

# Étude comparative de l'empreinte carbone dans la Grande Région

Focus sur des projet Luxembourgeois et extrapolation à la Grande Région



<b>1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>PERIMETRE DE L’ANALYSE .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Période d’analyse.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2</b>	<b>Unité fonctionnelle :.....</b>	<b>4</b>
<b>2.3</b>	<b>Périmètre des données :.....</b>	<b>5</b>
<b>2.4</b>	<b>Phases du cycle de vie : .....</b>	<b>5</b>
<b>2.5</b>	<b>Carbone biogénique : .....</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>DONNEES ENVIRONNEMENTALES .....</b>	<b>9</b>
<b>3.1</b>	<b>Norme EN 15804.....</b>	<b>9</b>
<b>3.2</b>	<b>Bibliothèque commune de données environnementales .....</b>	<b>9</b>
<b>3.3</b>	<b>Donnée générique / Donnée spécifique fabricant.....</b>	<b>12</b>
<b>3.4</b>	<b>Distance de transport .....</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>METHODOLOGIE DE CALCUL .....</b>	<b>14</b>
<b>4.1</b>	<b>Répartition sous-sol / hors-sol.....</b>	<b>14</b>
<b>4.2</b>	<b>Substitution volumique : Variante réelle / opposées .....</b>	<b>14</b>
<b>4.3</b>	<b>Équivalent volumique : Bois → Béton .....</b>	<b>15</b>
4.3.1	Répartition entre parois horizontales et verticales : .....	15
4.3.2	Équivalent structurelle selon le types de parois et le types de matériaux : .....	15
4.3.3	Rapport de conversion volumique équivalent : bois / béton + acier .....	16
<b>4.4</b>	<b>Équivalent volumique : Béton → Bois .....</b>	<b>17</b>
4.4.1	Répartition entre parois horizontales et verticales ainsi que par types de bois .....	17
4.4.2	Équivalent structurelle selon le types de parois et le types de matériaux : .....	17
<b>5</b>	<b>VARIANTE 1 : CONSTRUCTION MODULAIRE BOIS - WILTZ .....</b>	<b>18</b>
<b>5.1</b>	<b>Description de la variante 1.0 .....</b>	<b>18</b>
<b>5.2</b>	<b>Résultat de la variante 1.0 : Modulaire bois .....</b>	<b>19</b>
<b>5.3</b>	<b>Résultat de la variante 1.1 : Modulaire béton .....</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>VARIANTE 2 : CONSTRUCTION BOIS / BETON - EHLANGE .....</b>	<b>25</b>
<b>6.1</b>	<b>Description de la variante 2.0 .....</b>	<b>25</b>
<b>6.2</b>	<b>Résultat de la variante 2.0 : Bois / Béton.....</b>	<b>26</b>
<b>6.3</b>	<b>Résultat de la variante 2.1 : Classique béton .....</b>	<b>29</b>
<b>7</b>	<b>VARIANTE 3 : CONSTRUCTION CLASSIQUE BETON - BOUS .....</b>	<b>32</b>

---

7.1	Description de la variante 3.0 .....	32
7.2	Résultat de la variante 3.0 : Classique béton .....	33
7.3	Résultat de la variante 3.1 : Classique bois .....	36
8	ANALYSE DES RESULTATS .....	39
9	CONCLUSION .....	40
10	ANNEXES.....	41

## 1 INTRODUCTION

Ce rapport technique présente les hypothèses et les résultats d'une analyse comparative de l'empreinte carbone des matériaux de construction, appliquée à trois variantes de logements résidentiels au Luxembourg.

L'objectif principal est d'évaluer l'impact environnemental des matériaux constituant la structure, principalement en bois ou en béton, sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment.

Afin d'atteindre cet objectif, l'étude s'articule autour de deux approches complémentaires visant à quantifier et comparer l'empreinte écologique des différentes solutions constructives :

**1<sup>ère</sup> analyse - Variante de base** : Selon leurs caractéristiques réelles avec un encodage des bordereaux.

Cette première approche repose sur l'encodage des bordereaux tels qu'ils ont été établis pour chaque projet. Elle consiste à comparer les bâtiments dans leur configuration d'origine, afin de mettre en évidence les différences environnementales résultant des choix constructifs, malgré les spécificités propres à chaque conception.

- Exemple : « Bois » ou « Béton »

**2<sup>ème</sup> analyse - Variante opposée** : Selon leurs caractéristiques opposées avec une adaptation des quantités des bordereaux.

La seconde approche simule une inversion du matériau principal de la structure, en adaptant les quantités issues des bordereaux. L'objectif est de comparer un même bâtiment avec son équivalent réalisé dans le matériau opposé. Cette approche repose sur des hypothèses de calcul garantissant la comparabilité des volumes de matériaux.

- Exemple : « Bois → Béton » ou « Béton → Bois »

## 2 PÉRIMÈTRE DE L'ANALYSE

### 2.1 Période d'analyse

La durée pour les évaluations du cycle de vie menées dans le cadre européen « Level(s) » est de 50 ans.

- Période de calcul : 50 années

Remarque : Dans le cadre de cette étude portant sur les éléments du gros œuvre, de l'infrastructure ainsi que du clos et couvert, la durée de vie de ces éléments est définie « En tant que bâtiment » ou « Permanent », car ces matériaux restent généralement en place jusqu'à la fin de vie de l'édifice. Ils ne font donc pas l'objet d'une réparation ou d'un remplacement au cours du cycle de vie, les étapes [B3 – B4 – B5] sont donc nulles.

### 2.2 Unité fonctionnelle :

Les matériaux de construction étudiés (béton / bois / acier) sont évalués sur la base d'une unité fonctionnelle commune, exprimée en :

- Unité fonctionnelle : Mètre cube (m<sup>3</sup>)

Cette unité permet d'assurer une comparaison cohérente des performances environnementales des différents matériaux sur une base équivalente.

## 2.3 Périmètre des données :

L'objectif de cette étude est d'analyser l'impact environnemental des éléments constructifs dits « permanents » d'une habitation, c'est-à-dire ceux qui demeurent en place jusqu'à la fin de vie du bâtiment, tout en excluant les systèmes techniques et les composants esthétiques, généralement associés à des choix fonctionnels, architecturaux ou esthétique spécifique propres à chaque projet.

### Éléments non évaluables :

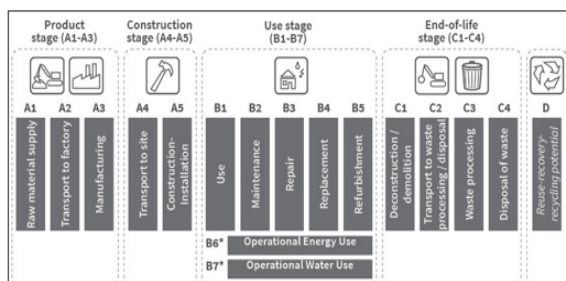
- Les éléments techniques : Réseau électrique / Réseau hydraulique / Réseau aéraulique / ....
- Les éléments esthétiques : Peinture / Moquette / Carrelage / Parquet / Crépis / Bardage / ....
- Les éléments de second œuvre : Isolation / Etanchéité / ....
- Les menuiseries : Porte / Fenêtre / Coupole / ....

### Éléments évaluables :

- Les éléments structurels :  
 Fondation / Radier / Voile / Mur / Plancher / Poutre / Poteau / Dalle / Escalier / Maçonnerie / Charpente / ....

## 2.4 Phases du cycle de vie :

Voici un récapitulatif des étapes du cycle de vie prise en compte dans l'évaluation carbone :



### Étape [A5] : Construction

Excavation des terres : non évaluée

Ressource	Quantité	CO <sub>2</sub> e
Excavation works, kg or m3 of remov ?	1 m <sup>3</sup>	1,4kg - ~0%

### Étape [C1] : Déconstruction

Scénario de déconstruction : non évalué

Ressource	Quantité	CO <sub>2</sub> e
Deconstruction and demolition proce ?	1 m <sup>2</sup>	3,4kg - ~0%

### Étape [D] : Valorisation en fin de vie

Cette étape du cycle de vie n'est pas évaluée, car elle repose sur des hypothèses de valorisation en fin de vie qui ne reflètent pas souvent la réalité.

Étape	Description	Statut
A1	Extraction des matières premières	Evalué
A2	Transport des matières premières	Evalué
A3	Transformation des matières premières	Evalué
A4	Transport vers le site de construction	Evalué
A5	Construction et Installation	Partiel - Hors excavation

Étape	Description	Statut
B1	Utilisation	Non évalué
B2	Maintenance	Non évalué
B3	Réparation	Non évalué
B4	Remplacement	Non évalué
B5	Réhabilitation	Non évalué
B6	Consommation énergétique	Non évalué
B7	Consommation d'eau	Non évalué

Étape	Description	Statut
C1	Déconstruction	Non Evalué
C2	Transport	Evalué
C3	Traitement des déchets	Evalué
C4	Élimination	Evalué

Étape	Description	Statut
D	Valorisation fin de vie	Evalué

**Voici un exemple comparatif entre deux valorisations en fin de vie :**

- Bois → Incinération

Avec ce paramètre par défaut qui est l’incinération, cela revient à dire que 100 % du bois est utilisé dans une centrale de cogénération pour le chauffage urbain (Luxembourg). Autrement dit, la totalité du bois incinéré contribue à la production simultanée d’électricité et de chaleur.

Valorisation énergétique en fin de vie (module D) : mix énergétique substitué pour les matériaux (uniquement pour les scénarios de marché)

Mix énergétique remplacé par l’énergie récupérée de l’incinération en fin de vie des produits du module D. Il s’agit généralement du combustible ou du mix de chauffage le plus répandu localement.

Profil

District Heat, Luxembourg, 2023(kWh) (One Click LCA) | IEA2022

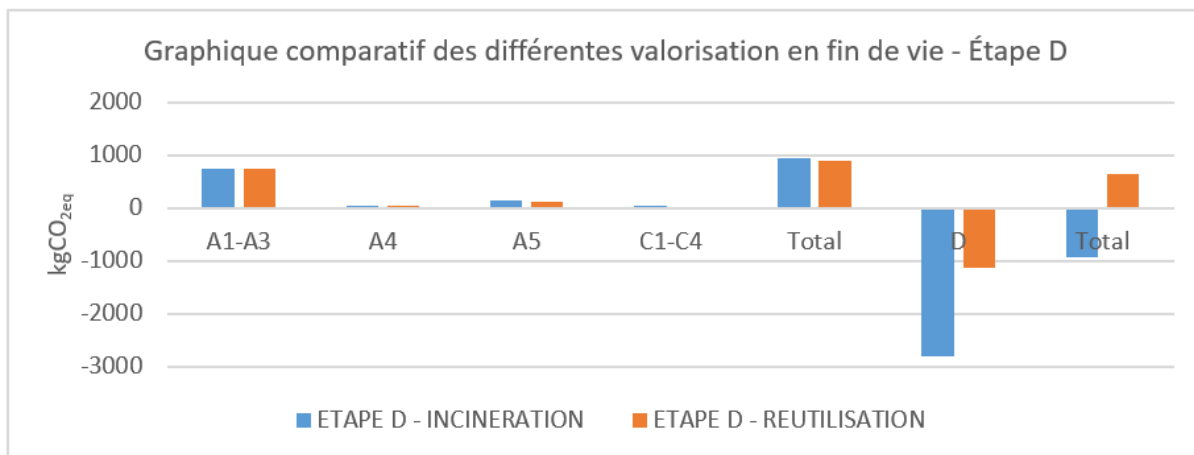
- Bois → Réutilisation

Dans ce cas, 100% du bois est réutilisé, éliminant le besoin d’extraire de nouvelles matières premières et réduisant le gaspillage des ressources naturelles.

Remarque :

Dans les deux scénarios de fin de vie, la quantité de matière prélevée à la terre est identique car les émissions carbonées sont identiques dans l’[Etape A1-A3] mais différente lors de la valorisation en fin de vie [Etape D] selon les différents scénarios.

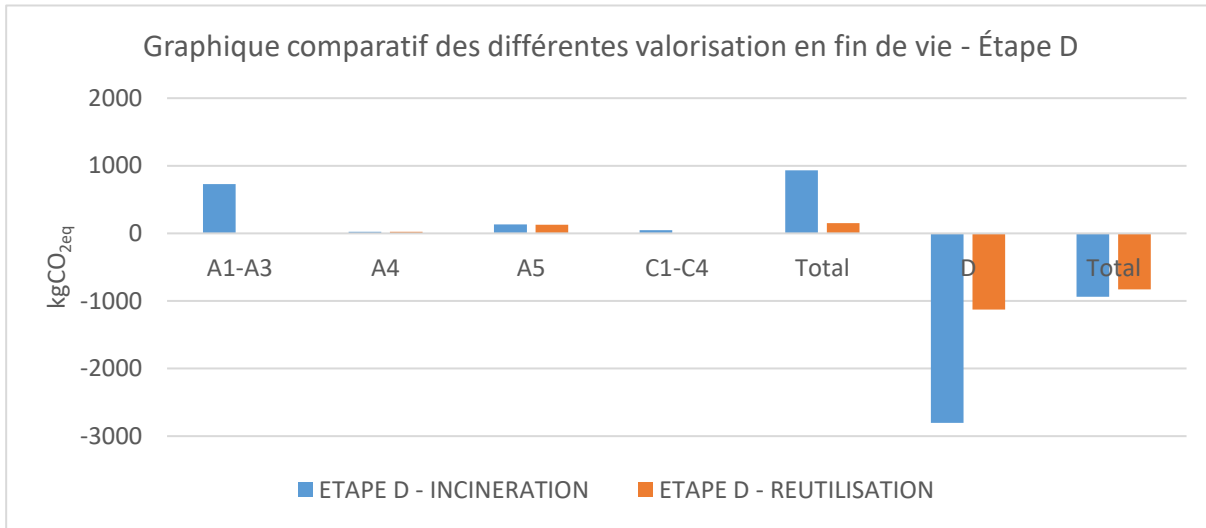
Graphique des étapes du cycle de vie avec [Etape D] comprise pour 5 m<sup>3</sup> de bois :



Unité : kgCO <sub>2eq</sub>	A1-A3	A4	A5	C1-C4	Total	D	Total
ETAPE D - INCINERATION	730	23	134	45	932	-2801	-937
ETAPE D - REUTILISATION	730	23	126	0	879	-1125	634

- Cross laminated timber (CLT), 481 kg/m<sup>3</sup>, 12% (± 3%) moisture content, One Click LCA
- Glue laminated timber (Glulam), 544 kg/m<sup>3</sup>, 12% (± 3%) moisture content, One Click LCA
- Contreplaqué, générique, 4-50 mm (0.16-1.97 in), 620 kg/m<sup>3</sup> (38.7 lbs/ft<sup>3</sup>), One Click LCA
- Oriented strand board (OSB), 613 kg/m<sup>3</sup>, 3% moisture content, One Click LCA
- Softwood beam, kiln dried, sawn, 440 kg/m<sup>3</sup>, 10% moisture content, coniferous wood, One Click LCA

Graphique des étapes du cycle de vie avec [Étape D] comprise et [Étape A1-A3] adaptée :



Unité : kgCO <sub>2</sub> eq	A1-A3	A4	A5	C1-C4	Total	D	Total
ÉTAPE D - INCINERATION	730	23	134	45	932	-2801	-937
ÉTAPE D - REUTILISATION	0	23	126	0	149	-1125	-827

Il est constaté que l’incinération du bois offre un potentiel de valorisation plus élevé en fin de vie, en raison de la production d’énergie, que la réutilisation des matériaux.

De plus, affirmer que 100 % du bois est soit incinéré, soit réutilisé n’est pas correct. D’autres filières existent, comme l’enfouissement, le compostage ou le recyclage. C’est pourquoi l’étape D n’est pas évaluée dans cette analyse.

## 2.5 Carbone biogénique :

Le carbone biogénique est exclu du calcul du potentiel de réchauffement global (PRG) pour les modules A1–A3 et est considéré comme stocké dans les matériaux pendant leur durée de vie. Bien qu’il soit capté par des matériaux d’origine biologique (ex. bois), il n’est pas comptabilisé comme émission nette tant qu’il reste dans le bâtiment.

Modules A1 (Extraction) :

- Lors de cette étape, le carbone biogénique contenu/stocké dans les matériaux est identifié et quantifié.

Modules C3 à C4 (Traitement des déchets / Élimination) :

- Lors de cette étape, 100% du carbone biogénique est libéré à la fin de vie du matériau.

Secteur	Potentiel de réchauffement climatique (incl. +A2) kg CO2e	Potentiel de réchauffement planétaire (biogénique) kg CO2e
A1-A3 Etape de fabrication	1,21E+06	-4,74E+05
A4 Transport	4,28E+04	
A5 Mise en oeuvre	1,17E+05	5,54E+02
B1 Phase exploitation	-1,94E+04	
B2 Maintenance		
B3 Réparation	4,78E+04	
B4-B5 Remplacement et réhabilitation	5,55E+05	
B6 Consommation d'énergie	1,11E+06	
B7 Besoin en eau	4,11E+03	
C1-C4 Fin de vie	1,68E+05	4,73E+05
D Impacts externes (non inclus dans le résultat)	-3,47E+05	
<b>Total</b>	<b>3,24E+06</b>	<b>0,00E+00</b>

Colonne complémentaire : carbone biogénique

Carbone incorporé dans le bois

« Packaging biogénique » (Ex : carton)

Libération du carbone en fin de vie

L’incertitude liée à la libération de ce carbone en fin de vie souligne l’importance de définir des scénarios réalistes et adaptés. En effet, les émissions de carbone peuvent varier considérablement selon que le matériau (ex. bois) soit incinéré, enfoui, composté, recyclé ou réutilisé.

- Valorisation fin de vie par défaut : Bois → Incinération

Pour garantir des résultats cohérents, une approche simplifiée mais réaliste Stockage [A1] = Émissions [C3 - C4] est privilégiée, tenant compte du fait que cette libération se produira dans une période lointaine et incertaine.

### 3 DONNÉES ENVIRONNEMENTALES

#### 3.1 Norme EN 15804

Afin de réaliser une analyse du cycle de vie (ACV) pertinente, il est essentiel de disposer d'une base de données environnementales suffisamment complète et représentative. La solution la plus adaptée pour obtenir une évaluation approfondie consiste à combiner les données issues des modules +A1 et +A2, ce qui permet de couvrir de manière pertinente l'ensemble des éléments constitutifs des habitations.

- Base de donnée en EN15804 +A1 / +A2

Pour ce faire, un indicateur commun est conservé entre les deux évolutions de la norme, ce qui permet d'assurer la comparabilité des données environnementales, même lorsqu'elles se réfèrent à des versions normatives différentes. Cet indicateur environnement est :

- Potentiel de réchauffement climatique (kgCO<sub>2</sub>eq)

Required impact categories according to EN 15804 A1					
Impact category	Global Warming Potential (GWP)	Ozone Depletion Potential (ODP)	Acidification Potential (AP)	Eutrophication Potential (EP)	Photochemical Ozone Creation Potential (POCP)
Unit	Kg CO2 Eq.	Kg CFC11 Eq.	Kg SO2 Eq.	Kg PO4 Eq.	Kg Etheene (C2H4) Eq.

Required impact categories according to EN 15804 A2									
Impact category	Global Warming Potential - Fossil	Global Warming Potential - Biogenic	Global Warming Potential - LULUC* - (ODP)**	Ozone Depletion potential	Eutrophication Potential - Terrestrial	Eutrophication Potential - Marine	Eutrophication Potential - Freshwater	Photochemical Ozone Creation Potential (POCP)	Acidification Potential
Unit	Kg CO2 Eq.	Kg CO2 Eq.	Kg CO2 Eq.	Kg CFC 11 Eq.	Mol N Eq.	Kg N Eq.	Kg Po4 Eq.	Kg NMVOC nt	Mol H+ Eq.

#### 3.2 Bibliothèque commune de données environnementales

Pour assurer la comparabilité et l'harmonisation des analyses entre les différentes variantes de construction, une bibliothèque de données environnementales commune a été développée.

Celle-ci regroupe l'ensemble des données de base utilisées pour les calculs. En centralisant ces informations, il devient possible d'évaluer chaque variante sur la base d'un référentiel de données commun, garantissant ainsi une meilleure fiabilité et cohérence des comparaisons. Cette approche contribue également à renforcer la transparence et la traçabilité du processus d'évaluation.

Les données environnementales utilisées proviennent de la plateforme « *One Click LCA* », un outil d'analyse du cycle de vie permettant l'accès à des bases de données vérifiées.

Les valeurs présentées sont issues de la plateforme One Click LCA et couvrent les étapes du cycle de vie de A1 à C4, l'étape D étant exclue conformément au périmètre d'analyse retenu.

**Données matériaux - Béton :**

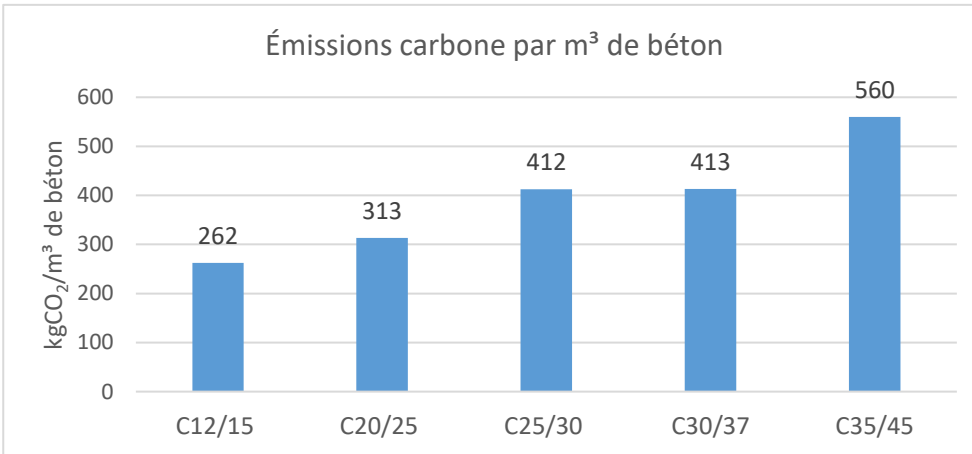
Ready-mix concrete, generic, C12/15 (1700/2200 PSI), X0, CEM II/A-S portland-slag cement 10% GGBS content, 2367 kg/m3, One Click LCA

Ready-mix concrete, normal-strength, generic, C20/25 (2900/3600 PSI), S1 XC0/XC1, 10% (typical) recycled binders in cement (min cem. content: 280 kg/m3 / 14.98 lbs/ft3), Portland-fly ash cement CEM II/A-V 42.5, One Click LCA (2024)

Ready-mix concrete, generic, C25/30 (3625/4350 PSI), XC1, CEM II/A-S portland-slag cement 10% GGBS content, 2378 kg/m3, One Click LCA

Ready-mix concrete, normal-strength, generic, C30/37 (4400/5400 PSI), S1 XC0/XC1, 10% (typical) recycled binders in cement (min cem. content: 280 kg/m3 / 18.72 lbs/ft3), Portland-fly ash cement CEM II/A-V 42.5, One Click LCA (2024)

Ready-mix concrete, generic, C35/45 (5000/6500 PSI), XD3, CEM II/A-S portland-slag cement 10% GGBS content, 2394 kg/m3 (One Click LCA)



**Données matériaux - Bois :**

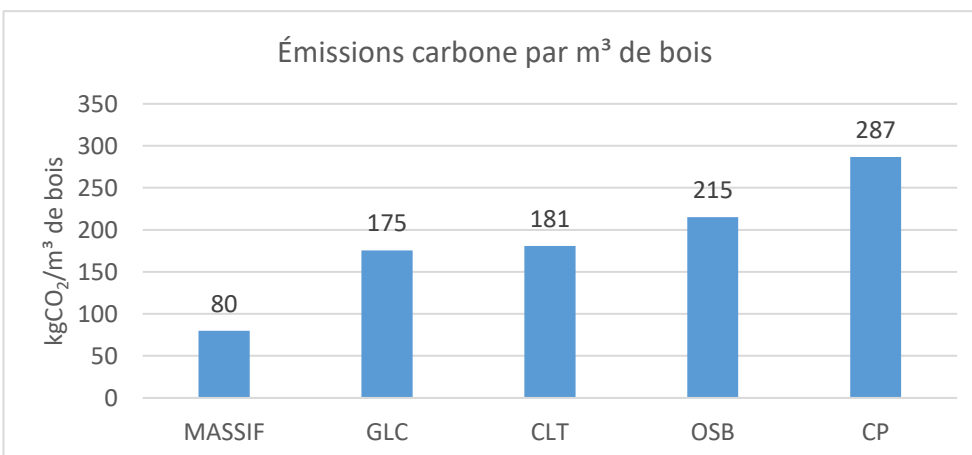
Cross laminated timber (CLT), 481 kg/m3, 12% (± 3%) moisture content, One Click LCA

Glue laminated timber (Glulam), 544 kg/m3, 12% (± 3%) moisture content, One Click LCA

Softwood beam, kiln dried, sawn, 440 kg/m3, 10% moisture content, coniferous wood, One Click LCA

Oriented strand board (OSB), 613 kg/m3, 3% moisture content, One Click LCA

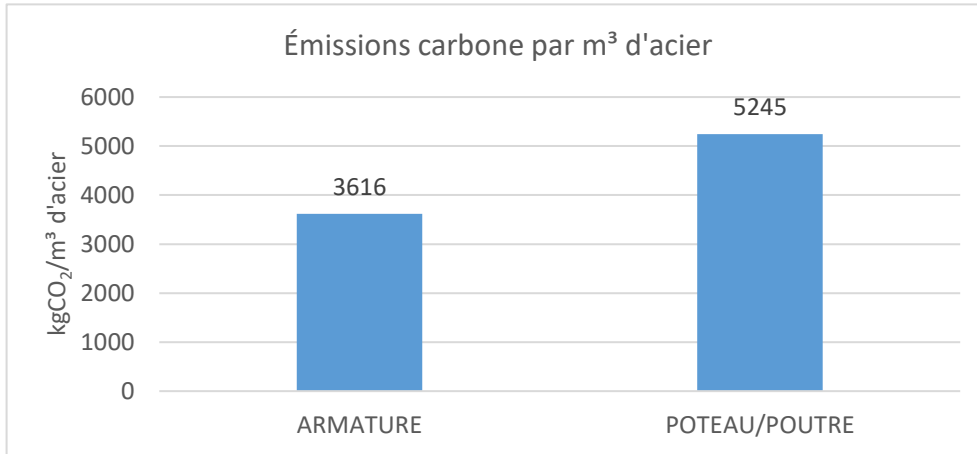
Contreplaqué, générique, 4-50 mm (0.16-1.97 in), 620 kg/m3 (38.7 lbs/ft3), One Click LCA



**Données matériaux - Acier :**

Acier d’armature (barres d’armature), générique, 97% recycled content (typical), A615, One Click LCA

Profilés en acier de construction, génériques, 90% recycled content (typical), I, H, U, L, and T sections, S235, S275 and S355, One Click LCA



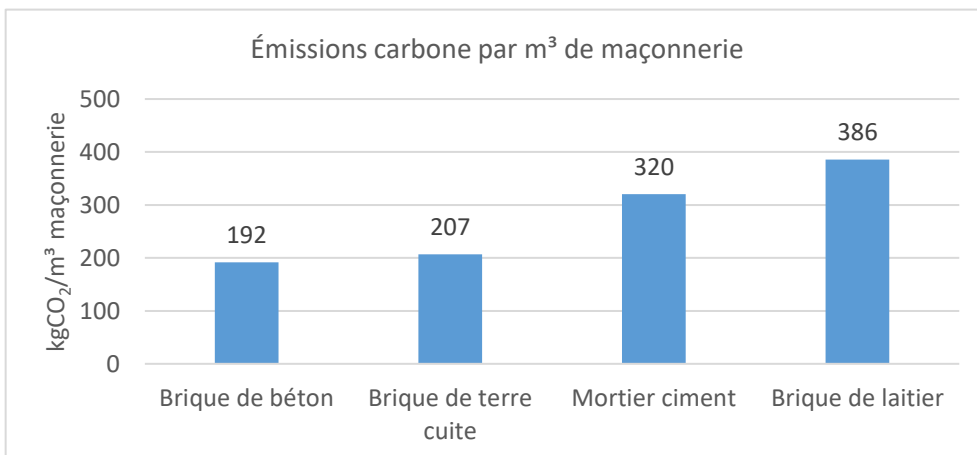
**Données matériaux – Maçonnerie :**

Concrete masonry unit (CMU) hollow core from normal weight concrete, 16x8x16 inch (400x200x400mm), 125lbs/ft3 (2000 kg/m3) (concrete density), 48.7 lbs (22.1 kg)/unit, One Click LCA

Terracotta brick with hollow chambers, for facade application, 30 mm thickness, 237.5-500 mm height, up to 1500 mm lengths, 42 kg/m2, 2200 kg/m3 (One Click LCA)

Cement mortar, One Click LCA

Brick-faced precast cladding panel, C16/20, 481.4 kg/m2, 50% GGBS in cement, One Click LCA



Selon les données génériques pour le Luxembourg disponibles dans One Click LCA, le choix entre une maçonnerie en briques de béton ou en terre cuite n’a pas d’influence significative sur le bilan carbone. Il convient également de préciser que les deux types de maçonnerie sélectionnés sont des éléments perforés et ne sont donc pas des blocs pleins.

### 3.3 Donnée générique / Donnée spécifique fabricant

Cette section illustre la différence d’impact environnemental entre une donnée fournie par le fabricant et une donnée générique, en soulignant l’influence du choix des sources de données sur les résultats de l’évaluation.

#### Origine France :

	Bois - Origine : France	
BLC	Bois lamellé-collé, 442 kg/m <sup>3</sup> . Les produits en bois lamellé-collé fabriqués couvrent du bois lamellé-collé (Glulam) et poutres lamellés-collés par Schilliger Holz AG et couvrent les références commerci.	Donnée fabricant
CLT	Panneau CLT Schilliger, fabriqué en France, 448 kg/m <sup>3</sup> , biogenic CO2 not subtracted (for CML), PMC (Panneau Multiples de Construction) (Schilliger Bois SAS)	
MASSIF	Bois massif abouté Schilliger, fabriqué en France, 443.5 kg/m <sup>3</sup> , biogenic CO2 not subtracted (for CML), Bois massif abouté Schilliger Bois (Schilliger Bois SAS)	
CP	Panneau de contreplaqué en pin maritime et résine phénolique (PF), fabriqué en France, pour plancher ou toiture, 18mm, 11.1kg/m <sup>2</sup> , 616.7kg/m <sup>3</sup> , biogenic CO2 not subtracted (for CML) (UIPC - Union...)	
MFP	Panneaux de lamelles de bois minces orientées OSB (oriented strand board) de type 3 (panneaux travaillants utilisés en milieu humide) bruts, 18mm, 11.1kg/m <sup>2</sup> , 616kg/m <sup>3</sup> , biogenic CO2 not subtracte...	

#### Origine Luxembourg :

	Bois - Origine : Luxembourg	
CP	Contreplaqué, générique, 4-50 mm (0.16-1.97 in), 620 kg/m <sup>3</sup> (38.7 lb/ft <sup>3</sup> ) (One Click LCA)	Donnée générique
CLT	Cross laminated timber (CLT), 481 kg/m <sup>3</sup> , 12% (+3%) moisture content (One Click LCA)	
BLC	Glue laminated timber (Glulam), 544 kg/m <sup>3</sup> , 12% (+3%) moisture content (One Click LCA)	
MFP	Oriented strand board (OSB), 613 kg/m <sup>3</sup> , 3% moisture content (One Click LCA)	
MASSIF	Softwood beam, kiln dried, sawn, 440 kg/m <sup>3</sup> , 10% moisture content, coniferous wood (One Click LCA)	

Le choix d’une usine peut réduire l’empreinte carbone : la donnée spécifique du fabricant français est ± 40% inférieure à la donnée générique du Luxembourg.

	tCO2/m <sup>3</sup>		
	Luxembourg	France	Différence
CLT	0,18	0,11	39%
BLC	0,18	0,11	39%
Massif	0,08	0,05	41%
CP	0,28	0,18	36%
MFP	0,21	0,11	48%
Total	0,93	0,56	40%

**Le type de donnée « Générique – Luxembourg » est sélectionné** dans le cadre de cette étude afin d’assurer une comparaison neutre entre les variantes mais également entre les matériaux (béton / bois / acier) et ainsi d’éviter qu’un fabricant spécifique n’influence les résultats.

### 3.4 Distance de transport

Le paramètre « Distance de transport » est défini selon une valeur par défaut. Le logiciel One Click LCA fournit une estimation cohérente et représentative des distances de transport parcourues. Par ailleurs, une analyse plus détaillée de ces distances n’aurait qu’un impact limité sur le résultat global.

#### Transport – Matériaux bois :

- Distance par défaut One Click LCA : 220 km
- Distance calculée : Vosges (France) → Luxembourg : 228 km

📍 Vosges, France

📍 Luxembourg

➕ Ajouter une destination

🚚 via A31  
Le plus rapide, trafic habituel 228 km

Ressource	Quantité	CO <sub>2</sub> e	Commentaire	Parties du bâtiment	Transport, étape 1, kilomètres
Glue laminated timber (Glulam), 544	m <sup>3</sup>			Non défini	220
Softwood beam, kiln dried, sawn, 44	m <sup>3</sup>			Non défini	220
Cross laminated timber (CLT), 481 k	m <sup>3</sup>			Non défini	220

Hypothèse : Le transport retour à vide des camions contenant les construction modulaire n’est pas pris en compte.

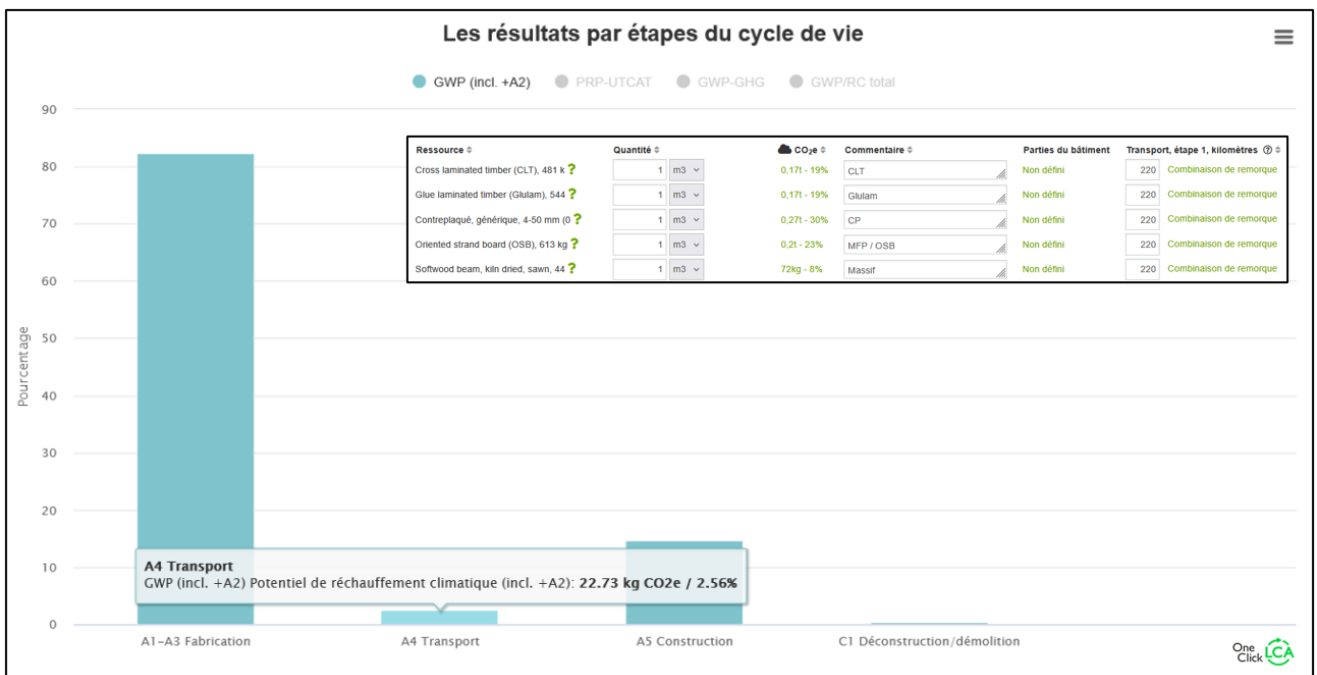
Lorsque l'impact de l'étape de transport des produits [A4] est analysé au regard des autres étapes du cycle de vie, notamment la fabrication des produits [A1–A3] et la phase de construction [A5], il apparaît que le transport contribue de manière marginale aux émissions de carbone.

En effet, l'étape [A4] ne représente que 2,56% des émissions de gaz à effet de serre, contre 82,32% pour la phase de fabrication [A1–A3], qui constitue l'étape prépondérante du cycle de vie.

La répartition des émissions est la suivante :

- [A1–A3] Fabrication : 82,32 %
- [A4] Transport : 2,56 %
- [A5] Construction : 14,73 %
- [C1] Déconstruction : 0,38 %

Ces résultats permettent d'affirmer, à l'échelle de la Grande Région, qu'un calcul très précis des distances de transport n'influencera que faiblement le bilan carbone global. Par conséquent, une approche simplifiée pour l'estimation des distances de transport est jugée suffisante, sans compromettre la pertinence ni la robustesse des résultats environnementaux.



---

## 4 MÉTHODOLOGIE DE CALCUL

### 4.1 Répartition sous-sol / hors-sol

Afin de comparer les bâtiments sur une base équivalente, il est nécessaire d'exclure les sous-sols, tels que les parkings, qui représentent une part significative des émissions de gaz à effet de serre. Cette contribution élevée s'explique par l'emploi intensif du béton dans les fondations, les murs de soutènement et les dalles.

Lorsque la répartition entre sous-sol et superstructure est clairement indiquée dans le bordereau des quantités, l'exclusion peut être effectuée directement. En revanche, si les données du bordereau regroupent l'ensemble du bâtiment, un calcul de répartition spécifique doit être réalisé afin d'isoler la part de matériaux attribuable au sous-sol. Cette étape garantit une comparaison cohérente et homogène entre les variantes constructives étudiées.

### 4.2 Substitution volumique : Variante réelle / opposées

En règle générale, une construction avec une structure en bois nécessite un volume de matériau moindre qu'une structure équivalente en béton. En effet, le béton, plus dense et lourd, requiert des sections plus épaisses pour atteindre la même capacité portante. À l'inverse, dans une construction en bois, les murs et les planchers peuvent être plus minces tout en conservant une bonne rigidité et résistance.

Ainsi, le bois permet de réduire considérablement le volume de matériau nécessaire par rapport au béton, tout en garantissant une performance structurelle équivalente.

Remarque : Les fondations restent en béton, le bois n'étant pas adapté au milieu en contact avec le sol.

#### Conversation : Bois → Béton

Parois horizontale (dalle/plancher) :

- Volume de bois est remplacé par du béton : C25/30 + armatures / m<sup>3</sup> de béton

Parois verticales (mur) :

- Volume de bois est remplacé par du béton : Maçonnerie

#### Conversation : Béton → Bois

Parois horizontale (dalle/plancher) :

- Volume de béton est remplacé par du bois : CLT - armatures / m<sup>3</sup> de béton

Parois verticales (mur) :

- Volume de maçonnerie est remplacé par du bois : Ossature massif + OSB

### 4.3 Équivalent volumique : Bois → Béton

#### 4.3.1 Répartition entre parois horizontales et verticales :

Voici les hypothèses de répartition entre les parois horizontale et verticale :

- 58% de parois horizontales
- 42% de parois verticales

Plancher + toiture	Surface (m²)	Nbre	Total (m²)
N0	272	2	544
N1	272	2	544
N2	272	2	544
Toiture	272	2	544
			2176

Mur extérieure	Longeur (m)	Largeur (m)	Hauteur	Nbre	Nbre	Surface (m²)
N0	19,5	14	3,02	2	2	405
N1	19,5	14	2,94	2	2	394
N2	19,5	14	2,94	2	2	394
						1193

Voile BA	Longeur (m)	Hauteur	Nbre	Surface (m²)
N0	31,33	3,02	2	189
N1	18,91	2,94	2	111
N2	18,91	2,94	2	111
				412

Parois	Surface (m²)	Répartition
Plancher + toiture	2176	58%
Mur + voile	1604	42%

#### 4.3.2 Équivalent structurelle selon le types de parois et le types de matériaux :

La seconde étape consiste à évaluer l'épaisseur de bois ou béton équivalente selon le type de parois ce qui permet d'intégrer la composante structurelle. La surface de la parois est considéré comme constante.

	Métré Bois		Métré Béton	
	Ep [m]	Vol [m3]	Ep [m]	Vol [m3]
Dalle	0,22	52	0,24	57
Murs porteur	0,14	0,14	0,20	0,20

Voici les hypothèses de rapport de conversation volumique selon le type de parois et de matériaux :

**Au niveau des murs :**

- 1 m³ de bois = 1.43 m³ de béton
- 1 m³ de béton = 0.70 m³ de bois

Mur : Epaisseur équivalente		Béton → Bois	Bois → Béton
Béton (cm)	20	70%	143%
Bois (cm)	14		

NB : La conversion du mur bois en mur « béton » peut se réaliser soit en maçonnerie de briques, soit en voile en béton armé. La solution maçonnerie est retenue.

**Au niveau des planchers + toiture :**

- 1 m³ de bois = 1.09 m³ de béton
- 1 m³ de béton = 0.92 m³ de bois

Dalle : Epaisseur équivalente		Béton → Bois	Bois → Béton
Béton (cm)	24	92%	109%
Bois (cm)	22		

#### 4.3.3 Rapport de conversion volumique équivalent : bois / béton + acier

La troisième étape consiste à combiner la répartition des parois avec les coefficients de conversion volumique des matériaux afin de déterminer un rapport de conversion final, qui sera ensuite appliqué au volume total du matériau dominant.

- Volume de bois équivalent = Volume béton x 82%

Volume de béton (m³)	100	Béton → Bois		82%
Béton → Bois	Répartition (%)	Répartition (m³)	Rapport volumique (%)	Volume adapté (m³)
Plancher	58%	58	92%	53
Mur	42%	42	70%	30
				82

- Volume de béton équivalent = Volume bois x 123%

Volume de bois (m³)	100	Bois → Béton		123%
Bois → Béton	Répartition (%)	Répartition (m³)	Rapport volumique (%)	Volume adapté (m³)
Plancher	58%	58	109%	63
Mur	42%	42	143%	61
				123

#### Remarque relative à l’acier présent dans le béton armé :

La masse d’acier, et plus précisément des armatures, varie en fonction de la masse de béton. En effet, le pourcentage d’armature nécessaire est proportionnel au volume de béton utilisé pour garantir la résistance et la stabilité de la structure.

- Béton → Bois : La quantité d’armature = 0 kg
- Bois → Béton : La quantité d’armature augmente

Afin de déterminer la quantité d’armature en fonction des volumes totaux issus des bordereaux :

- 120 kg d’acier d’armatures par m³ de béton

Ainsi, toute analyse de substitution volumique bois ↔ béton doit intégrer cette variation de l’acier pour obtenir un bilan carbone réaliste car l’acier contribue de manière significative aux émissions associées aux structures en béton armé.

NB : Si des poteaux ou poutres en acier sont présents dans le bâtiment, aucune conversion volumique n’est appliquée. La masse d’acier reste identique dans la variante réelle et dans la variante alternative.

Pour plus de détails voir : 240344\_\_DD\_\_SIM\_01\_simulation\_bois→béton

## 4.4 Équivalent volumique : Béton → Bois

### 4.4.1 Répartition entre parois horizontales et verticales ainsi que par types de bois

Voici les hypothèses de répartition entre les parois horizontale et verticale :

- Plancher - CLT 16cm : 1454 m<sup>2</sup>
- Mur - CLT 14cm : 495 m<sup>2</sup>
- Mur – MASSIF (Section montant [40 ; 175] avec espacement de 60 cm) : 1145 m<sup>2</sup>

	Niveau 0	Niveau 0 int	Niveau 1	Niveau 1 int	Niveau 2	Niveau 2 int
Maison 1	/	/	3	2,75	1,2	2,75
Maison 2	3	2,75	3	2,75	1,2	2,75
Maison 3	3	2,78	3	2,78	1,2	2,78

Maison 1	Longueur (m)	Largeur (m)	Surface (m <sup>2</sup> )
Niveau 0	0	0	0
Niveau 1	20,14	10,14	204
Niveau 2	20,14	10,14	204
Grenier	20,14	7,2	145

Maison 2	Longueur (m)	Largeur (m)	Surface (m <sup>2</sup> )
Niveau 0	18,56	10,19	189
Niveau 1	18,56	10,19	189
Niveau 2	15,97	10,14	162
Grenier	15,97	5,09	

Maison 3	Longueur (m)	Largeur (m)	Surface (m <sup>2</sup> )
Niveau 0	17,53	10,18	178
Niveau 1	17,53	10,08	177
Niveau 2	14,92	10,08	150
Grenier	14,92	5,49	Déjà en bois

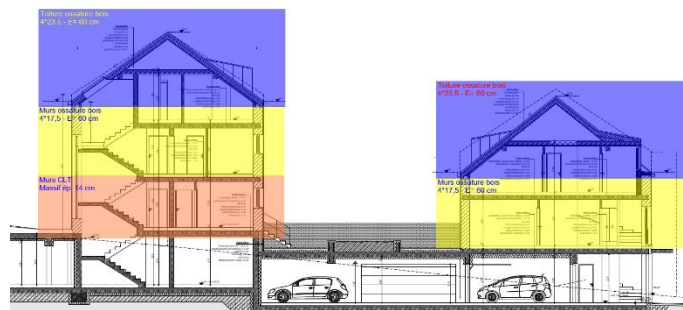
Surface totale plancher (m <sup>2</sup> )		1454
---	--	------

Maison 1	Longueur (m)	Hauteur (m)	Surface (m <sup>2</sup> )
Niveau 0 <sub>ext</sub>	0,00	0	0
Niveau 0 <sub>int</sub>	0,00	0	0
Niveau 1 <sub>ext</sub>	60,56	3	182
Niveau 1 <sub>int</sub>	27,36	2,75	75
Niveau 2 <sub>ext</sub>	60,56	1,2	73
Niveau 2 <sub>int</sub>	27,36	2,78	76

Maison 2	Longueur (m)	Largeur (m)	Surface (m <sup>2</sup> )
Niveau 0 <sub>ext</sub>	57,50	3	173
Niveau 0 <sub>int</sub>	31,04	2,75	85
Niveau 1 <sub>ext</sub>	57,50	3	173
Niveau 1 <sub>int</sub>	30,01	2,75	83
Niveau 2 <sub>ext</sub>	52,22	1,2	63
Niveau 2 <sub>int</sub>	19,33	2,78	54

Maison 3	Longueur (m)	Largeur (m)	Surface (m <sup>2</sup> )
Niveau 0 <sub>ext</sub>	55,42	3	166
Niveau 0 <sub>int</sub>	25,71	2,75	71
Niveau 1 <sub>ext</sub>	55,22	3	166
Niveau 1 <sub>int</sub>	28,51	2,75	78
Niveau 2 <sub>ext</sub>	50,00	1,2	60
Niveau 2 <sub>int</sub>	22,95	2,78	64

Surface totale mur (m <sup>2</sup> )		1640
--------------------------------------	--	------



Mur CLT : épaisseur = 16 cm

Mur ossature bois : Section rectangulaire (40 ; 175)

Espacement 60 cm

Charpente bois déjà présente dans la version de base

### 4.4.2 Équivalent structurelle selon le types de parois et le types de matériaux :

Voici les facteurs de conversion volumique du bois par m<sup>2</sup> de parois :

- Mur bois massif : 0.0175 m<sup>3</sup> de bois / m<sup>2</sup> de maçonnerie
- + Complément OSB : 0.015 m<sup>3</sup> de bois / m<sup>2</sup> de maçonnerie
- Mur CLT : 0.14 m<sup>3</sup> de bois / m<sup>2</sup> de maçonnerie
- Plancher CLT : 0.16 m<sup>3</sup> de bois / m<sup>2</sup> de dalle

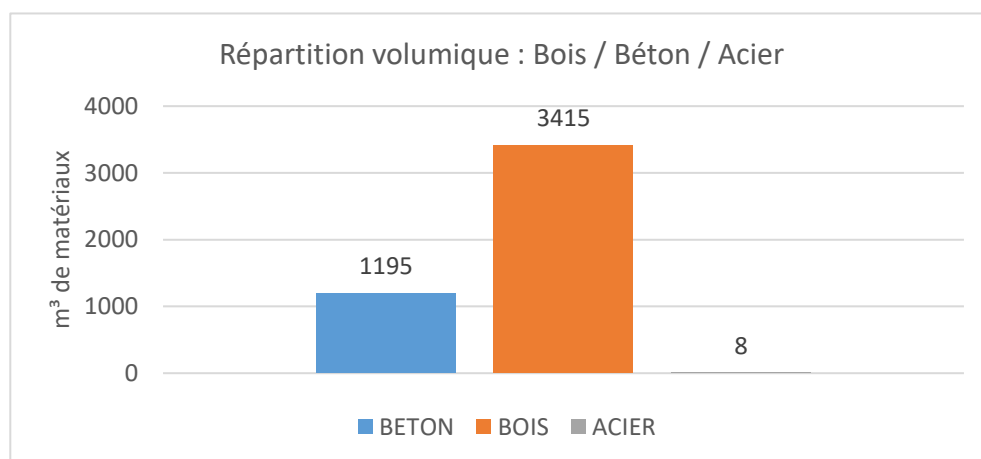
Pour plus de détails voir : 240344\_\_DD\_\_SIM\_02\_simulation\_béton→bois

## 5 VARIANTE 1 : CONSTRUCTION MODULAIRE BOIS - WILTZ

### 5.1 Description de la variante 1.0

Ce type de construction, dite modulaire en raison du processus de préfabrication en usine : les modules y sont entièrement réalisés, puis assemblés sur le site final, ce qui permet d'optimiser la qualité, de réduire les délais de chantier et de limiter les impacts environnementaux liés à la construction. Ce modèle d'habitation est constitué essentiellement de bois, utilisé pour les murs, les planchers et la toiture. Le béton n'est présent qu'au niveau des fondations, assurant la stabilité de l'ensemble.

- Location : Wiltz
- Typologie : Résidence en lot 1 / 2 / 3 / 4 / 6 / 10
- Matériaux dominant : Bois



- Présence de sous-sol : Non
- Surface brute intérieure : 4365 m<sup>2</sup>

Lot 1		Lot 3		Lot 4	
Niveau : +0	341	Niveau : +0	344	Niveau : +0	344
Niveau : +1	379	Niveau : +1	380	Niveau : +1	379
Niveau : +2	89	Niveau : +2	88	Niveau : +2	88
Surface brute intérieur (m <sup>2</sup> )	809	Surface brute intérieur (m <sup>2</sup> )	812	Surface brute intérieur (m <sup>2</sup> )	812

Lot 6		Lot 10	
Niveau : +0	345	Niveau : +0	360
Niveau : +1	380	Niveau : +1	336
Niveau : +2	89	Niveau : +2	212
		Niveau : +3	212
Surface brute intérieur (m <sup>2</sup> )	813	Surface brute intérieur (m <sup>2</sup> )	1120

#### Particularité du site :

Dans une construction traditionnelle non modulaire, une série d'escaliers assure la circulation verticale entre les différents étages et les logements individuels. En revanche, dans la construction modulaire, ces escaliers sont remplacés par des coursives métalliques assurant les mêmes fonctions d'accès et de liaison.

Dans le cadre de cette analyse carbone, les coursives métalliques sont considérées comme équivalentes aux escaliers en termes de fonction et sont donc intégrées au même titre dans les calculs d'émissions.

## 5.2 Résultat de la variante 1.0 : Modulaire bois

### 1) Détail des quantités cumulées de matériaux conformément aux bordereaux :

- Béton = 1195 m<sup>3</sup> / Bois = 3415 m<sup>3</sup> / Acier = 8 m<sup>3</sup>

BETON	Volume (m <sup>3</sup> )	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Masse (kg)	Répartition
C12/15 (m <sup>3</sup> )	197	2367	465833	16%
C20/25 (m <sup>3</sup> )	253	2373	600549	21%
C25/30 (m <sup>3</sup> )	95	2378	226971	8%
C30/37 (m <sup>3</sup> )	467	2386	1114930	39%
Maçonnerie en béton	182	2000	363880	15%
Total	1195	2321	2772163	100%

<input checked="" type="checkbox"/> Masse volumique moyenne pondérée :	2321	kg/m <sup>3</sup>
--	------	-------------------

BOIS	Volume (m <sup>3</sup> )	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Masse (kg)	Répartition
CLT	128	481	61568	4%
GLC	193	544	104992	6%
MASSIF	2384	440	1048960	70%
OSB	699	613	428487	20%
CP	11	620	6820	0%
	3415	483	1650827	100%

<input checked="" type="checkbox"/> Masse volumique moyenne pondérée :	483	kg/m <sup>3</sup>
--	-----	-------------------

ACIER	Volume (m <sup>3</sup> )	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Masse (kg)	Répartition
ARMATURE	3,7	7850	29021	45%
POUTRE/POTEAU	4,5	7850	35084	55%
	8,2	7850	64105	100%

**2) Détail des émissions carbone cumulées sur la durée de vie :**

- Étape [A1 à C4] : 837 tCO<sub>2eq</sub>

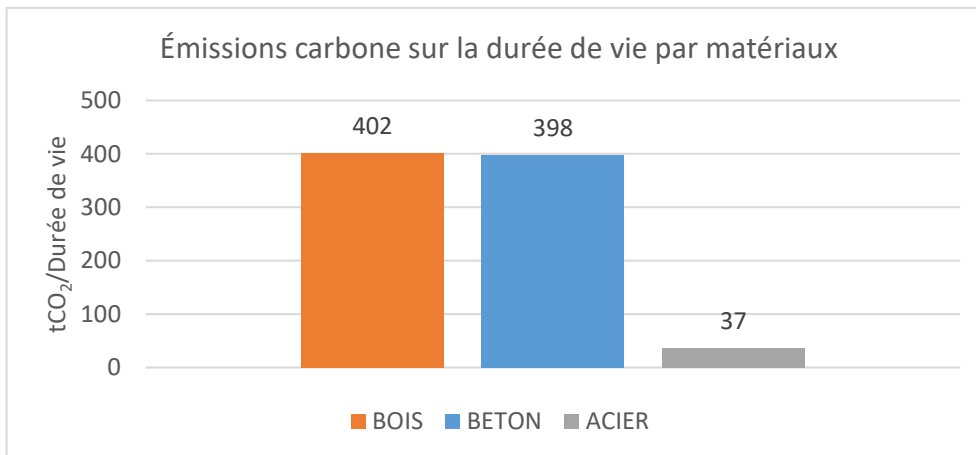
BETON	Volume (m <sup>3</sup> )	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Emissions (kgCO <sub>2</sub> )
C12/15 (m <sup>3</sup> )	197	262,4	51640
C20/25 (m <sup>3</sup> )	253	313,4	79325
C25/30 (m <sup>3</sup> )	95	412,2	39346
C30/37 (m <sup>3</sup> )	467	412,9	192949
Concrete masonry unit	182	191,8	34893
<b>Total</b>	<b>1195</b>		<b>398153</b>

BOIS	Volume (m <sup>3</sup> )	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Emissions (kgCO <sub>2</sub> )
CLT	128	181,1	23182
GLC	193	175,4	33859
MASSIF	2384	80,3	191522
OSB	699	215,1	150357
CP	11	286,6	3153
	<b>3415</b>		<b>402073</b>

ACIER	Volume (m <sup>3</sup> )	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Emissions (kgCO <sub>2</sub> )
ARMATURE	4	3615,7	13367
POUTRE/POTEAU	4	5245,4	23443
	<b>8</b>		<b>36810</b>

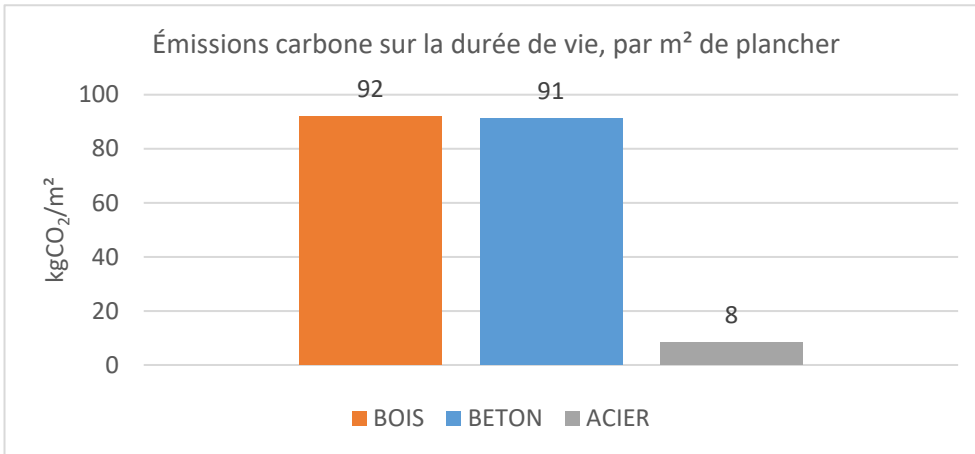
**3) Détail des émissions carbone par types de matériaux sur la durée de vie :**

- Durée de vie : 837 tCO<sub>2eq</sub>
  - Bois = 402 tCO<sub>2eq</sub>
  - Béton = 398 tCO<sub>2eq</sub>
  - Acier = 37 tCO<sub>2eq</sub>



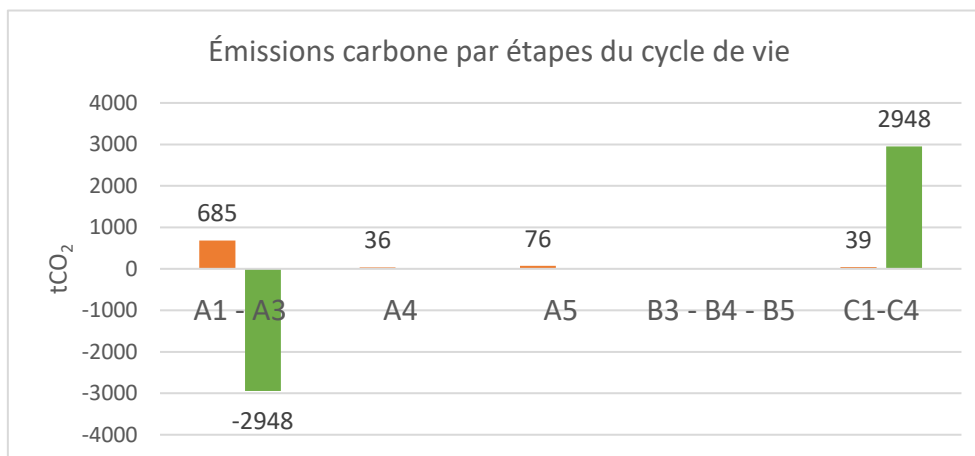
**4) Détail des émissions carbone par types de matériaux et par m<sup>2</sup> de plancher sur la durée de vie :**

- Étape [A1 à C4] : 192 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>
  - Bois = 92 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>
  - Béton = 91 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>
  - Acier = 8 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>



**5) Détail des émissions carbone par étapes du cycle de vie :**

Cycle de vie	Réchauffement climatique (tCO <sub>2eq</sub> )	Réchauffement planétaire - Biogénique (tCO <sub>2eq</sub> )	Total (tCO <sub>2eq</sub> )
A1 - A3	685	-2948	-2262
A4	36	0	36
A5	76	0	76
B3 - B4 - B5	0	0	0
C1-C4	39	2948	2987
<b>Total</b>	<b>837</b>	<b>0</b>	<b>837</b>



### 5.3 Résultat de la variante 1.1 : Modulaire béton

#### 1) Détail des quantités cumulées de matériaux selon adaptation des bordereaux :

- Béton = 5405 m<sup>3</sup> / Bois = 0 m<sup>3</sup> / Acier = 41 m<sup>3</sup>

Volume béton (m <sup>3</sup> )	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Masse béton (kg)
5405	2321	12542275

Volume acier (m <sup>3</sup> )	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Masse acier (kg)
41	7850	323181

Volume bois (m <sup>3</sup> )	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Masse bois (kg)
0	483	0

#### Volume de béton :

- Volume béton initiale = 1013 m<sup>3</sup>
- Volume de béton équivalent (Plancher) :  
= (Volume bois x % répartition plancher x rapport conversion volumique)  
= 3415 x 0.58 x 1.09 = 2159 m<sup>3</sup> de béton C25/30

#### Volume de maçonnerie béton :

- Volume maçonnerie initiale = 182 m<sup>3</sup>
- Volume de maçonnerie équivalent (Mur) :  
= (Volume bois x % répartition mur x rapport conversion volumique)  
= 3415 x 0.42 x 1.43 = 2051 m<sup>3</sup> de maçonnerie béton

#### Volume d’acier :

- Volume de poutre/poteau initiale = 4.5 m<sup>3</sup>
- Volume d’armatures initiale = 3.7 m<sup>3</sup>
- Volume d’armatures plancher : 120 kg/m<sup>3</sup> = 2159 x 120 = 258000 kg = 33 m<sup>3</sup>

**2) Détail des émissions carbone cumulées sur la durée de vie :**

- Étape [A1 à C4] : 1838 tCO<sub>2eq</sub>

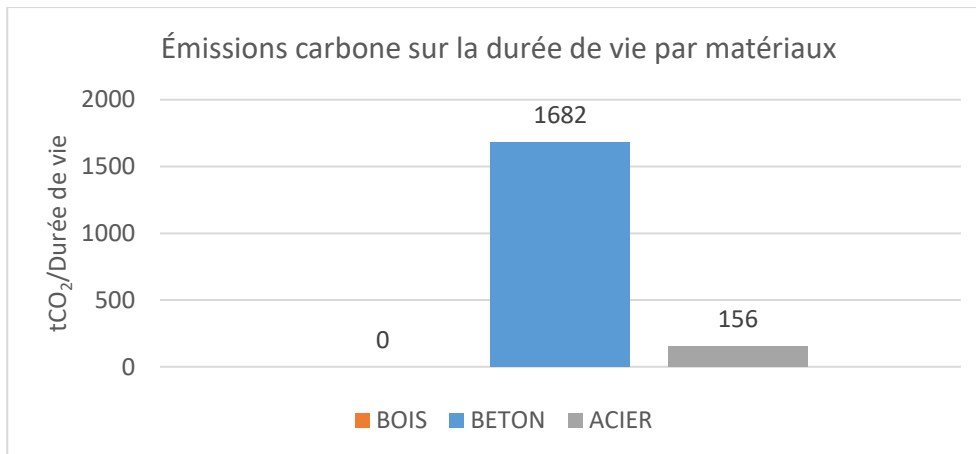
Quantité béton conservée	Volume (m <sup>3</sup> )	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Emissions (tCO <sub>2</sub> )
C12/15 (m <sup>3</sup> )	197	262	52
C20/25 (m <sup>3</sup> )	253	313	79
C25/30 (m <sup>3</sup> )	95	412	39
C30/37 (m <sup>3</sup> )	467	413	193
Brique de béton	182	192	35
Armature	4	3616	13
Profilé	4,5	5245	23

Quantité bois adaptée	Volume (m <sup>3</sup> )	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Emissions (tCO <sub>2</sub> )
Brique de béton	2051	192	393
C20/25	2159	412	890
Armature	33	3616	119

Total	1838
-------	------

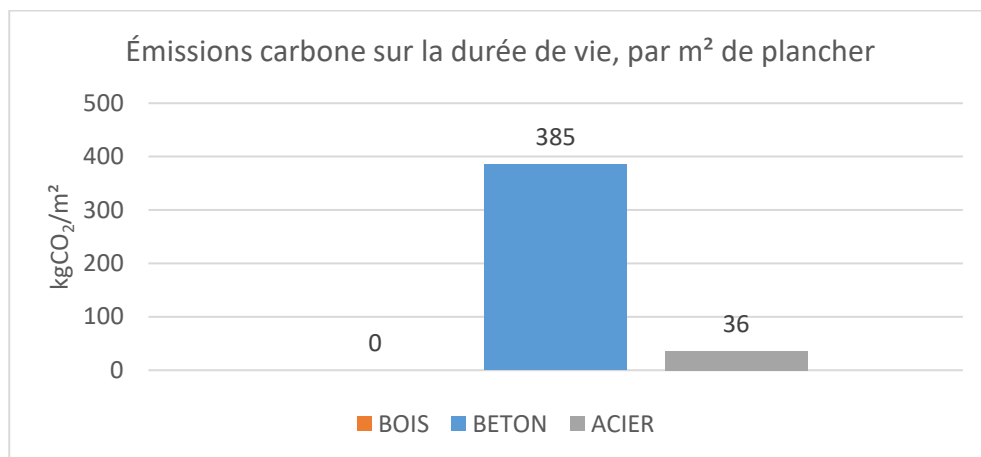
**3) Détail des émissions carbone par types de matériaux sur la durée de vie :**

- Durée de vie : 1838 tCO<sub>2eq</sub>
  - Bois = 0 tCO<sub>2eq</sub>
  - Béton = 1682 tCO<sub>2eq</sub>
  - Acier = 156 tCO<sub>2eq</sub>



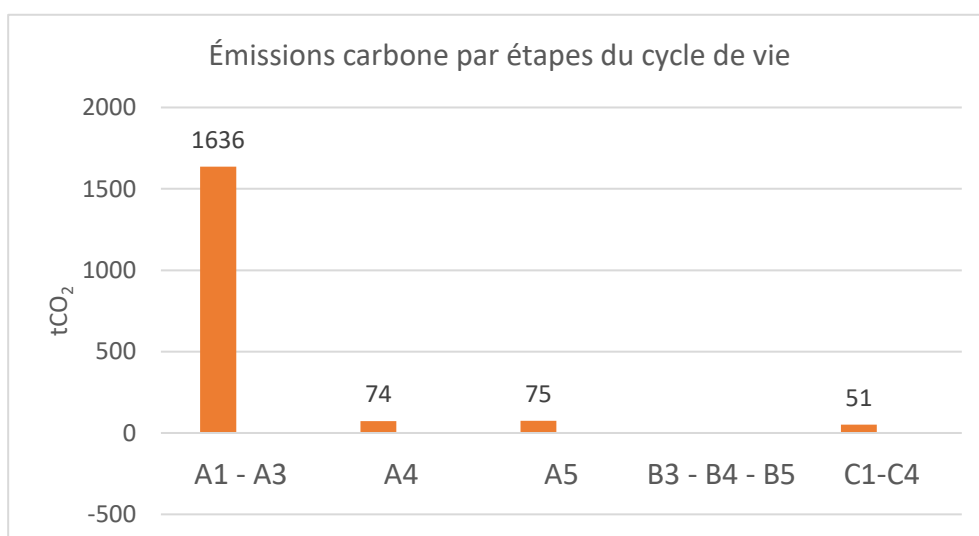
#### 4) Détail des émissions carbone par types de matériaux et par m<sup>2</sup> de plancher sur la durée de vie :

- Étape [A1 à C4] : 421 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>
  - Bois = 0 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>
  - Béton = 385 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>
  - Acier = 36 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>



#### 5) Détail des émissions carbone par étapes du cycle de vie :

Cycle de vie	Réchauffement climatique (tCO <sub>2eq</sub> )	Réchauffement planétaire - Biogénique (tCO <sub>2eq</sub> )	Total (tCO <sub>2eq</sub> )
A1 - A3	1636	0	1636
A4	74	0	74
A5	75	0	75
B3 - B4 - B5	0	0	0
C1-C4	51	0	51
<b>Total</b>	<b>1837</b>	<b>0</b>	<b>1837</b>

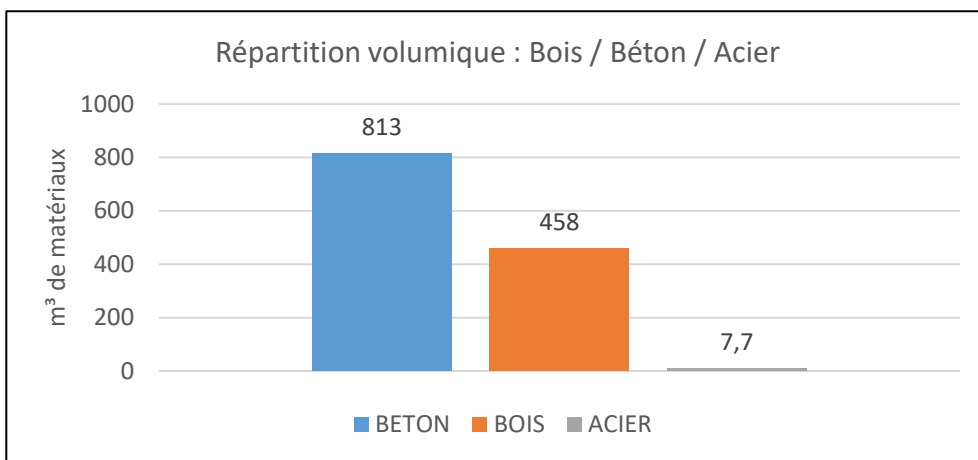


## 6 VARIANTE 2 : CONSTRUCTION BOIS / BETON - EHLANGE

### 6.1 Description de la variante 2.0

Cette construction est composée de planchers d’étages, d’une toiture et de murs en bois. Toutefois, une part importante de béton est également présente, notamment dans les chapes et pré-chapes, les voiles de la cage d’escalier, ainsi que dans la dalle du rez-de-chaussée. Le bâtiment est considéré comme mixte bois/béton.

- Location : Ehlinge
- Typologie : 2 résidence à 6 logements
- Matériaux dominant : Béton / Bois



- Présence de sous-sol : Oui, non identifié séparément dans le bordereau

Section bordereau	Prise en compte
2.3.1 : Semelles fondations	62%
2.3.2 : Radier	0%
2.3.3 : Dallage	0%
2.4 : Voiles	40%
2.5 : Colonnes BA	0%
2.6 : Poutres BA	0%
2.7 : Dalle BA	100%
2.9 : Escalier	60%

- Surface brute intérieure : 1337 m<sup>2</sup> (Hors sous-sol)

2 Résidences	
Niveau : +0	472
Niveau : +1	431
Niveau : +2	433
Surface brute intérieur (m <sup>2</sup> )	1337

#### Particularité du site :

Le bâtiment est principalement construit en panneaux de CLT aussi bien pour les murs porteurs que pour les planchers constituant ainsi une structure majoritairement bois. À ces éléments s’ajoutent des voiles en béton armé au niveau de la cage d’escalier, des chapes et des dalles en béton armé ainsi que des éléments de maçonnerie en briques de terre cuite, complétant l’ensemble structurel.

## 6.2 Résultat de la variante 2.0 : Bois / Béton

### 1) Détail des quantités cumulées de matériaux selon adaptation des bordereaux :

- Béton = 823 m<sup>3</sup> / Bois = 458 m<sup>3</sup> / Acier = 7.7 m<sup>3</sup>

BETON	Volume (m <sup>3</sup> )	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Masse (kg)	Répartition
C12/15	150	2367	354489	18%
C20/25	117	2373	277641	14%
C25/30	4	2378	9702	0%
C30/37	553	2386	1318603	67%
Total	823	2381	1960435	100%

<input checked="" type="checkbox"/> Masse volumique moyenne pondérée :	<b>2381</b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>
--	-------------	-------------------------

BOIS	Volume (m <sup>3</sup> )	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Masse (kg)	Répartition
CLT	454	481	218518	99%
GLC	0	544	0	0%
MASSIF	4	440	1540	1%
OSB	0	613	0	0%
CP	0	620	0	0%
	458	481	220058	100%

<input checked="" type="checkbox"/> Masse volumique moyenne pondérée :	<b>481</b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>
--	------------	-------------------------

ACIER	Volume (m <sup>3</sup> )	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Masse (kg)	Répartition
ARMATURE	7	7850	53090	88%
POUTRE/POTEAU	1	7850	7447	12%
	7,7	7850	60537	100%

## 2) Détail des émissions carbone cumulées sur la durée de vie :

- Étape [A1 à C4] : 413 tCO<sub>2eq</sub>

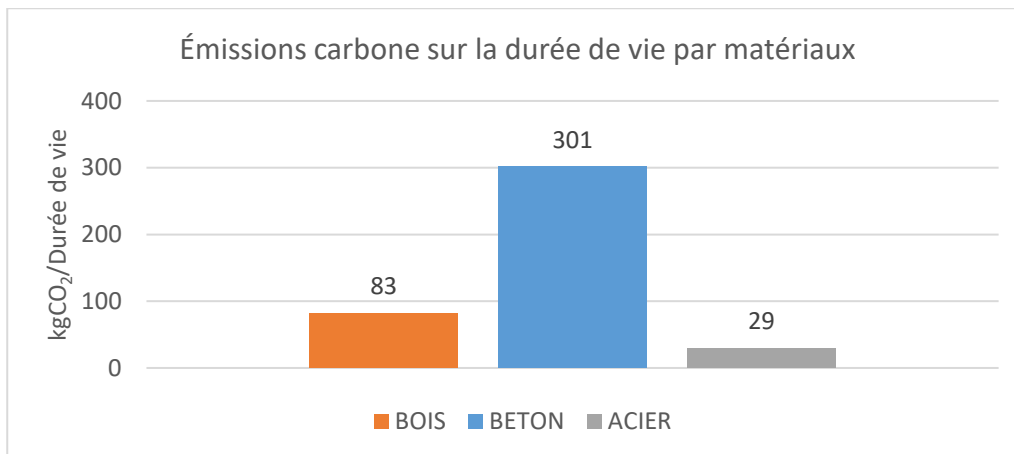
BETON	Volume (m <sup>3</sup> )	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Emissions (kgCO <sub>2</sub> )
C12/15 (m <sup>3</sup> )	150	262	39297
C20/25 (m <sup>3</sup> )	117	313	36673
C25/30 (m <sup>3</sup> )	4	412	1682
C30/37 (m <sup>3</sup> )	553	413	228241
Total	823		305893

BOIS	Volume (m <sup>3</sup> )	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Emissions (kgCO <sub>2</sub> )
CLT	454	181	82278
MASSIF	4	80	281
	458		82559

ACIER	Volume (m <sup>3</sup> )	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Emissions (kgCO <sub>2</sub> )
ARMATURE	7	3616	24453
POUTRE/POTEAU	1	5245	4976
	8		29429

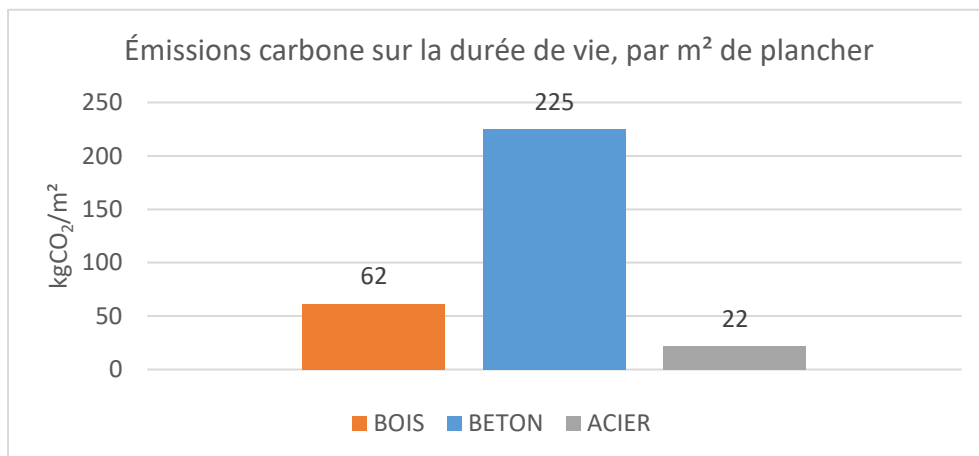
## 3) Détail des émissions carbone par types de matériaux sur la durée de vie :

- Durée de vie : 837 tCO<sub>2eq</sub>
  - Bois = 83 tCO<sub>2eq</sub>
  - Béton = 301 tCO<sub>2eq</sub>
  - Acier = 29 tCO<sub>2eq</sub>



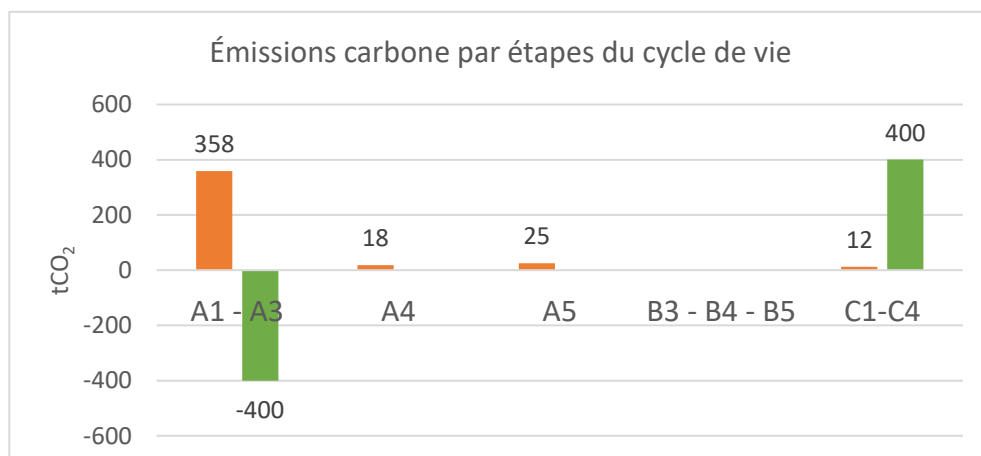
**4) Détail des émissions carbone par types de matériaux et par m<sup>2</sup> de plancher sur la durée de vie :**

- Étape [A1 à C4] : 309 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>
  - Bois = 62 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>
  - Béton = 225 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>
  - Acier = 22 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>



**5) Détail des émissions carbone par étapes du cycle de vie :**

Cycle de vie	Réchauffement climatique (tCO <sub>2eq</sub> )	Réchauffement planétaire - Biogénique (tCO <sub>2eq</sub> )	Total (tCO <sub>2eq</sub> )
A1 - A3	358	-400	-42
A4	18	0	18
A5	25	0	25
B3 - B4 - B5	0	0	0
C1-C4	12	400	413
<b>Total</b>	<b>413</b>	<b>0</b>	<b>413</b>



### 6.3 Résultat de la variante 2.1 : Classique béton

#### 1) Détail des quantités cumulées de matériaux conformément aux bordereaux :

- Béton = 1463 m<sup>3</sup> / Bois = 0 m<sup>3</sup> / Acier = 13 m<sup>3</sup>

Volume béton (m <sup>3</sup> )	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Masse totale de béton (kg)
1388	2381	3304021

Volume acier (m <sup>3</sup> )	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Masse totale d'acier (kg)
12	7850	95077

Volume bois (m <sup>3</sup> )	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Masse totale de bois (kg)
0	481	0

#### Volume de béton :

- Volume béton initiale = 823 m<sup>3</sup>
- Volume de béton équivalent (Plancher) :  
 = (Volume bois x % répartition plancher x rapport conversion volumique)  
 = 458 x 0.58 x 1.09 = 290 m<sup>3</sup> de béton C25/30

#### Volume de maçonnerie béton :

- Volume maçonnerie initiale = 182 m<sup>3</sup>
- Volume de maçonnerie équivalent (Mur) :  
 = (Volume bois x % répartition mur x rapport conversion volumique)  
 = 458 x 0.42 x 1.43 = 275 m<sup>3</sup> de maçonnerie béton

#### Volume d'acier :

- Volume de poutre/poteau initiale = 6.8 m<sup>3</sup>
- Volume d'armatures initiale = 0.9 m<sup>3</sup>
- Volume d'armatures plancher : 120 kg/m<sup>3</sup> = 290 x 120 = 34800 kg = 4.4 m<sup>3</sup>

**2) Détail des émissions carbone cumulées sur la durée de vie :**

- Étape [A1 à C4] : 519 tCO<sub>2eq</sub>

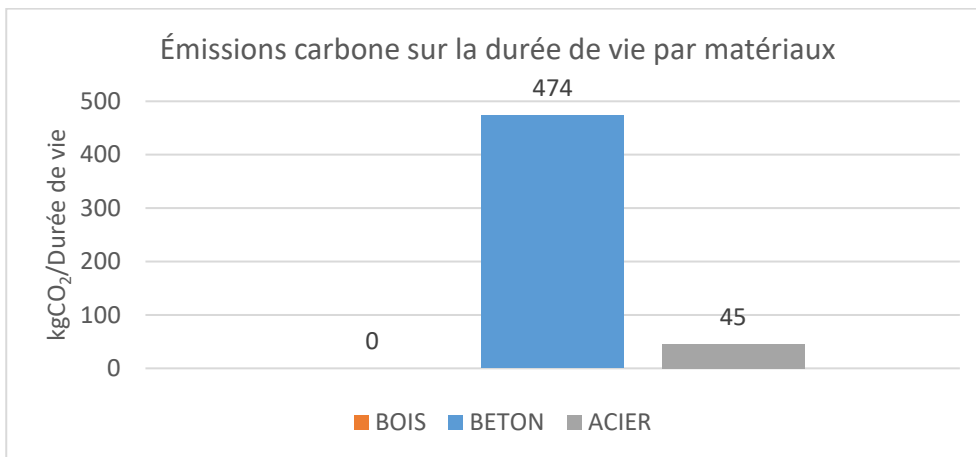
Quantité béton conservée	Volume (m <sup>3</sup> )	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Emissions (tCO <sub>2</sub> )
C12/15	150	262	39
C20/25	117	313	37
C25/30	4	412	2
C30/37	553	405	224
Armature	7	3616	24
Profilé	1	5245	5

Quantité bois adaptée	Volume (m <sup>3</sup> )	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Emissions (tCO <sub>2</sub> )
Brique de béton	275	192	53
C25/30	289	412	119
Armature	4	3616	16

Total	519
-------	-----

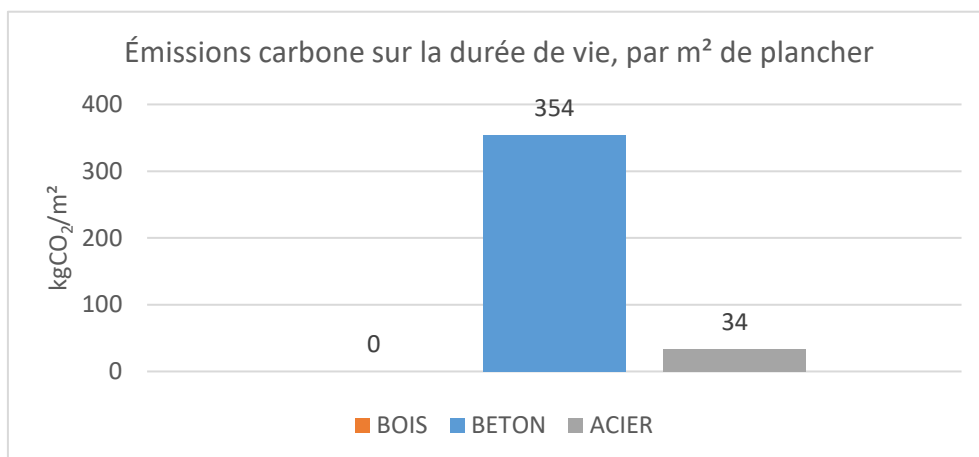
**3) Détail des émissions carbone par types de matériaux sur la durée de vie :**

- Durée de vie : 519 tCO<sub>2eq</sub>
  - Bois = 0 tCO<sub>2eq</sub>
  - Béton = 474 tCO<sub>2eq</sub>
  - Acier = 45 tCO<sub>2eq</sub>



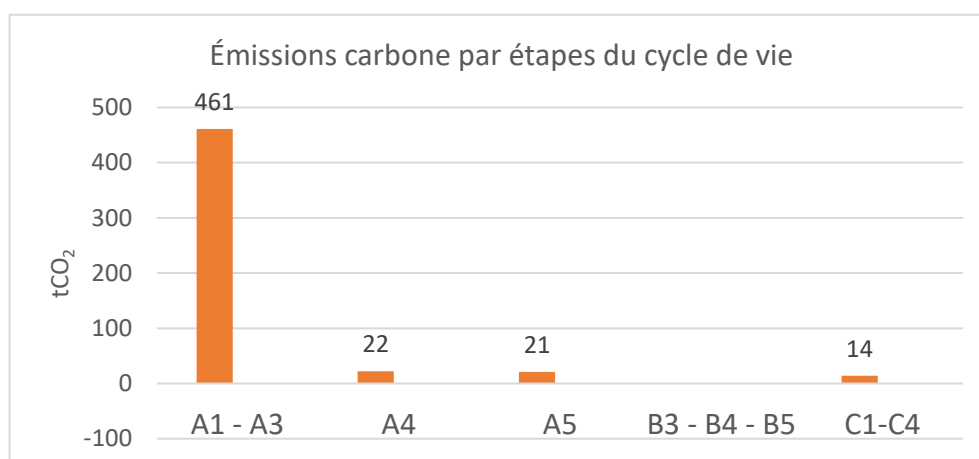
**4) Détail des émissions carbone par types de matériaux et par m<sup>2</sup> de plancher sur la durée de vie :**

- Étape [A1 à C4] : 388 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>
  - Bois = 0 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>
  - Béton = 354 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>
  - Acier = 34 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>



**5) Détail des émissions carbone par étapes du cycle de vie :**

Cycle de vie	Réchauffement climatique (tCO <sub>2eq</sub> )	Réchauffement planétaire - Biogénique (tCO <sub>2eq</sub> )	Total (tCO <sub>2eq</sub> )
A1 - A3	461	0	461
A4	22	0	22
A5	21	0	21
B3 - B4 - B5	0	0	0
C1-C4	14	0	14
<b>Total</b>	<b>518</b>	<b>0</b>	<b>518</b>

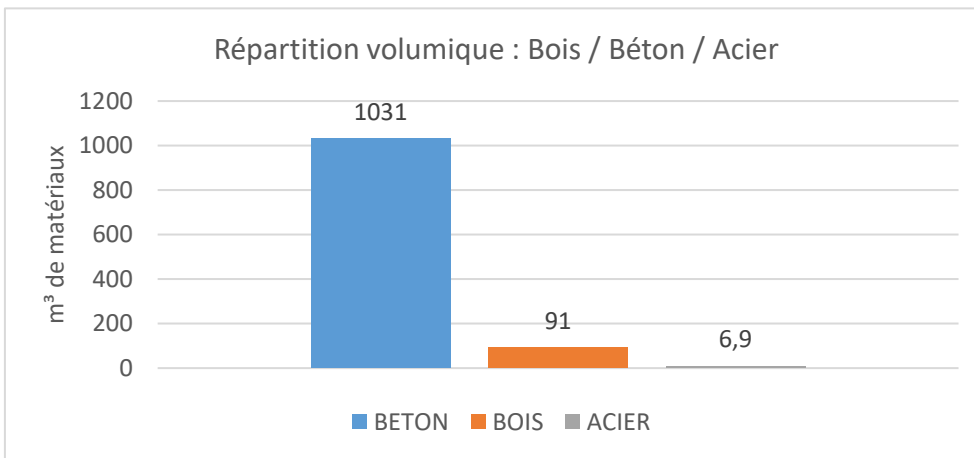


## 7 VARIANTE 3 : CONSTRUCTION CLASSIQUE BETON - BOUS

### 7.1 Description de la variante 3.0

Ce type de construction, dite classique en béton, correspond à une habitation résidentielle courante. Elle se caractérise par des dalles en béton, des murs en maçonnerie et une toiture reposant sur une charpente en bois.

- Location : Bous
- Typologie : Bâtiment à appartement
- Matériaux dominant : Béton



- Présence de sous-sol : Oui, clairement identifié dans le bordereau
- Surface brute intérieure : 1205 m<sup>2</sup>

3 Résidences	
Niveau : +0	483
Niveau : +1	460
Niveau : +2	262

Surface brute intérieur (m <sup>2</sup> )	1205
---	------

#### Particularité du site :

La maçonnerie des murs est réalisée en briques de terre cuite intégrant un isolant, formant ainsi un matériau composite. Lors de l'évaluation carbone, seule la brique de terre cuite, c'est-à-dire sans l'isolant, est prise en compte. Les dalles sont en béton armé et la toiture est composée d'une charpente bois.

## 7.2 Résultat de la variante 3.0 : Classique béton

### 1) Détail des quantités cumulées de matériaux conformément aux bordereaux :

- Béton = 887 m<sup>3</sup> / Maçonnerie = 514 m<sup>3</sup> / Bois = 91 m<sup>3</sup> / Acier = 6.9 m<sup>3</sup>

BETON	Volume (m <sup>3</sup> )	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Masse (kg)	Répartition
Brique de laitier	2	1800	3520	0%
C12/15	45	2367	106515	3%
C20/25	72	2373	170856	5%
C25/30	445	2378	1057021	32%
C30/37	325	2386	775450	23%
Mortier-ciment	47	2386	111247	3%
Brique terre cuite	466	2200	1024210	33%
Total	1401	2320	3248819	100%

<input checked="" type="checkbox"/> Masse volumique moyenne pondérée :	2320	kg/m <sup>3</sup>
--	------	-------------------

BOIS	Volume (m <sup>3</sup> )	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Masse (kg)	Répartition
CLT	0	481	0	0%
GLC	17	544	9085	18%
MASSIF	68	440	29704	75%
OSB	6	613	3862	7%
CP	0	620	0	0%
	91	471	42651	100%

<input checked="" type="checkbox"/> Masse volumique moyenne pondérée :	471	kg/m <sup>3</sup>
--	-----	-------------------

ACIER	Volume (m <sup>3</sup> )	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Masse (kg)	Répartition
ARMATURE	6,9	7850	53910	100%
POUTRE/POTEAU	0,0	7850	0	0%
	6,9	7850	53910	100%

**2) Détail des émissions carbone cumulées sur la durée de vie :**

- Étape [A1 à C4] : 498 tCO<sub>2eq</sub>

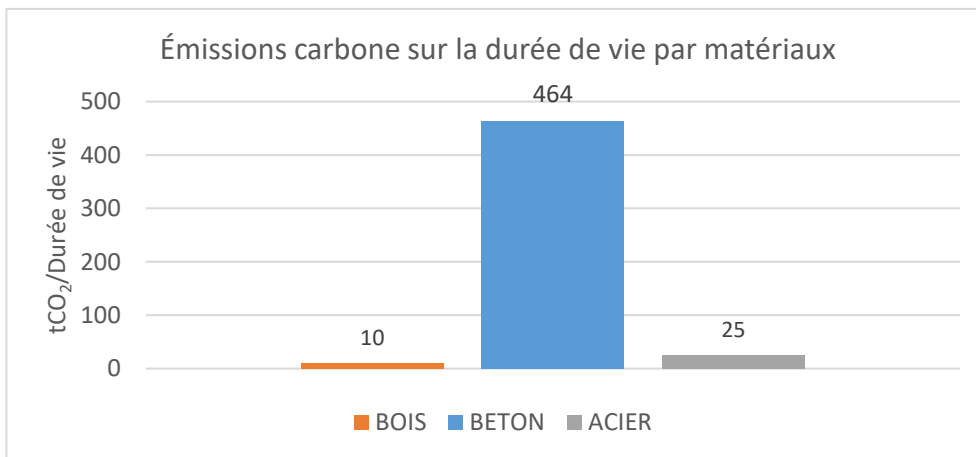
BETON	Volume (m³)	kgCO <sub>2</sub> /m³	Emissions (kgCO <sub>2</sub> )
C12/25	45	262	11807
C20/25	72	313	22568
C25/30	445	412	183238
C30/37	325	413	134199
Brique de laitier	2	386	755
Mortier	47	320	14939
Brique terre cuite	466	207	96297
<b>Total</b>	<b>1401</b>		<b>463803</b>

BOIS	Volume (m³)	kgCO <sub>2</sub> /m³	Emissions (kgCO <sub>2</sub> )
CLT	0	0	0
GLC	17	175	2930
MASSIF	68	80	5424
OSB	6	215	1355
CP	0	0	0
	<b>91</b>		<b>9708</b>

ACIER	Volume (m³)	kgCO <sub>2</sub> /m³	Emissions (kgCO <sub>2</sub> )
ARMATURE	7	3616	24831
POUTRE/POTEAU	0	5245	0
	<b>7</b>		<b>24831</b>

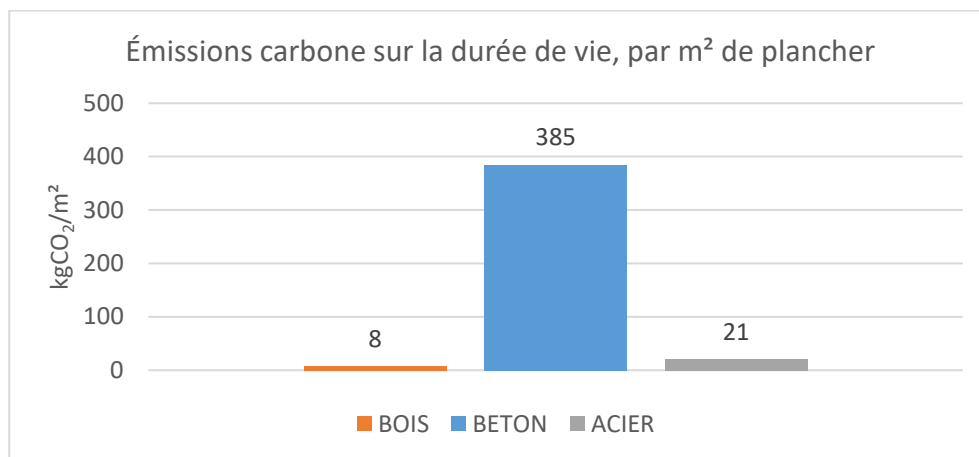
**3) Détail des émissions carbone par types de matériaux sur la durée de vie :**

- Durée de vie : 498 tCO<sub>2eq</sub>
  - Bois = 10 tCO<sub>2eq</sub>
  - Béton = 464 tCO<sub>2eq</sub>
  - Acier = 25 tCO<sub>2eq</sub>



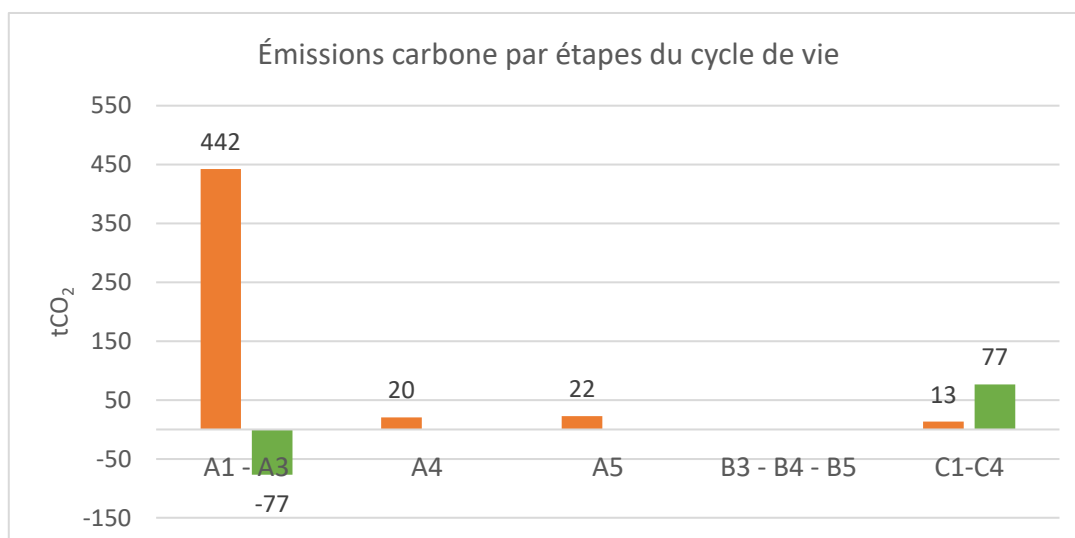
**4) Détail des émissions carbone par types de matériaux et par m<sup>2</sup> de plancher sur la durée de vie :**

- Étape [A1 à C4] : 415 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>
  - Bois = 8 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>
  - Béton = 385 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>
  - Acier = 21 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>



**5) Détail des émissions carbone par étapes du cycle de vie :**

Cycle de vie	Réchauffement climatique (tCO <sub>2eq</sub> )	Réchauffement planétaire - Biogénique (tCO <sub>2eq</sub> )	Total (tCO <sub>2eq</sub> )
A1 - A3	442	-77	366
A4	20	0	20
A5	22	0	22
B3 - B4 - B5	0	0	0
C1-C4	13	77	90
<b>Total</b>	<b>498</b>	<b>0</b>	<b>498</b>



### 7.3 Résultat de la variante 3.1 : Classique bois

#### 1) Détail des quantités cumulées de matériaux selon adaptation des bordereaux :

- Béton = 370 m<sup>3</sup> / Bois = 428 m<sup>3</sup> / Acier = 5 m<sup>3</sup>

Volume béton (m <sup>3</sup> )	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Masse totale de béton (kg)
370	2320	858230

Volume acier (m <sup>3</sup> )	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Masse totale d'acier (kg)
6	7850	44745

Volume bois (m <sup>3</sup> )	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Masse totale de bois (kg)
430	471	202398

#### Volume de béton : Béton de fondation reste inchangé, le bois ne peut servir dans les fondations

- C12/15 : 45 m<sup>3</sup>
- C30/37 : 325 m<sup>3</sup>
- Armatures dans 370 m<sup>3</sup> béton : 120 kg/m<sup>3</sup> de béton = 5,7 m<sup>3</sup>

#### Volume de bois équivalent :

- Mur bois massif : 0.0175 m<sup>3</sup> de bois / m<sup>2</sup> de mur
- + Complément OSB : 0.015 m<sup>3</sup> de bois / m<sup>2</sup> de mur
- Mur CLT : 0.14 m<sup>3</sup> de bois / m<sup>2</sup> de mur
- Plancher CLT : 0.16 m<sup>3</sup> de bois / m<sup>2</sup> de plancher

	Surface (m <sup>2</sup> )	Quantité (m <sup>3</sup> bois/m <sup>2</sup> parois)	Volume équivalent bois (m <sup>3</sup> )
PLANCHER CLT	1454	0,1600	233
MUR	1640	Voir détails	Voir détails

MUR - Détails	Surface (m <sup>2</sup> )	Quantité (m <sup>3</sup> bois/m <sup>2</sup> parois)	Volume équivalent bois (m <sup>3</sup> )	Répartition %
MUR CLT	495	0,1400	69	30%
MUR OSSATURE - MASSIF	1145	0,0175	20	70%

MUR OSSATURE - OSB	Epaisseur (m)	Quantité (m <sup>3</sup> bois/m <sup>2</sup> parois)	Volume (m <sup>3</sup> )
OSB	0,015	0,0150	17

**2) Détail des émissions carbone cumulées sur la durée de vie :**

- Étape [A1 à C4] : 237 tCO<sub>2eq</sub>

Quantité bois conservée	Volume (m <sup>3</sup> )	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Emissions (tCO <sub>2</sub> )
GLC	17	175	3
MASSIF	68	80	5
OSB	6	215	1

Quantité béton conservée	Volume (m <sup>3</sup> )	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Emissions (tCO <sub>2</sub> )
C12/15	45	262	12
C30/37	325	413	134

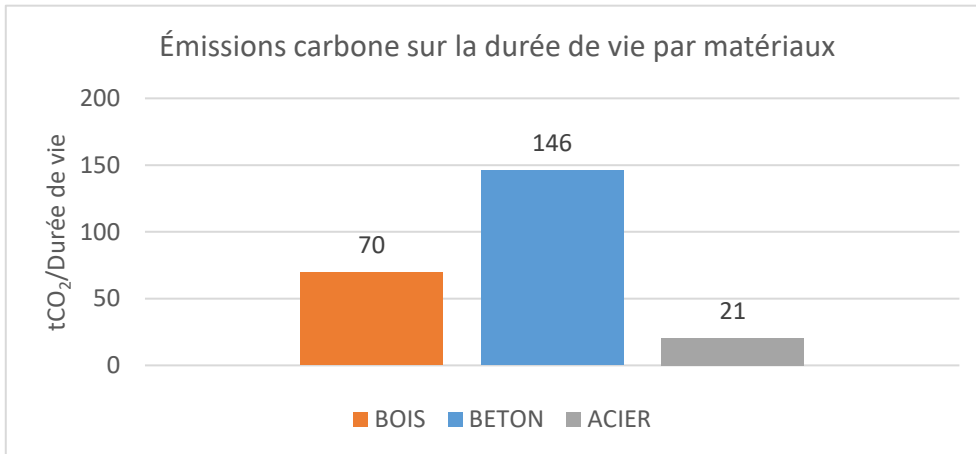
Quantité acier conservé	Volume (m <sup>3</sup> )	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Emissions (tCO <sub>2</sub> )
Armature	6	3616	21

Quantité béton adaptée	Volume (m <sup>3</sup> )	kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Emissions (tCO <sub>2</sub> )
CLT	302	181	55
MASSIF	20	80	2
OSB	17	215	4

Total	236		
-------	-----	--	--

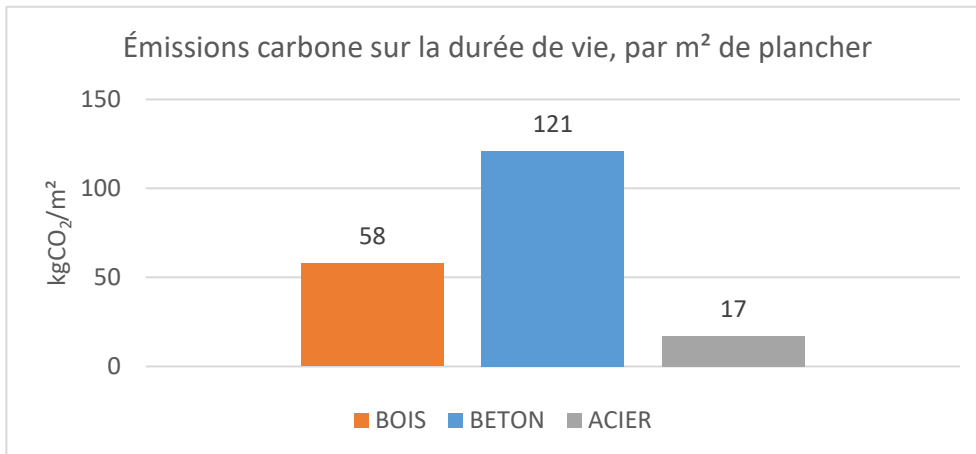
**3) Détail des émissions carbone par types de matériaux sur la durée de vie :**

- Durée de vie : 237 tCO<sub>2eq</sub>
  - Bois = 70 tCO<sub>2eq</sub>
  - Béton = 146 tCO<sub>2eq</sub>
  - Acier = 21 tCO<sub>2eq</sub>



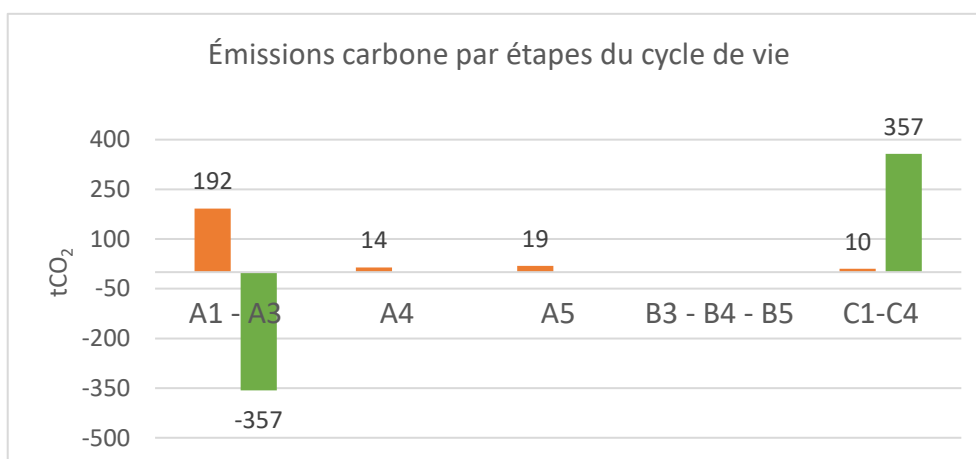
**4) Détail des émissions carbone par types de matériaux et par m<sup>2</sup> de plancher sur la durée de vie :**

- Étape [A1 à C4] : 196 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>
  - Bois = 58 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>
  - Béton = 121 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>
  - Acier = 17 kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>



**5) Détail des émissions carbone par étapes du cycle de vie :**

Cycle de vie	Réchauffement climatique (tCO <sub>2eq</sub> )	Réchauffement planétaire - Biogénique (tCO <sub>2eq</sub> )	Total (tCO <sub>2eq</sub> )
A1 - A3	192	-357	-165
A4	14	0	14
A5	19	0	19
B3 - B4 - B5	0	0	0
C1-C4	10	357	367
<b>Total</b>	<b>236</b>	<b>0</b>	<b>236</b>

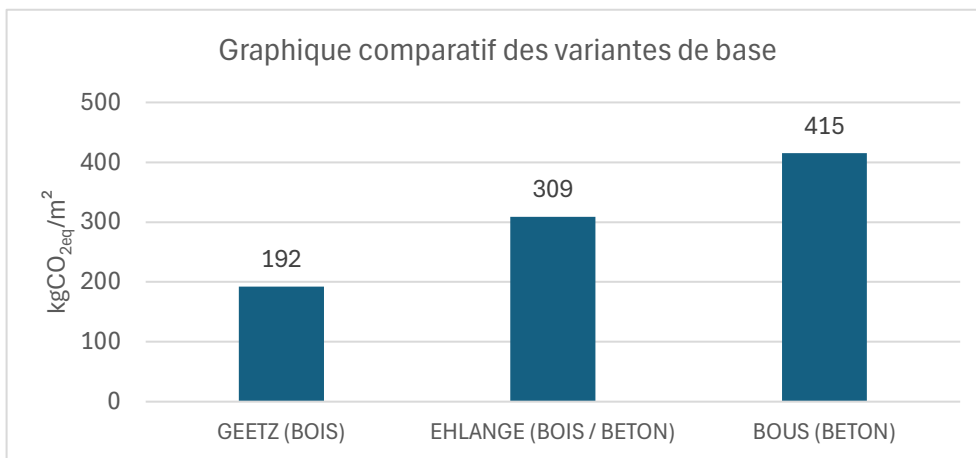


## 8 ANALYSE DES RÉSULTATS

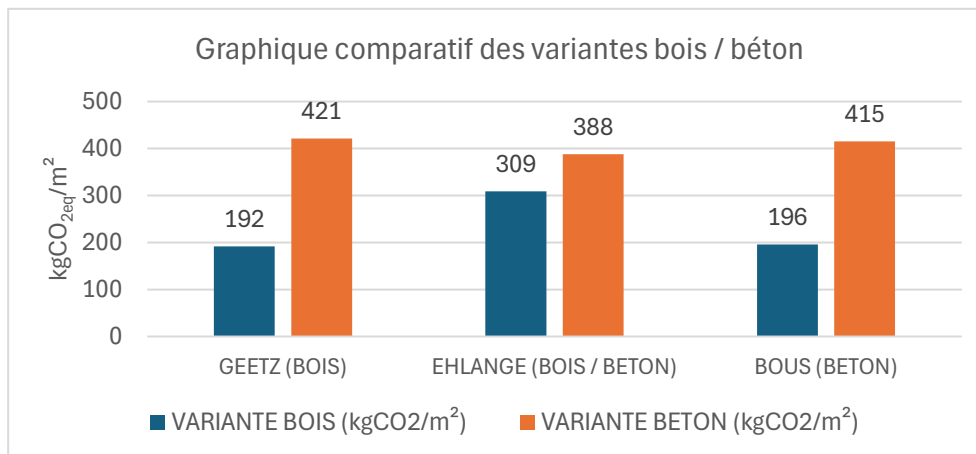
Selon les résultats obtenus, le modulaire en bois présente l’empreinte carbone la plus faible, avec une valeur de 192 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>. Ce résultat est particulièrement significatif puisqu’il correspond à près de la moitié de l’empreinte carbone d’une construction traditionnelle en béton, estimée à 415 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>.

La solution mixte bois/béton se situe, comme attendu, dans une position intermédiaire, avec une empreinte carbone de 309 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>. Cette performance confirme que l’intégration du bois dans la structure permet une réduction substantielle des émissions par rapport à une solution béton.

De manière générale, ces résultats soulignent l’intérêt environnemental du recours au bois comme matériau principal dans la construction modulaire. Plus la proportion de bois employée est élevée, plus la réduction des émissions de gaz à effet de serre sur l’ensemble du cycle de vie du bâtiment est significative.



L’analyse des variantes met en évidence des écarts marqués d’empreinte carbone selon le type de structure retenu :



	VARIANTE BOIS (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	VARIANTE BETON (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	RAPPORT
GEETZ (BOIS)	192	421	219%
EHLANGE (BOIS / BETON)	309	388	126%
BOUS (BETON)	196	415	212%

Les constructions tout bois présentent les performances environnementales les plus favorables avec des émissions comprises entre 192 et 196 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>, pour une moyenne de 194 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>.

La variante mixte bois/béton affiche un niveau d'émissions plus élevé, atteignant 309 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>. Cette valeur représente une hausse significative par rapport aux solutions entièrement bois, tout en restant nettement plus performante que les structures exclusivement en béton.

Les variantes de construction en béton constituent l'option la plus émettrice avec des résultats variant de 388 à 421 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>, pour une moyenne de 408 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>.

Au regard de ces résultats, le recours au bois apparaît comme un levier particulièrement efficace pour réduire l'empreinte carbone au niveau structurelle. Par rapport aux variantes en béton, les solutions tout bois présentent ainsi un potentiel de réduction des émissions d'un facteur  $\approx 2$ .

## 9 CONCLUSION

L'analyse a été réalisée à partir des quantités de matériaux figurant dans les bordereaux, lesquelles ont ensuite été associées aux données environnementales génériques luxembourgeoises. Les matériaux étudiés, principalement le bois et le béton et secondairement l'acier ont permis d'évaluer l'impact environnemental du bâtiment sur la durée de vie pour ensuite permettre de déterminer l'empreinte carbone exprimée en kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup> de surface brute intérieure et donc de comparer les différents systèmes constructifs.

L'analyse des variantes réelles a révélé que la construction en bois présente l'empreinte carbone la plus faible avec 192 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup> soit près de la moitié de celle de la version entièrement en béton, qui atteint 415 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>. La solution mixte bois/béton, avec 309 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup> occupe une position intermédiaire, confirmant qu'une utilisation partielle du bois permet déjà une réduction significative des émissions, proportionnelle à la quantité de bois utilisée.

L'analyse des variantes alternatives, consistant à remplacer un matériau dominant par son opposé, confirme les résultats obtenus lors de l'étude des variantes réelles. La construction en bois présente ainsi une empreinte carbone moyenne de 194 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>, tandis que la construction en béton atteint 408 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>. Ces résultats montrent que l'utilisation du bois offre un potentiel de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> d'un facteur  $\approx 2$ .

Cette étude met en évidence l'impact déterminant du choix des matériaux sur l'empreinte carbone des bâtiments. Les analyses réalisées montrent de manière cohérente que la construction en bois permet de réduire significativement les émissions de CO<sub>2</sub> jusqu'à un facteur proche de 2 par rapport au béton tandis que les solutions mixtes bois/béton offrent une réduction intermédiaire proportionnelle à la part de bois utilisée.

L'évaluation des variantes réelles et alternatives confirme que l'intégration du bois dans la structure constitue une stratégie efficace pour améliorer la performance environnementale des bâtiments. Ces résultats soulignent l'importance d'optimiser le mix matière dès la phase de conception afin de minimiser l'empreinte carbone sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment.

À l'échelle de la Grande Région, les résultats obtenus présentent une forte cohérence avec les tendances observées dans les pays limitrophes, notamment en France, en Belgique et en Allemagne, où les études d'analyse du cycle de vie montrent également une prédominance de l'impact de la phase de fabrication des matériaux et un avantage environnemental marqué en faveur des structures bois.

Toutefois, certaines différences peuvent influencer légèrement les résultats, notamment le mix énergétique national, la disponibilité locale des ressources, ainsi que les procédés de fabrication spécifiques à chaque filière nationale.

Ces variations n'affectent cependant pas les ordres de grandeur observés ni les tendances générales, ce qui confirme la pertinence d'une approche harmonisée à l'échelle de la Grande Région pour l'évaluation comparative des systèmes constructifs.

---

## 10 ANNEXES

Simulation : 240344\_\_DD\_\_SIM\_01\_simulation\_bois→béton

Simulation : 240344\_\_DD\_\_SIM\_02\_simulation\_béton→bois

Dossier : 240344\_\_DD\_\_BORDEREAU\_01\_quantités\_matériaux

Dossier : 240344\_\_DD\_\_PLAN\_01\_surface\_intérieure

Dossier : 240344\_\_DD\_\_PLAN\_02\_surface\_mur\_plancher