au niveau conductivité thermique⇒+-isolant PUR

Caractéristique	Bloc en béton traditionnel type "Stepoc"	Bloc en béton de bois type "Stepoc"
dimensions (mm x mm x mm) - LongueurXLargeurXHauteur	600 X 190 X 200	600 X 190 X 200
Conductivité thermique (W/mK)	1,42	0,12
résistance à la compression moyenne normalisé (Mpa)	10 Mpa	2,5 Mpa
Masse du bloc sec (kg)	23,39	9,23
quantité de blocs par m <sup>2</sup> de murs	8,33	8,33
mise en œuvre	Déposé	Déposé
Béton de remplissage type béton prêt à l'emploi (C30/37) - Volume (l)	10,49	10,49
Ajout isolant (en PU - 0,028 w/mK) pour atteindre un coefficient de 0,24 W/m <sup>2</sup> K (m)	0,12	0,1
Quantité d'isolant en PU pour 1 m <sup>2</sup> (kg)	4,8	4

■ **Champ de l'étude:**

- Du berceau à la tombe
- Selon EN 15804+A1 2013 EPD - core rules for the product category of construction products (allocation en fin de vie, frontières du systèmes,...)

A 1 - 3			A 4 - 5		B 1 - 7					C 1 - 4			
PRODUCT stage			CONSTRUCTION PROCESS stage		USE STAGE					END OF LIFE stage			
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4
Raw material supply	Transport	Manufacturing	Transport	Construction- installation process	Use	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	De-construction demolition	Transport	Waste processing	Disposal
			scenario	scenario	scenario	scenario	scenario	scenario	scenario	scenario	scenario	scenario	scenario
					B6	Operational energy use							
					scenario								
					B7	Operational water use							
					scenario								
<ul style="list-style-type: none"><li>• Matières 1ères + emballage</li><li>• Énergie production</li><li>• Transport matières premières</li><li>• Béton de remplissage, PUR</li></ul>			<ul style="list-style-type: none"><li>• Transport vers le chantier</li><li>• Fin de vie emballage</li></ul>		<ul style="list-style-type: none"><li>• n/a</li></ul>					<ul style="list-style-type: none"><li>• Démolition</li><li>• Transport déchets</li><li>• Traitement des déchets (PUR, bloc, béton)</li></ul>			

## ■ Inventaire du cycle de vie

- Inventaire Mathieu (matières premières, transport, énergie de production, emballage (excl. PET straps), déchets de production).
- Ecoinvent v. 3.1 (incl. Infrastructure, émissions à long terme, Allocation: cut off approach)
- Gate-to-grave:  
Scenarios: MMG

(<http://www.ovam.be/sites/default/files/atoms/files/Profil-Environmental-2015.pdf>)



# Scenario: transport vers le chantier



Tableau 3 : Scénario général pour le transport des matériaux de construction de l'usine au chantier.

groupe produit/catégorie matériaux	Organisation du transport		Moyen de transport pour le transport							Distance de transport moyenne pour le transport de		
	% directement de l'usine au chantier	% via un commerçant intermédiaire	usine vers chantier			usine vers commerçant	commerçant vers chantier			usine vers chantier	usine vers commerçant	commerçant vers chantier
			camion lourd (> 16 tonnes)	camion léger (3,5-16 tonnes)	camionnette (< 3,5 tonnes)	camion lourd (> 16 tonnes)	camion léger (3,5-16 tonnes)	camionnette (< 3,5 tonnes)		km	km	km
matériaux en vrac pour gros oeuvre (ex. ciment, sable, graviers, etc.)	75%	25%	100%	0%	0%	100%	90%	10%	0%	100	100	35
béton frais	100%	0%	100%	0%	0%	na	na	na	na	35	na	na
produits préfabriqués pour gros oeuvre (ex. hourdis, chevrons)	100%	0%	100%	0%	0%	100%	100%	0%	0%	100	100	35
produits indépendants pour le gros oeuvre (ex. blocs de construction, béton cellulaire, revêtements de toit (tuiles, EPDM, etc.))	40%	60%	100%	0%	0%	100%	85%	15%	0%	100	100	35
brique silico-calcaire	40%	60%	100%	0%	0%	100%	85%	15%	0%	200	200	35
isolation	40%	60%	100%	0%	0%	100%	85%	15%	0%	125	125	35
produits de finition : revêtements de sol (ex. tapis, linoléum, parquet laminé)	10%	90%	90%	10%	0%	100%	90%	10%	0%	150	150	35
carrelage <sup>30</sup>	0%	100%	na	na	na	100%	90%	10%	0%	1500	1500	35
produits de finition : enduits (ex. plâtre, enduits extérieurs, plaques de plâtre)	40%	60%	50%	50%	0%	100%	50%	50%	0%	100	100	35
produits de finition : menuiserie (ex. châssis, escaliers)	90%	10%	50%	45%	5%	100%	40%	50%	10%	100	100	35
produits de finition : peinture et vernis	10%	90%	0%	100%	0%	100%	0%	80%	20%	100	100	35
installations (ex. chaudière, radiateurs, ventilation)	0%	100%	na	na	na	100%	0%	80%	20%	na	100	35

Master title - 19/02/2016 - Page 8

# Scenario: fin de vie



Tableau 4 Scénarii des déchets pour les 26 catégories de déchets qui sont considérés dans ce projet

Groupe produit/Catégorie déchets	Description	tri (%)	incinération <sup>42</sup> (%)	recyclage/réutilisation (%)	trié sur le chantier <sup>43</sup> (%)
Déchets inertes	e.a. béton (ex. éléments de structure en béton et tuiles en béton), produits en céramique (ex. dalles, tuiles, briques) et matériaux en vrac (ex. sable, graviers)	5	0	95	75
Béton cellulaire	e.a. éléments, blocs	70	0	30	30
Polyoléfinés (PP, PE)	e.a. conduites, films (ex. membranes d'étanchéité à l'eau et à l'air) hors emballages	10	85	5	0
Profilés en PVC	e.a. châssis	10	45	45	0
Câblage PVC	e.a. câbles électriques et isolation de fil	10	40	50	0
Films PVC	e.a. toitures et membranes étanches (ex. pour les piscines) et revêtement de sol	15	65	20	0
Conduites PVC	e.a. pour les égouts <sup>44</sup>	10	30	50	0
Elastomères	e.a. revêtements de toit (EPDM)	100	0	0	0
Bitume	e.a. revêtements pour toit plat	100	0	0	0
Métaux	e.a. profils en aluminium, fixations métalliques (ex. clous, vis), acier, cuivre (plaques et conduites) et zinc (ex. revêtement de toit)	5	0	95	85
Plâtre	e.a. blocs et panneaux (carton-plâtre)	95	0	5	5
Enduits	Enduits intérieur et extérieur	100	0	0	0
Verre	e.a. verre plat pour châssis	30	0	70	70
Bois traité chimiquement	e.a. pour les fermes et les revêtements de façade renforcé	5	95	0	40
Bois non traité (peut être peint)	e.a. parquet massif, revêtements de façade en cèdre, châssis peints	5	20	75	40
Produits composite en bois	e.a. OSB, MDF, panneaux agglomérés, placage et planches laminés	5	75	20	40
Isolation ignifuge	e.a. PUR, EPS, laine de bois, cellulose et XPS	0	100	0	0
Isolation non ignifuge	e.a. laine de verre et laine de roche	100	0	0	0

Master title - 19/02/2016 - Page 9



## ■ Simplifications

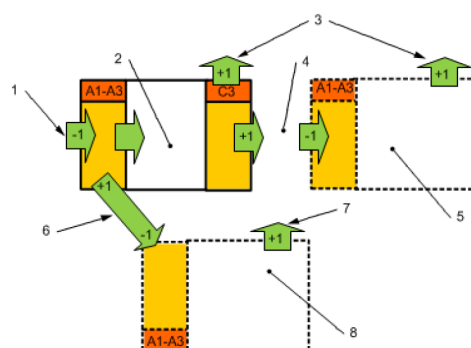
- Béton de remplissage= processus ecoinvent (CEM I)
- Sable naturel au lieu de concassé (pour la production des blocs)
- Transport: taux de chargement par défaut (ecoinvent<100%), pas tenu compte des retours à vide
- Pas de consommation électrique liée à la pompe (eau du puit)
- Pas d'infrastructures propre au processus de production
- Fin de vie:
  - Énergie de démolition: Impact lié à la démolition d'un kg de béton de bois= impact lié à la démolition d'un kg de béton
  - Traitement des déchets:
    - béton de bois=scenario inerte (5% mis en décharge, 95% recyclage)
    - suppose inert (pas d'effluents provenant du bois)
    - → en réalité??
- CO<sub>2</sub> biogénique = 0 sur le cycle de vie

**NBN EN 16485: 2014** Round and sawn timber - Environmental Product Declarations  
- Product category rules for wood and woodbased products for use in construction

“NOTE For all product systems over the wood chain:

- Biogenic carbon balance **over life cycle** = 0;
- Contribution of biogenic CO<sub>2</sub> to GWP over life cycle =0.”

**Suppose que le bois provient d'exploitation durable.**



## Encodage dans OpenLCA

								(Rtot-Rbloc)*Lambda isolant	
	Résistance thermique totale paroi	Lambda isolant	Lambda bloc	Lambda remplissage	Epaisseurs paroi	Epaisseur remplissage	Résistance thermique bloc	Epaisseur isolant	
Cas 1	4,16	0,028	1,42	2,1	0,076	0,122	0,09	0,114	12 cm
Cas 2	4,16	0,028	0,12	2,1	0,076	0,122	0,69	0,097	10 cm
Cas 3	4,16	0,028	0,12	2,1	0,076	0,122	0,69	0,097	10 cm
Cas 4	4,16	0,028	0,12	0,11	0,076	0,122	1,74	0,068	7 cm
Cas 5	4,16	0,04	0,12	2,1	0,076	0,122	0,69	0,139	14 cm

### 1

Bloc stepoc + remplissage classique + 12cm PUR						
Products	Quantité	Unité	Remarques			
production mur en bloc stepoc béton (8,33 blocs/m2) + isolant PUR	1	m2				
Conductivité thermique bloc vide	1,42	W/mK				
Conductivité thermique PUR	0,028	W/mK				
Masse volumique béton de remplissage	2315	kg/m3				
Input parameters						
PUR	4,8	kg				
kg_par_bloc	23,39	kg	bloc sec			
nombre_blocs	8,33					
Water, well, in ground, BE	10,03	l				
Cement, blast furnace slag 36-65%, non-US [Europe without Switzerland]   product	15,28	kg	CEM III 42,5N pour formulation du béton			
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 [RER]   transport, freight, lorry 1	2302,17727	kgkm	transport ciment+transport concassé 2/8+huile minérale+ palette (25kg/palette)			
Sand [BE]   gravel and quarry operation   Alloc Rec, U	78,78	kg	approximation pour sable de concassage (seulement sable naturel disponible dans ecoinvent)			
Gravel, crushed [BE]   production   Alloc Rec, U	103,14	kg	granulats concassés 2/6 + 2/8			
Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 [RER]   transport, freight, lorry	1360,8	kgkm	transport concassé 2/8+huile minérale+ palette (25kg/palette)			
Lubricating oil [GLO]   market for   Alloc Rec, U	0,0028215	kg	huile minérale: suppose 900kg/m3			
EUR-flat pallet [GLO]   market for   Alloc Rec, U	0,01006441	p	chiffres tiennent compte du fait que chaque palette est utilisée 11,5x			
Polyurethane, rigid foam [RER]   production   Alloc Rec, S	4,8	kg	production PUR			
"isolatie": average transport from factory to construction site_MMG_EI3_ide 160	600	kg.km	transport du PUR vers le chantier			
Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous [GLO]   market for   Alloc Rec,	0	kg	PET straps			
Electricity, low voltage [BE]   market for   Alloc Rec, S	0,4322	kWh	consommation électrique du malaxeur, presse et robot palétiseur			
Diesel, burned in building machine [GLO]   processing   Alloc Rec, U_diesel RER_2	0,0408	MJ	transport interne matières premières			
Concrete, 35MPa [RoW]   concrete production 35MPa, RNA only   Alloc Rec, S	0,0873817	m3	béton de remplissage: 10,49 litre de béton par bloc, 8,33 blocs par m2			
"stortbeton": average transport from factory to construction site_MMG_EI3	7080,10224	kg.km	transport béton de remplissage: 2315kg/m3 (info de processus ecoinvent pour béton)			
"losse producten voor ruwbouw": average transport from factory to construction	19483,87	kg/km	transport blocs vers le chantier			
Disposal, building, inert material (e.g.concrete (not reinforced), mortar) , product	2,07	kg				
Disposal, building, PUR insulation, EOLisolatie _brandbaar_EI3_1602Ide	4,8	kg	fin de vie PUR			
Disposal, building, inert material (e.g.concrete (not reinforced), mortar) , EOLiner	397,127336	kg	fin de vie béton de remplissage+bloc (8,33 blocs par m2, 23,39 kg par bloc sec)			
Waste wood, untreated [CH]   treatment of, municipal incineration   Alloc Rec, S	0,010064412	kg	fin de vie palette: pas comptabilisé de transport: masse très faible par rapport à transport du béton (bloc et béton prêt à l'emploi) vers le chantier et vers EOL			
			pas comptabilisé de transport des palettes vers chantier et à partir du chantier: masse très faible par rapport à transport du béton (bloc et béton prêt à l'emploi) vers le chantier et vers EOL			

### 2

Bloc béton bois + remplissage classique + 10cm PUR						
Products	Quantité	Unité	Remarques			
production mur en bloc stepoc béton de bois (8,33 blocs/m2) + isolant PUR	1	m2				
Conductivité thermique bloc vide	0,12	W/mK				
Conductivité thermique PUR	0,028	W/mK				
Masse volumique béton de remplissage	2315	kg/m3				
Input parameters						
PUR	4	kg				
kg_par_bloc	9,23	kg				
nombre_blocs	8,33					
Water, well, in ground, BE	26,9	l				
Cement, blast furnace slag 36-65%, non-US [Europe without Switzerland]   product	28,6	kg				
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 [RER]   transport, freight, lorry 1	4393,77727	kgkm	transport ciment, granulats+lubrifiant+palette+bois			
Sand [BE]   gravel and quarry operation   Alloc Rec, U	11,33	kg	transport du sable			
Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 [RER]   transport, freight, lorry	113,3	kgkm				
Lubricating oil [GLO]   market for   Alloc Rec, U	0,0028215	kg				
EUR-flat pallet [GLO]   market for   Alloc Rec, U	0,01006441	p	suppose que chaque palette est utilisée 11,5x			
Polyurethane, rigid foam [RER]   production   Alloc Rec, S	4	kg				
"isolatie": average transport from factory to construction site_MMG_EI3_ide 160	500	kg				
Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous [GLO]   market for   Alloc Rec,	0	kg	PET straps			
Electricity, low voltage [BE]   market for   Alloc Rec, S	1,51265221	kWh				
Diesel, burned in building machine [GLO]   processing   Alloc Rec, U_diesel RER_2	0,0408	MJ				
Concrete, 35MPa [RoW]   concrete production 35MPa, RNA only   Alloc Rec, S	0,0873817	m3	10,49 litre de béton par bloc, 8,33 blocs par m2			
"stortbeton": average transport from factory to construction site_MMG_EI3	7080,10224	kg	2315kg/m3 (info de processus ecoinvent pour béton)			
"losse producten voor ruwbouw": average transport from factory to construction	7688,59	kg				
Sawlog and veneer log, hardwood, measured as solid wood under bark [RER]   m3	0,03034286	m3				
Disposal, building, inert material (e.g.concrete (not reinforced), mortar) , product	0,88067	kg				
Disposal, building, PUR insulation, EOLisolatie _brandbaar_EI3_1602Ide	4	kg	fin de vie PUR			
Disposal, building, inert material (e.g.concrete (not reinforced), mortar) , EOLiner	279,174536	kg	béton de remplissage+bloc			
Waste wood, untreated [CH]   treatment of, municipal incineration   Alloc Rec, S	0,2516103	kg	Fin de vie palette			

## 3

## Bloc béton bois (bois recyclé) + remplissage classique + 10cm PUR

Products	Quantité	Unité	Remarques
production mur en bloc stepoc béton de bois (8,33 blocs/m2) + isolant PUR	1	m2	
Conductivité thermique bloc vide	0,12	W/mK	
Conductivité thermique PUR	0,028	W/mK	
Masse volumique béton de remplissage	2315	kg/m3	
<b>Input parameters</b>			
PUR	4	kg	
kg_par_bloc	9,23	kg	
nombre_blocs	8,33		
Water, well, in ground, BE	26,9	l	
Cement, blast furnace slag 36-65%, non-US (Europe without Switzerland)   product	28,6	kg	
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EUROS {RER}   transport, freight, lorry 1	3013,17727	kgkm	transport ciment, granulats+lubrifiant+palette
Sand {BE}   gravel and quarry operation   Alloc Rec, U	11,33	kg	transport du sable
Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EUROS {RER}   transport, freight, lorry	113,3	kgkm	
Lubricating oil {GLO}   market for   Alloc Rec, U	0,0028215	kg	
EUR-flat pallet {GLO}   market for   Alloc Rec, U	0,01006441	p	supppose que chaque palette est utilisée 11,5x
Polyurethane, rigid foam {RER}   production   Alloc Rec, S	4	kg	
"isolatie": average transport from factory to construction site_MMG_EI3_lde 160	500	kg	
Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {GLO}   market for   Alloc Rec,	0	kg	PET straps
Electricity, low voltage {BE}   market for   Alloc Rec, S	1,51265221	kWh	
Diesel, burned in building machine {GLO}   processing   Alloc Rec, U_diesel RER_2	0,0408	MJ	
Concrete, 35MPa {RoW}   concrete production 35MPa, RNA only   Alloc Rec, S	0,0873817	m3	10,49 litre de béton par bloc, 8,33 blocs par m2
"stortbeton": average transport from factory to construction site_MMG_EI3	7080,10224	kg	2315kg/m3 (info de processus ecoinvent pour béton)
"losse producten voor ruwbouw": average transport from factory to construction	7688,59	kg	
Sawlog and veneer log, hardwood, measured as solid wood under bark {RER}   ma	0	m3	Car bois recyclé
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EUROS {RER}   transport, freight, lorry 1	424,8	kg.km	transport du bois recyclé sur 20km
Disposal, building, inert material (e.g.concrete (not reinforced), mortar) , product	0,88067	kg	
Disposal, building, PUR insulation, EOLisolatie_brandbaar_EI3_1602lde	4	kg	fin de vie PUR
Disposal, building, inert material (e.g.concrete (not reinforced), mortar) , EOLiner	279,174536	kg	béton de remplissage+bloc
Waste wood, untreated {CH}   treatment of, municipal incineration   Alloc Rec, S	0,2516103	kg	Fin de vie palette

## 4

## Bloc béton bois + remplissage cellulaire + 7cm PUR

Products	Quantité	Unité	Remarques
production mur en bloc stepoc béton de bois (8,33 blocs/m2) + isolant PUR	1	m2	
Conductivité thermique bloc vide	0,12	W/mK	
Conductivité thermique PUR	0,028	W/mK	Masse volumique 40kg/m3
Masse volumique béton de remplissage	350	kg/m3	
<b>Input parameters</b>			
PUR	2,8	kg	
kg_par_bloc	9,23	kg	
nombre_blocs	8,33		
Water, well, in ground, BE	26,9	l	
Cement, blast furnace slag 36-65%, non-US (Europe without Switzerland)   product	28,6	kg	
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EUROS {RER}   transport, freight, lorry 1	4393,77727	kgkm	transport ciment, granulats+lubrifiant+palette+bois
Sand {BE}   gravel and quarry operation   Alloc Rec, U	11,33	kg	transport du sable
Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EUROS {RER}   transport, freight, lorry	113,3	kgkm	
Lubricating oil {GLO}   market for   Alloc Rec, U	0,0028215	kg	
EUR-flat pallet {GLO}   market for   Alloc Rec, U	0,01006441	p	supppose que chaque palette est utilisée 11,5x
Polyurethane, rigid foam {RER}   production   Alloc Rec, S	2,8	kg	
"isolatie": average transport from factory to construction site_MMG_EI3_lde 160	350	kg.km	
Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {GLO}   market for   Alloc Rec,	0	kg	PET straps
Electricity, low voltage {BE}   market for   Alloc Rec, S	1,51265221	kWh	
Diesel, burned in building machine {GLO}   processing   Alloc Rec, U_diesel RER_2	0,0408	MJ	
Béton cellulaire	30,583595	m3	10,49 litre de béton par bloc, 8,33 blocs par m2
"stortbeton": average transport from factory to construction site_MMG_EI3	1070,42583	kg.km	Transport béton cellulaire
"losse producten voor ruwbouw": average transport from factory to construction	7688,59	kg	
Sawlog and veneer log, hardwood, measured as solid wood under bark {RER}   ma	0,03034286	m3	Bois de foret
Disposal, building, inert material (e.g.concrete (not reinforced), mortar) , product	0,88067	kg	
Disposal, building, PUR insulation, EOLisolatie_brandbaar_EI3_1602lde	2,8	kg	fin de vie PUR
Disposal, building, inert material (e.g.concrete (not reinforced), mortar) , EOLiner	107,469495	kg	béton de remplissage+bloc
Waste wood, untreated {CH}   treatment of, municipal incineration   Alloc Rec, S	0,2516103	kg	Fin de vie palette

## 5

## Bloc béton bois + remplissage classique + 14cm cellulose

Products	Quantité	Unité	Remarques
production mur en bloc stepoc béton de bois (8,33 blocs/m2) + isolant PUR	1	m2	
Conductivité thermique bloc vide	0,12	W/mK	
Conductivité thermique cellulose	0,04	W/mK	masse volumique 50kg/m3
Masse volumique béton de remplissage	2315	kg/m3	
<b>Input parameters</b>			
Cellulose	7	kg	
kg_par_bloc	9,23	kg	
nombre_blocs	8,33		
Water, well, in ground, BE	26,9	l	
Cement, blast furnace slag 36-65%, non-US {Europe without Switzerland}  product	28,6	kg	
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight, lorry 1	4393,77727	kgkm	transport ciment, granulats+lubrifiant+palette+bois
Sand {BE}  gravel and quarry operation   Alloc Rec, U	11,33	kg	transport du sable
Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight, lorry	113,3	kgkm	
Lubricating oil {GLO}  market for   Alloc Rec, U	0,0028215	kg	
EUR-flat pallet {GLO}  market for   Alloc Rec, U	0,01006441	p	supppose que chaque palette est utilisée 11,5x
Cellulose	7	kg	
"isolatie": average transport from factory to construction site_MMG_EI3_lde 160	875	kg	
Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {GLO}  market for   Alloc Rec,	0	kg	PET straps
Electricity, low voltage {BE}  market for   Alloc Rec, S	1,51265221	kWh	
Diesel, burned in building machine {GLO}  processing   Alloc Rec, U_diesel RER_2	0,0408	MJ	
Concrete, 35MPa {RoW}  concrete production 35MPa, RNA only   Alloc Rec, S	0,0873817	m3	10,49 litre de béton par bloc, 8,33 blocs par m2
"stortbeton": average transport from factory to construction site_MMG_EI3	7080,10224	kg	2315kg/m3 (info de processus ecoinvent pour béton)
"losse producten voor ruwbouw": average transport from factory to construction	7688,59	kg	
Sawlog and veneer log, hardwood, measured as solid wood under bark {RER}  ma	0,03034286	m3	
Disposal, building, inert material (e.g.concrete (not reinforced), mortar) , product	0,88067	kg	
/	7	kg	fin de vie Cellulose
Disposal, building, inert material (e.g.concrete (not reinforced), mortar) , EOLiner	279,174536	kg	béton de remplissage+bloc
Waste wood, untreated {CH}  treatment of, municipal incineration   Alloc Rec, S	0,2516103	kg	Fin de vie palette



# Résultats ACV

Cas 1

Cas 2

Cas 3

Cas 4

Cas 5

Reference unit	TOTAL	Béton remplissage	Ciment	Déchet béton	Diesel	Electricité	Fin vie béton	Fin vie bois	Fin vie PUR	Gravel	Huile	Palette	PUR	Sable	Trans béton	Trans blocs	Trans ciment	Trans gravel	Trans sable
kg SO2 eq.	0.180360358	0.038452134	0.011287	6.36233E-05	2.87E-05	0.000511	0.012206057	5.6458E-05	0.00695612	0.002621	2.65E-05	0.000278	0.084984	0.001192	0.00511981	0.0140893	0.00115779	0.000897	0.000434
kg CO2 eq.	69.70877417	23.20923771	0.909616	0.008335139	0.003759	0.1589253	1.599086427	0.34931393	11.8688524	0.458086	0.002963	-0.35271	20.9576	0.190446	0.94675179	2.6033927	0.38634164	0.3055625	0.080232
kg antimony eq.	0.000136769	9.08975E-06	2.05E-06	1.42184E-09	6.41E-10	3.99E-07	2.72779E-07	5.4659E-09	2.932E-06	2.01E-06	1.07E-08	1.59E-07	0.000107	5.53E-07	2.814E-06	7.744E-06	0.402E-07	8.405E-07	2.38E-07
MJ	610.7573092	89.12224629	26.73843	0.115680015	0.052143	1.886368	22.17925814	0.04251663	4.78554735	5.640855	0.20463	1.167304	392.0668	2.484495	14.1263613	38.874728	5.65556717	4.4171353	1.197136
kg PO4--- eq.	0.046593426	0.009525917	0.002731	1.48483E-05	6.7E-06	0.00024	0.002484619	7.5014E-05	0.00050588	0.000976	5.79E-06	0.000115	0.018386	0.000373	0.001366	0.0037591	0.00031025	0.0002378	0.000116
kg 1,4-dichlorobenzene eq.	8.753139709	1.021026802	0.294369	0.003657891	0.000166	0.040438	0.070579528	0.00241935	4.89868133	0.173529	0.000782	0.02174	1.78197	0.053276	0.098744789	0.2406503	0.03286894	0.0238162	0.007411
kg 1,4-dichlorobenzene eq.	11.743025056	2.454581824	0.705377	0.001382446	0.000511	0.106963	0.265200628	0.00272714	3.55256852	0.368712	0.002085	0.0165407	3.302066	0.118648	0.16540187	0.4552153	0.0474619	0.014018	0.004619
kg 1,4-dichlorobenzene eq.	157.70160724	2741.228925	857.6576	1.332188135	0.601285	186.1932	255.77993028	6.626627277	5491.14649	445.0055	3.024098	48.6494	2626.238	128.6781	245.604747	675.88657	93.7021922	70.139935	20.81373
kg CFC-11 eq.	2.14355E-06	7.70632E-07	2.44E-07	1.03202E-09	4.65E-10	1.13E-08	1.97993E-07	3.8791E-08	5.04E-08	1.83E-09	4.3E-09	1.07E-07	2.22E-08	1.485E-07	6.0977E-08	4.779E-08	1.19E-08	3.54E-05	1.3E-05
kg ethylene eq.	0.012936121	0.001410558	0.00043	1.63038E-06	7.35E-07	2.15E-05	0.00031786	2.2532E-06	8.8948E-05	0.000114	1.47E-06	3.82E-05	0.009802	4.32E-05	0.00015308	0.0004213	4.689E-05	3.54E-05	1.3E-05
kg 1,4-dichlorobenzene eq.	0.175650459	0.054791268	0.015814	2.00433E-05	9.04E-06	0.004282	0.003845279	3.7454E-05	0.00487957	0.008387	2.88E-05	0.000944	0.006518	0.002637	0.00298131	0.0082043	0.00115594	0.0008622	0.000253

Reference unit	TOTAL	Béton remplissage	Ciment	Déchet béton	Diesel	Electricité	Fin vie bloc	Fin vie bois	Fin vie PUR	Gravel	Huile	Palette	PUR	Sable	Trans béton	Trans blocs	Trans ciment etc.	Trans PUR	Trans sable
kg SO2 eq.	0.176763932	0.038452882	0	0.021127	7.82821E-05	2.87E-05	0.001787	0.0248156	0.0057968	2.65E-05	0.000278	0.07082	0.00171	0.00512	0.000556	0.000214	0.001515	0.000362	7.47E-05
kg CO2 eq.	30.80118296	23.2096825	-40.0526	0.012406701	0.003759	0.533869	3.932637	0.3709139	9.807104	0.002963	-0.35271	17.4647	0.02739	0.946752	1.028122	0.071288	0.505659	0.06686	0.025441
kg antimony eq.	0.000118402	9.08992E-06	0.384E-06	1.37601E-08	6.41E-10	1.4E-06	1.68E-06	5.47E-09	1.99E-06	1.07E-08	1.59E-07	8.93E-05	7.95E-08	2.81E-06	3.06E-06	1.99E-07	1.41E-06	1.99E-07	7E-08
MJ	598.0094813	89.12398019	0	50.04706	0.245520502	0.052143	6.60208	77.830587	0.0425166	3.9881228	0.20463	1.167352	326.7223	0.357316	14.1263613	15.34048	10.7936815	0.997613	0.36777
kg PO4--- eq.	0.045272218	0.009526102	0	0.005112	1.90925E-05	6.7E-06	0.000839	0.0060524	7.501E-05	0.004582	5.79E-06	0.000115	0.015322	0.001483	0.00365999	0.001483	0.000592118	9.65E-05	1.98E-05
kg 1,4-dichlorobenzene eq.	7.837066533	1.021046668	0	0.550978	0.000816032	0.000511	0.154128	0.2586779	0.0024193	4.8087178	0.007082	0.021741	1.484977	0.007662	0.087447888	0.094964	0.062382949	0.006176	0.0019829
kg 1,4-dichlorobenzene eq.	11.12911776	2.454629589	0	1.320274	0.002044023	0.000511	0.374357	0.6480268	0.0027273	2.9460571	0.02085	0.102697	1.775222	0.017064	0.165417	0.011427	0.081056	0.011682	0.003952
kg 1,4-dichlorobenzene eq.	14920.39889	2741.282258	0	1605.302	2.536769416	0.601285	651.6556	804.16198	2.6266273	4575.9554	3.024098	48.6494	3751.769	18.50626	245.6047471	266.7137	178.830419	17.34477	5.8398403
kg CFC-11 eq.	2.71565E-06	7.70647E-07	0	4.58E-07	2.72814E-09	4.65E-10	3.95E-08	8.648E-07	3.875E-08	1.83E-09	4.3E-09	8.96E-08	3.2E-09	1.52088E-07	1.65E-07	1.16374E-07	1.07E-08	3.979E-08	1.3E-05
kg ethylene eq.	0.011815703	0.001410585	0	0.00804	2.55283E-06	7.35E-07	0.0008093	2.235E-06	7.412E-05	0.000168	6.21E-06	0.00153077	0.000166	8.93917E-05	0.000166	6.13E-05	1.08E-05	2.95E-06	1.3E-05
kg 1,4-dichlorobenzene eq.	0.180468296	0.054792335	0	0.0296	3.61171E-05	9.04E-06	0.014987	0.0114492	3.745E-05	0.0040663	2.88E-05	0.000944	0.005432	0.000379	0.002981308	0.003238	0.002206106	0.000211	7.179E-05

Reference unit	TOTAL	Béton remplissage	Ciment	Déchet béton	Diesel	Electricité	Fin vie bloc	Fin vie bois	Fin vie PUR	Gravel	Huile	Palette	PUR	Sable	Trans béton	Trans blocs	Trans ciment	Trans PUR	Trans sable
kg SO2 eq.	0.176283287	0.03845288	0.021127	7.83E-05	2.87E-05	0.001787	0.024816	5.65E-05	0.005797	2.65E-05	0.000278	0.07082	0.00171	0.00512	0.000556	0.000214	0.001515	0.000362	7.47E-05
kg CO2 eq.	70.6933688	23.2096893	12.93292	0.012406	0.003759	0.533869	3.932637	0.370914	9.8071	0.002963	-0.35271	17.4647	0.02739	0.946752	1.028122	0.071288	0.505659	0.06686	0.025441
kg antimony eq.	0.000117955	9.0899E-06	3.84E-06	1.38E-08	6.41E-10	1.4E-06	1.68E-06	5.47E-09	1.99E-06	1.07E-08	1.59E-07	8.93E-05	7.95E-08	2.81E-06	3.06E-06	1.99E-07	1.41E-06	1.99E-07	7E-08
MJ	595.6616367	89.1239802	50.04706	0.245521	0.052143	6.60208	77.83059	0.042517	3.988123	0.20463	1.167352	326.7223	0.357316	14.1263613	15.34048	10.43571	7.402223	0.997613	0.36777
kg PO4--- eq.	0.045143442	0.0095261	0.005112	1.91E-05	6.7E-06	0.000839	0.006052	7.5E-05	0.004588	5.79E-06	0.000115	0.015322	0.001483	0.00366	0.001483	0.004066	9.65E-05	1.98E-05	1.98E-05
kg 1,4-dichlorobenzene eq.	7.82349582	1.02104667	0.550978	0.000816	0.000166	0.154128	0.258678	0.002419	4.808718	0.007082	0.021741	1.484977	0.007662	0.087448	0.094964	0.060631	0.042782	0.006176	0.001983
kg 1,4-dichlorobenzene eq.	11.10340863	2.45462959	1.320274	0.002044	0.000511	0.374357	0.648027	0.002723	2.946057	0.02085	0.102697	1.775222	0.017064	0.165417	0.011427	0.081056	0.011682	0.003952	0.003952
kg 1,4-dichlorobenzene eq.	14881.49971	2741.28226	1605.302	2.536769	0.601285	651.6556	804.162	2.626627	4575.955	3.024098	48.6494	3751.769	18.50626	245.6047	266.7137	17.29002	122.641	17.34477	5.83984
kg CFC-11 eq.	2.69033E-06	7.7065E-07	4.58E-07	2.73E-09	4.65E-10	3.95E-08	8.65E-07	3.88E-08	1.83E-09	4.3E-09	8.96E-08	3.2E-09	1.52E-07	1.65E-07	1.13E-08	7.98E-08	1.07E-08	3.98E-09	1.3E-05
kg ethylene eq.	0.011796259	0.00141059	0.000804	2.55E-06	7.35E-07	0.000809	2.24E-06	7.41E-05	0.000168	6.21E-06	3.82E-05	0.008168	6.21E-06	0.000153	0.000166	6.13E-05	1.08E-05	2.95E-06	1.3E-05
kg 1,4-dichlorobenzene eq.	0.17998843	0.05479234	0.0296	3.61E-05	9.04E-06	0.014987	0.011449	3.75E-05	0.004066	2.88E-05	0.000944	0.005432	0.000379	0.002981	0.003238	0.000213	0.001513	0.000211	7.18E-05

Reference unit	TOTAL	Béton cellu Bois	Ciment	Déchets bêt Diesel	Electricité	Fin vie bloc	Fin vie bois	Fin vie PUR	Huile	Palette	PUR	Sable	Trans béton	Trans blocs	Trans ciment	Trans PUR	Trans sable		
kg SO2 eq.	0.11895183	0.016286	0	0.021127	7.83E-05	2.87E-05	0.001787	0.009553	5.65E-05	0.004058	2.65E-05	0.000278	0.049574	0.000171	0.000556	0.000221	0.000253	7.47E-05	
kg CO2 eq.	6.93261907	10.7901	-40.0526	12.93292	0.012406	0.003759	0.533869	1.513887	3.70914	6.923497	0.002963	-0.35271	12.22529	0.02739	1.043138	1.028122	0.737332	0.046802	0.025441
kg antimony eq.	8.07693E-05	3.96E-06	0	3.84E-06	1.38E-08	6.41E-10	1.4E-06	1.68E-06	5.47E-09	1.4E-06	1.07E-08	1.59E-07	6.25E-05	7.95E-08	4.25E-07	3.06E-06	2.08E-06	1.39E-07	7E-08
MJ	398.7326825	49.21957	0	50.04706	0.245521	0.052143	6.60208	29.96124	0.042517	2.791686	0.20463	1.167352	228.7056	0.357316	15.34048	10.79364	0.698329	0.36777	0.36777
kg PO4--- eq.	0.028962863	0.004101	0	0.005112	1.91E-05	6.7E-06	0.000839	0.00233	7.5E-05	0.003212	5.79E-06	0.000115	0.010725	0.001483	0.000592	6.75E-05	1.98E-05	1.98E-05	1.98E-05
kg 1,4-dichlorobenzene eq.	5.398478285	0.487346	0	0.550978	0.000816	0.000166	0.154128	0.258678	0.002419	2.856502	0.007082	0.021741	1.039484	0.007662	0.013221	0.094964	0.062383	0.004323	0.001983
kg 1,4-dichlorobenzene eq.	7.549050045	1.133425	0	1.320274	0.002044	0.000511	0.374357	0.249461	0.007273	2.06224	0.020085	0.102697	1.942655	0.017064	0.025009	0.179634	0.118193	0.008177	0.003952
kg 1,4-dichlorobenzene eq.	10556.12158	1583.595	0	1605.302	2.536769	0.601285	651.6556	309.5658	2.626627	3203.169	3.024098	48.6494	2626.238	18.50626	37.13259	266.7137	178.8304	12.14134	5.83984
kg CFC-11 eq.	1.73835E-06	4.94E-07	0	4.58E-07	2.73E-09	4.65E-10	3.95E-08	3.33E-07	3.88E-08	2.26E-08	1.83E-09	4.3E-09	6.27E-08	3.2E-09	2.3E-08	1.65E-07	1.16E-07	7.52E-09	3.98E-09
kg ethylene eq.	0.008347947	0.001046	0	0.000804	2.55E-06	7.35E-07	7.51E-05	0.000312	2.24E-06	5.19E-05	1.47E-06	3.82E-05	0.005718	6.21E-06	2.31E-05	0.000166	8.94E-05	7.57E-06	2.95E-06
kg 1,4-dichlorobenzene eq.	0.121769554	0.023579	0	0.02936	3.61E-05	9.04E-06	0.014987	0.004047	3.75E-05	0.002846	2.88E-05	0.000994	0.003980	0.000379	0.000451	0.002338	0.002206	0.000147	7.18E-05

## ACV Graphiques résultats

