

Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Analyse paramétrique multicritère d'une travée structurelle en voiles porteurs : Évaluation comparative des modes constructifs en bois lamellé-croisé, terre cuite alvéolaire et terre crue comprimée

Auteur : David, Matis

Promoteur(s) : Reiter, Sigrid

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine

Année académique : 2025-2026

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/26184>

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.

Analyse paramétrique multicritère d'une travée structurelle en voiles porteurs :

Évaluation comparative des modes constructifs en bois lamellé-croisé, terre cuite alvéolaire et terre crue comprimée

DAVID Matis

Travail de fin d'étude présenté en vue de l'obtention du grade de :

Ingénieur Civil Architecte

Promoteur :

Pr. REITER Sigrid

Année académique : **2025 - 2026**

Remerciements

Mes remerciements vont en premier lieu à ma promotrice, le Pr. Sigrid Reiter, pour ses conseils et sa disponibilité.

Je tiens également à remercier le Pr. Luc Courard et M. François Laurent qui ont accepté de participer à mon jury. En particulier, M. Laurent qui a mis à ma disposition un cas d'étude, ainsi que des données indispensables à la recherche réalisée.

Finalement, je remercie mes proches pour leur relecture attentive de ce travail et leur soutien tout au long de sa réalisation.

Notice sur l'ia

Conformément aux principes de transparence académique, l'auteur déclare avoir utilisé l'IA Gemini comme assistant rédactionnel, correcteur orthographique et comme assistant de codage de scripts Python.

Résumé

Face à l'urgence de réduire l'impact carbone initial (phases A1 à A5) du secteur de la construction, la transition des structures en béton vers des alternatives écosourcées est indispensable. Cependant, la prescription de ces matériaux en phase d'esquisse reste freinée par le manque d'outils d'évaluation précoce et de données comparatives rigoureuses. Afin de répondre à ce besoin, cette recherche adopte une démarche de recherche par le design en développant un flux de travail paramétrique sous Grasshopper et Karamba3D. Le modèle conçu couple le prédimensionnement mécanique tridimensionnel à une évaluation environnementale et financière automatisée. Dans un premier temps, nous menons une analyse comparative et de sensibilité à l'échelle d'une travée structurelle de référence, en évaluant l'influence de la géométrie, des contraintes physiques et des choix méthodologiques sur trois alternatives matérielles : le bois lamellé-croisé (CLT), la brique de terre cuite alvéolaire (BMA) et le bloc de terre crue comprimée (BTC).

Dans un second temps, nous réalisons un balayage paramétrique exhaustif de 1230 configurations géométriques et matérielles afin d'identifier les fronts de Pareto optimaux pour chaque typologie entre carbone et coût. Les résultats désignent le bloc de terre crue (BTC) comme l'optimum environnemental bas-carbone sous faible élancement et la brique de terre cuite (BMA) comme la solution économique optimale. Le bois lamellé-croisé (CLT) s'avère systématiquement dominé sur le front de Pareto en raison de la chape de ragréage lourde requise pour assurer l'équivalence thermique. Enfin, l'évaluation met en lumière le rôle d'invariant environnemental lourd joué par le radier de fondation, qui lisse les gains liés à la substitution matérielle des voiles. Cette recherche démontre ainsi le potentiel des flux de travail paramétriques pour guider les choix architecturaux et structurels dès la phase d'esquisse.

Table des matières

1. Introduction	- 7 -
1.1 Une tendance incompatible avec l'urgence climatique	- 7 -
1.2 La responsabilité croissante du secteur de la construction	- 7 -
1.3 L'analyse de cycle de vie	- 8 -
1.4 Carbone opérationnel et carbone incorporé.....	- 9 -
1.5 Motivation et objectifs du TFE	- 10 -
1.6 Innovation (research gap) et questions de recherche	- 11 -
1.7 Structure du TFE	- 12 -
2. Etat de l'art.....	- 13 -
2.1 Changement de paradigme de l'opérationnel vers l'incorporé	- 13 -
2.2 Incertitude du carbone intrinsèque	- 13 -
2.3 Périmètre et frontière de l'étude	- 14 -
2.4 Poids relatif du gros œuvre.....	- 15 -
2.5 Equivalence fonctionnelle des systèmes constructifs.....	- 16 -
2.6 Problème du Transfert d'impact.	- 16 -
2.7 Limite de l'Unité fonctionnelle.....	- 17 -
2.8 Revue de la littérature sur l'ACV de matériaux structurels	- 17 -
2.9 Le Bois d'Ingénierie : Lamellé-Croisé (CLT)	- 22 -
2.9.1 Propriétés fondamentales et atout environnemental intrinsèque	- 22 -
2.9.2 Limites dimensionnelles et panneau surfacique (CLT).....	- 23 -
2.9.3 Le paradoxe de la massivité et l'impératif d'optimisation matérielle	- 23 -
2.10 La Terre Crue : la Brique de Terre Compressée (BTC).....	- 24 -
2.10.1 Potentiel de décarbonation et comportement mécanique fondamental.....	- 24 -
2.10.2 Vulnérabilité hygrothermique et limites des techniques traditionnelles	- 25 -
2.10.3 La solution industrielle : La Brique de Terre Compressée (BTC) et les stratégies de protection	- 25 -
2.10.4 Le fardeau de la masse.....	- 26 -
2.11 La Terre Cuite : La brique monomur alvéolaire (BMA)	- 26 -
2.11.1 Propriétés inhérentes et paradoxe thermo-structurel de la terre cuite	- 26 -
2.11.2 La brique monomur alvéolaire (BMA) : Efficacité carbone par l'intégration de l'isolation	- 27 -
2.12 Comparaison d'une typologie structurelle en voiles continues	- 27 -
2.13 La loi de MacLeamy	- 28 -

2.14 Apport du design paramétrique.....	- 29 -
2.15 Analyse multicritères	- 30 -
2.16 Conclusion de l'état de l'art.....	- 31 -
3. Méthodologie.....	- 32 -
3.1 Introduction.....	- 32 -
Schéma récapitulatif méthodologique.....	- 33 -
3.2 Cadrage & hypothèses.....	- 34 -
3.2.1 Choix du cas d'étude.....	- 34 -
3.2.3 Choix trame structurelle	- 35 -
3.2.4 Choix des paramètres géométriques	- 35 -
3.2.5 Equivalence fonctionnelle	- 36 -
3.3 Modes constructifs	- 42 -
3.3.1 SO : Mur en bois lamellé croisé.....	- 43 -
3.3.2 S1 : Brique terre cuite alvéolaire porteuse	- 44 -
3.3.3 S2 : Brique de terre crue comprimée	- 45 -
3.4. Modélisation.....	- 47 -
3.4.1 Modélisation paramétrique avec Grasshopper	- 48 -
3.4.2 Analyse structurelle avec Karamba3D.....	- 48 -
3.4.3 Poteaux & poutres lamellées collés :	- 49 -
3.4.4 Éléments en bois lamellé-croisé (CLT)	- 49 -
3.4.5 Éléments en bloc de terre comprimée (BTC).....	- 50 -
3.4.6 Éléments en briques alvéolaires de terre cuite	- 51 -
3.4.7 Fondation en béton armé.....	- 51 -
3.4.7 Calibration.....	- 52 -
3.5 Choix méthodologiques ACV	- 53 -
3.5.1 Périmètre de l'étude (A1-A5).....	- 53 -
3.5.2 Utilisation de fiches EPD	- 53 -
3.5.3 Rôle comparatif de la phase d'esquisse	- 53 -
3.5.4 Calcul carbone manuel et simplifié	- 54 -
3.5.5 Indicateurs de sortie et limite	- 54 -
3.5.6 Extraction des facteurs d'émissions à partir des EPD.....	- 55 -
3.6 Méthodologie d'estimation des coûts de construction.....	- 57 -
3.6. Plan D'expérience	- 58 -
3.6.1 Analyses comparatives	- 58 -
3.6.2 Analyses de sensibilités	- 59 -

3.6.3 Indicateurs.....	- 61 -
3.6.4 Analyses multi-critères	- 62 -
4. Résultats.....	- 64 -
4.1 Analyse cas d'étude.....	- 64 -
4.1.1 Émissions CO ₂ (GWP fossile A1-A5) par élément	- 64 -
4.1.2 Masse (Kg) et coût (Kg) par élément	- 65 -
4.2 Analyses comparatives.....	- 67 -
4.2.1 Nombre d'étages	- 67 -
4.2.2 Portée (4,0m → 7,5m)	- 69 -
4.2.3 Le pas d'étage (2,8m → 6,0m)	- 70 -
4.2.4 Ratio vitrage/façade wwr (15 % → 50 %).....	- 72 -
4.3 Analyses de sensibilités.....	- 72 -
4.2.1 Carbone biogénique	- 73 -
4.2.2 Inertie thermique (75 kg/m ² → 350 kg/m ²).....	- 74 -
4.2.3 Charge variable Q (2,0 → 7,5 kN/m ²).....	- 75 -
4.2.4 Distance d'approvisionnement (50km → 400km)	- 76 -
4.2.5 Transmittance Thermique U (Laine De Roche et Cellulose).....	- 77 -
4.3 Analyse multicritère	- 78 -
4.3.1 Trame de petite échelle (85 à 115 m ²)	- 79 -
4.3.2 Trame de moyenne échelle (180 à 220 m ²).....	- 81 -
4.3.3 Trame de grande échelle (280 à 350 m ²).....	- 83 -
5. Discussion	- 85 -
5.1 Comparaison des performances et limites matérielles.....	- 85 -
5.1.1 Domaines de performance des matériaux étudiées	- 85 -
5.1.2 Limites physiques et constructives des matériaux	- 87 -
5.2 Sensibilité physique et incertitudes méthodologiques	- 88 -
5.2.1 Sensibilités des paramètres physiques et méthodologiques.....	- 88 -
5.2.2 Limites et incertitudes méthodologiques	- 89 -
5.3 Evaluation du flux de travail computationnel	- 90 -
5.3.1 Intérêt du paramétrique en phase d'esquisse	- 90 -
5.3.2 Limite de la méthodologie paramétrique et des algorithmes exhaustifs	- 91 -
6. Conclusion.....	- 91 -
Bibliographie.....	- 93 -
Références Académiques.....	- 93 -
Normes, Rapports et Documents Techniques	- 100 -

1. Introduction

Le réchauffement climatique est un défi majeur de notre ère contemporaine à l'échelle planétaire. Il se manifeste par une élévation de la température moyenne à la surface du globe, causée par la perturbation anthropique du cycle global du carbone. Le gaz à effet de serre (GES) contenant du dioxyde de carbone (CO₂) issu de l'activité humaine s'accumule dans l'atmosphère et dépasse ce que les puits naturels (océans et biosphère terrestre) ne peuvent absorber. Cela génère un forçage radiatif qui réchauffe le climat. Afin de limiter les effets néfastes du réchauffement climatique, les accords de Paris ont imposé un « budget carbone ».

1.1 Une tendance incompatible avec l'urgence climatique

Pour limiter ce réchauffement, à des seuils critiques de 1,5 °C ou 2 °C définis dans les accords de Paris, des réductions d'émissions de gaz à effet de serre (GES) drastiques et immédiates doivent être opérées. Selon Friedlingstein et al. (2023), les émissions mondiales de CO₂ fossile n'ont cessé de croître de manière ininterrompue à chaque décennie, évoluant d'une moyenne de $3,0 \pm 0,2$ Gt C/an dans les années 1960 à $9,6 \pm 0,5$ Gt C/an au cours de la période 2013-2022. Friedlingstein et al. (2023) indiquent que les pays qui font partie de l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Économiques) ont déjà atteint leur pic d'émission aux alentours de 2005 et diminuent désormais d'environ 1 %/an. À l'inverse les émissions des pays dont l'économie est considérée émergente (hors-OCDE) continuent de grimper, notamment l'Inde où la forte croissance économique n'est pas encore compensée par la décarbonation, entraînant une hausse continue des émissions pour répondre à la demande énergétique. Les trajectoires actuelles sont encore très éloignées des réductions nécessaires pour atteindre les objectifs climatiques ambitieux fixés par l'Accord de Paris de la CCNUCC (Friedlingstein et al., 2023).

1.2 La responsabilité croissante du secteur de la construction

Dans ce contexte de hausse des émissions globales, le secteur de la construction se distingue comme un contributeur majeur dont l'impact s'accélère de façon disproportionnée. Alors que l'empreinte de cette industrie représentait environ un cinquième (20 %) des émissions totales de carbone en 1995, cette part a significativement augmenté pour atteindre 33 % en

2022 (Li et al., 2025). De plus, selon la même référence, « *l'empreinte carbone de l'industrie de la construction future pourrait augmenter de 30 % et atteindre environ 16 Gt d'ici 2050 dans le scénario de statu quo.* » (Li et al., 2025, p.3, traduction personnelle). Ainsi, les émissions du secteur du bâtiment risquent d'épuiser à elles seules le budget carbone total admissible tout en limitant le réchauffement planétaire à 1,5 °C d'ici 2050.

Cette croissance sectorielle est fondamentalement liée à la nature des ressources employées pour bâtir nos infrastructures, pointant vers un problème d'intensité et de choix matériels. En effet, l'augmentation des émissions est spécifiquement tirée par l'utilisation de matériaux de construction dits « non durables », tels que le ciment, les briques et les métaux (Li et al., 2025).

Il devient par conséquent impératif de dépasser les logiques constructives reposant exclusivement sur le béton et l'acier. Une transition profonde vers la construction bas-carbone s'impose comme une nécessité absolue pour infléchir cette courbe d'émissions et concevoir un cadre bâti respectant les limites planétaires.

1.3 L'analyse de cycle de vie

Pour évaluer les dommages environnementaux et la consommation de ressources associés au secteur de la construction, l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) s'est imposée comme un outil d'analyse comparative de référence (Sharma et al., 2011). Cette méthode permet d'évaluer les risques environnementaux sur l'ensemble de la durée de vie d'un produit, d'un processus ou d'une activité, et est particulièrement utilisée dans le domaine du bâtiment (Sharma et al., 2011). La rigueur et la légitimité de cette méthode reposent sur un cadre strict dicté par l'Organisation internationale de normalisation (ISO), principalement à travers la norme ISO 14040. Selon cette norme, l'ACV se définit officiellement comme la compilation et l'évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un produit tout au long de son cycle de vie (ISO, 1997). Ce cadre normatif vise à mieux comprendre et réduire les impacts associés aux produits manufacturés (tels que l'utilisation des ressources ou les conséquences écologiques), en couvrant toutes les étapes depuis l'acquisition des matières premières jusqu'à l'élimination finale (ISO, 1997). Pour opérationnaliser cette approche globale dans le secteur de la construction, les normes européennes EN 15804 et EN 15978 structurent l'information en quatre grandes étapes modulaires : production et construction, exploitation, fin de vie, externalités du système.

Les quatre étapes standardisées de la méthode ACV selon les normes européennes actuelles sont détaillées ci-dessous (EN 15978, 2011 ; EN 15804, 2012).

La première étape englobe la production et la construction (Modules A). Les sous-modules A1 à A3 quantifient les impacts de la phase de production, allant de l'extraction des ressources jusqu'à la sortie de l'usine. Les modules A4 et A5 complètent cette phase en intégrant le transport des produits vers le site et les opérations de construction sur le chantier.

La deuxième étape correspond à la phase d'exploitation de l'ouvrage (Modules B). Cette section évalue l'impact des composants durant leur utilisation (B1) et inclut les interventions de maintenance, de réparation, de remplacement et de rénovation (B2 à B5). Les consommations opérationnelles liées à l'énergie (B6) et à l'eau (B7) sont également comptabilisées dans ce périmètre.

La troisième étape caractérise la fin de vie du bâtiment (Modules C). Les modules C1 à C4 regroupent l'ensemble des processus de déconstruction, le transport des gravats, le traitement des déchets et leur mise en décharge. Ces opérations appartiennent au système étudié jusqu'à ce que les matériaux atteignent formellement l'état de "fin de déchet".

La dernière étape évalue les externalités au-delà des frontières du système (Module D). Ce module informatif quantifie le potentiel net de réutilisation, de valorisation énergétique ou de recyclage des matériaux secondaires une fois qu'ils ont quitté le cycle de vie principal du bâtiment.

1.4 Carbone opérationnel et carbone incorporé

Au sein d'une ACV de bâtiments, l'émission carbone peut être divisée en deux composants principaux : le carbone incorporé et le carbone opérationnel (Liang et al, 2023). Le carbone opérationnel, souvent désigné par l'acronyme OCE (*Operational Carbon Emissions*), quantifie les émissions de gaz à effet de serre générées par la consommation d'énergie et de ressources durant la phase d'exploitation d'un bâtiment (Liang et al., 2023). Dans le cadre méthodologique de la norme européenne EN 15978, cette phase d'utilisation correspond aux modules B, notamment B6 et B7 qui comprennent l'énergie et l'eau consommées par les systèmes techniques intégrés à l'ouvrage. Historiquement, ces émissions opérationnelles constituent la part majoritaire de l'empreinte environnementale des structures (Sharma et al, 2011). En effet, l'exploitation génère en moyenne 67 % des émissions de carbone totales selon Liang et al. (2023).

Le carbone incorporé (ECE) quantifie les émissions de gaz à effet de serre imputables aux matériaux de construction (Cabeza et al., 2021). L'indicateur ECE englobe théoriquement les charges environnementales des composants, de l'extraction jusqu'à la démolition (Liang et al., 2023). Cependant, Cabeza et al. (2021) met en lumière que ce terme varie fortement d'une étude à l'autre et peut prendre plusieurs définitions en fonction des frontières de l'étude. L'article de Liang et al. (2023) décrit 3 catégories principales d'émissions de carbone incorporé :

- Le carbone initial (*Upfront Carbon*), correspondant aux modules de production et de construction A1 - A5 (cradle to handover).
- Le carbone de démolition qui correspond aux phases C1 à C4 de fin de vie du bâtiment.
- Et enfin le carbone récurrent (B1 à B5) compris dans la phase d'usage du bâtiment, qui correspond à la maintenance et la rénovation du bâtiment.

En moyenne l'émission de carbone initial correspond à 31% de l'émission totale. La part de l'émission carbone de la phase de fin de vie du bâtiment représente en moyenne seulement 2%. (Liang et al. 2023). On comprend donc le nouvel enjeu lié à la réduction de ce carbone initial pour toujours plus décarboner le secteur du bâtiment.

1.5 Motivation et objectifs du TFE

Ma volonté initiale à travers ce TFE est de lier les acquis techniques de ma formation en ingénierie des structures aux enjeux multidisciplinaires plus larges du cursus d'ingénieur architecte. Je souhaite ainsi étudier directement la question structurelle en y intégrant des dimensions environnementales, énergétiques et financières, afin de soutenir une démarche de conception intégrée et multicritère de l'architecture.

Mon cursus d'ingénieur se focalise traditionnellement sur les systèmes en béton armé, en acier et en bois. Face à la nécessité de décarboner le secteur de la construction, je souhaitais explorer des modes constructifs alternatifs, notamment la maçonnerie porteuse, peu abordée dans ma formation théorique. À l'Université de Liège, nous avons été sensibilisés à la méthode de l'ACV à travers des logiciels intégrés tels que TOTEM ou One Click LCA. Ma motivation était d'entrer au cœur de cette méthodologie pour comprendre comment se structurent les données d'impact et se calculent les flux de matière et d'énergie. Enfin, mon intérêt pour la conception numérique m'a poussé à explorer le potentiel d'outils algorithmiques comme Grasshopper afin d'évaluer les bénéfices de leur intégration dans un flux de travail applicable dès la phase d'esquisse.

Ces motivations, couplées à une revue de la littérature sur ces différents domaines et à l'intégration d'un cas d'étude réel comme point d'ancrage physique m'ont permis de définir 2 objectifs pour cette étude :

Objectif 1. Développement d'un outil d'aide à la décision paramétrique :

Concevoir un modèle algorithmique sous Grasshopper capable de lier dynamiquement des paramètres et contraintes géométriques à :

- Un choix de modes constructifs reposant sur des matériaux alternatifs.
- Un prédimensionnement mécanique aux états limites (ELU/ELS) basé sur les principes des Eurocodes.
- Un protocole d'équivalence fonctionnelle entre modes constructifs.
- Un calcul d'inventaire carbone fossile basé sur l'extraction de volumes et l'utilisation de fiches EPD réelles.
- Une estimation financière indexée sur les coûts du marché belge.

Objectif 2. Évaluation comparative multicritères de systèmes structurels géosourcés et biosourcés :

Analyser, à l'échelle d'une trame structurelle issue d'un cas d'étude, les impacts de la matérialité d'un voile de façade. L'étude oppose un système de référence en bois lamellé-croisé (CLT) à deux maçonneries géosourcées : la brique de terre cuite alvéolaire (BMA) et le bloc de terre crue comprimée (BTC). Explorer l'influence des choix géométriques sur ces impacts et leur robustesse face aux incertitudes physiques, réglementaires et logistiques. Enfin, identifier, par une analyse multicritère, les compromis optimaux afin de définir les domaines d'application préférentiels de chaque matériau.

1.6 Innovation (research gap) et questions de recherche

Ces deux objectifs visent à apporter une réponse à trois questions de recherche formulées après l'identification d'un manque dans la littérature scientifique durant l'état de l'art de cette étude. L'évaluation environnementale des bâtiments nécessite de cibler les phases du cycle de vie et les éléments générant les impacts les plus certains et significatifs. Le carbone incorporé représente une part croissante des émissions totales face à l'optimisation continue du carbone opérationnel. Le choix du matériau de structure impacte de manière importante ces émissions incorporées au sein des bâtiments. Röck et al. (2020) affirment que le carbone incorporé dans les bâtiments est le défi caché pour arriver à atténuer de manière efficace les changements climatiques. Au sein de ce bilan, les émissions initiales (*upfront carbon*), correspondant aux phases de production et de construction (A1-A5), constituent la part la plus significative des impacts environnementaux liés aux matériaux de construction (Liang et al., 2023). À l'inverse, les phases d'usage (B) et de fin de vie (C) demeurent soumises à de fortes incertitudes temporelles liées à des scénarios prospectifs (Pomponi & Moncaster, 2018). Restreindre l'évaluation environnementale du système structurel au seul périmètre initial (A1-A5) permet d'isoler le levier de décarbonation le plus direct et le plus fiable en lien avec le choix des matériaux.

L'analyse de la littérature révèle un déficit critique de données quantitatives concernant l'évaluation environnementale sur le cycle de vie des matériaux géosourcés. La majorité des recherches environnementales sur les structures se concentrent sur le béton, l'acier et le bois d'ingénierie (Cabeza et al., 2021 ; Mouton et al., 2023). L'impact des techniques en terre crue (briques de terre compressée BTC) ou en terre cuite alvéolaire (brique monmur alvéolaire BMA) stagne et reste marginalement documenté dans un cadre comparatif standardisé (Cabeza et al., 2021). L'absence de confrontation directe de ces solutions minérales face à une référence biosourcée mature, tel que le bois lamellé-croisé (CLT), limite sévèrement leur prescription objective.

- **Question de recherche 1 :** *Comment les performances environnementales, financière et massique des structures en terre crue et en terre cuite se positionnent-elles face à un système de référence biosourcé en bois ?*

Pour pouvoir évaluer ces différences de performance, l'évaluation environnementale comparative exige l'établissement d'une stricte équivalence fonctionnelle entre les scénarios (Gervásio & Dimova, 2018). Cette exigence impose d'évaluer la sensibilité du modèle face aux contraintes de la physique (mécanique et thermique) du bâtiment (Brahma et al., 2024). Parallèlement, cette analyse doit intégrer les incertitudes inhérentes aux hypothèses de l'Analyse de Cycle de Vie modifiant significativement les résultats environnementaux finaux (Fernandes et al., 2019).

- **Question de recherche 2 :** *Dans quelle mesure la variation des paramètres physiques et des hypothèses méthodologiques influence-t-elle les différents indicateurs carbone, économique et massique ?*

L'intégration tardive de l'ACV dans le processus architectural contraint drastiquement le potentiel d'atténuation carbone. Les premières décisions spatiales et matérielles verrouillent la majorité des impacts environnementaux (Bacheva & Raposo Grau, 2025). Les concepteurs manquent

d'outils interactifs pour évaluer ces répercussions dès la phase d'esquisse (Shi et al., 2025). Le couplage de la modélisation paramétrique avec des algorithmes multicritères permet d'explorer simultanément des objectifs contradictoires, tels que la réduction du carbone et la minimisation de la masse (Shi et al., 2025). Le déploiement de ces flux de travail agiles reste cependant peu appliqué à l'évaluation comparative de matériaux écosourcés.

- **Question de recherche 3 :** *Dans quelle mesure l'utilisation d'un flux de travail paramétrique exhaustifs en phase d'esquisse permet-il de résoudre les conflits multicritères entre le choix matériel, l'impact carbone et budgétaire ?*

La présente recherche se structure précisément pour combler ces lacunes scientifiques. Le protocole expérimental s'appuie sur une approche ascendante (*bottom-up*) ancrée dans la réalité d'un cas d'étude professionnel. En figeant la géométrie architecturale pour n'y faire varier paramétriquement que la matérialité des voiles porteurs, la méthode isolera rigoureusement le comportement du bois (CLT), de la terre crue (BTC) et de la terre cuite alvéolaire. L'application d'outils algorithmiques générera des données comparatives inédites visant à soutenir la prise de décision architecturale dès les premières phases du projet.

1.7 Structure du TFE

Cette recherche s'inscrit dans une démarche de recherche par le design, combinant une revue systémique de la littérature à une approche expérimentale computationnelle. La méthodologie est de nature ascendante (*bottom-up*) : elle part d'un cas d'étude professionnel réel pour en abstraire une trame structurelle de référence, sur laquelle est appliqué un protocole d'évaluation multicritère paramétrique. L'outil développé sous Grasshopper et Karamba3D couple un prédimensionnement mécanique à un bilan de carbone incorporé et une estimation de coût.

Le document est structuré en cinq chapitres. Le chapitre 2, état de l'art explore la littérature scientifique sur l'ACV, le carbone incorporé, il contient une revue systémique pour le choix des matériaux et documente leurs propriétés (CLT, BMA, BTC). Le chapitre 3, méthodologie détaille la modélisation paramétrique sous Grasshopper et le cadre d'équivalence fonctionnelle mécanique et thermique. Le chapitre 4 présente les résultats, expose les analyses d'influence, de sensibilité et les fronts de Pareto optimaux. Enfin, le Chapitre 5 discussion et conclusion analyse les compromis, les limites méthodologiques et apporte des réponses aux questions de recherche posées.

2. Etat de l'art

2.1 Changement de paradigme de l'opérationnel vers l'incorporé

Historiquement, les politiques environnementales et les efforts d'optimisation du secteur de la construction ont principalement ciblé la réduction de la demande énergétique opérationnelle (Bacheva & Raposo Grau, 2025). Cela a induit une optimisation de la phase d'usage, entraînant une diminution drastique des impacts opérationnels, ce qui accroît mécaniquement la part relative et absolue du carbone intrinsèque lié à la production des matériaux de construction (Mouton et al., 2022).

Une méta-analyse effectuée par Röck et al., (2020) sur un large échantillon d'ACV de 238 bâtiments déjà publiés démontre que, pour les constructions respectant les réglementations thermiques standards de l'époque, le carbone incorporé représente environ 20 à 25 % des émissions totales. Cette proportion augmente mécaniquement à la suite des réformes énergétiques pour atteindre 45 à 50 % dans le cas des bâtiments à haute performance énergétique et peut arriver à 90% pour des cas extrêmes de bâtiments zéro énergie nette (Röck et al., 2020). Sur une période d'analyse standard de 50 ans, le ratio entre le carbone incorporé et le carbone opérationnel s'équilibre ainsi à 1 : 1 pour les nouvelles constructions à haute performance (Röck et al., 2020).

Cette dynamique rend le traitement du carbone intrinsèque inévitable et critique pour évaluer la véritable performance environnementale globale d'un bâtiment (Bacheva & Raposo Grau, 2025). Pomponi and Moncaster (2018) estiment que réduire le carbone incorporé dans les bâtiments est le plus grand défi futur en termes de performance pour le secteur du bâtiment.

2.2 Incertitude du carbone intrinsèque

Le traitement du carbone intrinsèque se heurte à plusieurs obstacles qui rendent incertaines les études. Comme vu précédemment dans l'article de Liang et al. (2023), la définition de celui-ci est compliquée et diffère d'un article à l'autre.

L'absence de standardisation stricte se traduit par des divergences significatives dans la sélection des coefficients d'impact, la définition des frontières du système et le choix des bases de données de référence (Cabeza et al., 2021). Cela se répercute sur les coefficients de carbone incorporé des matériaux qui présentent des marges de variation substantielles pour un même matériau (Pomponi & Moncaster, 2018). Cette flexibilité non contrainte dans le choix des données d'entrée introduit un risque de sélection arbitraire permettant aux praticiens de retenir les facteurs d'émission les plus avantageux pour orienter les résultats de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV). De plus, l'influence prépondérante de la localisation géographique sur le mix

énergétique accentue la variabilité des résultats d'ACV à l'échelle internationale (Cabeza et al., 2021).

Pour neutraliser ces biais, la quantification des impacts environnementaux des matériaux requiert l'utilisation de Déclarations Environnementales de Produits (EPD) spécifiques aux fabricants. Ces documents fournissent des données vérifiées par des tiers indépendants, assurant ainsi la crédibilité des inventaires tout au long de la chaîne d'approvisionnement (Bacheva & Raposo Grau, 2025). La robustesse de ces déclarations repose sur l'application stricte des normes fondatrices EN 15804 et ISO 14025, qui structurent uniformément les pratiques méthodologiques et les frontières du système (Bacheva & Raposo Grau, 2025). En complément, le choix du périmètre d'étude devient crucial pour limiter le risque d'erreur.

2.3 Périmètre et frontière de l'étude

Une grande majorité des analyses du cycle de vie des matériaux se limite exclusivement à l'étape de la fabrication, omettant les impacts opérationnels et de fin de vie (Pomponi & Moncaster, 2018). Historiquement, cette restriction s'explique par la nature structurelle des premières bases de données environnementales, focalisées sur un périmètre « cradle to gate », érigeant ainsi les modules A1 à A3 en standard méthodologique pour les EPD. Bien qu'une partie des études étende ce périmètre jusqu'à la fin de la construction (modules A1-A5), les phases d'exploitation (B) et de fin de vie (C) sont quasi systématiquement exclues en raison de l'incertitude fondamentale liée à l'estimation d'événements futurs lointains (Pomponi & Moncaster, 2018).

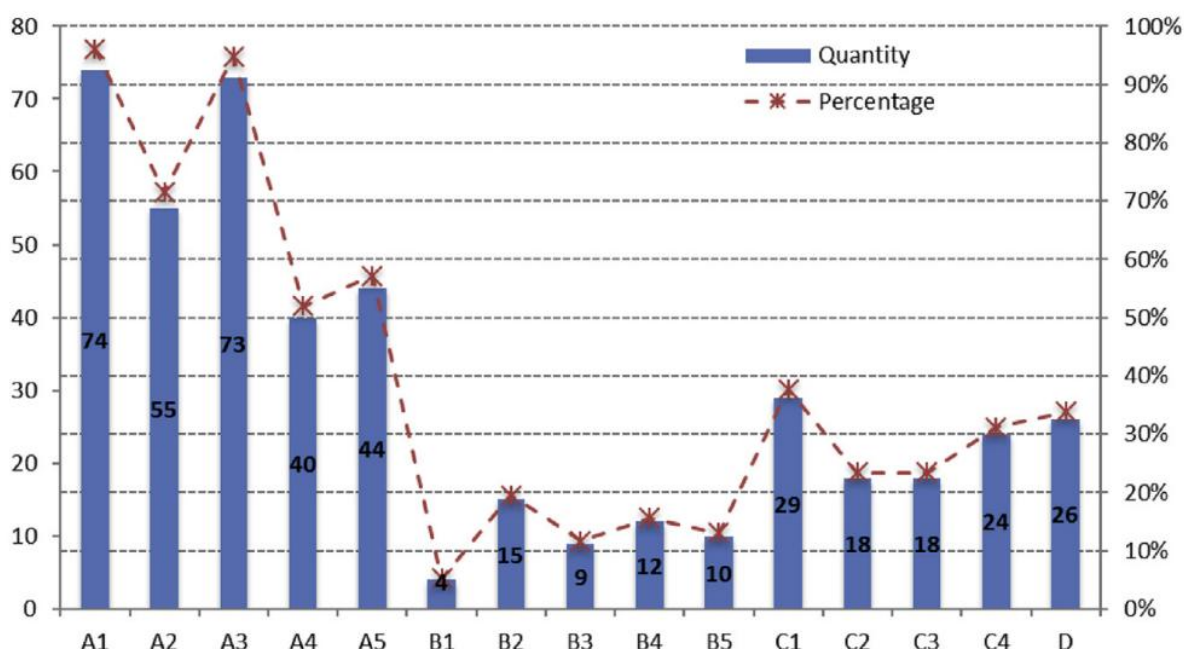


Fig. 1. Etapes du cycle de vie prises en compte dans le calcul du carbone incorporé dans les études ACV de bâtiments trouvés dans la littérature (Pomponi & Moncaster, 2018).

Les étapes de fin de vie (C) et le module D de circularité matérielle demeurent marginalisés, figurant dans en moyenne 23% des recherches selon le tableau de Pomponi & Moncaster, (2018). Les outils actuels n'offrent pas de directives quantitatives précises pour évaluer l'incidence des phases de fin de vie et de circularité (Kayaçetin et al., 2023). Par conséquent, l'évaluation de la fin de vie repose inévitablement sur des variables socio-technologiques purement prospectives, postulant qu'une filière de réemploi sera viable à l'issue de la période d'étude de 50 ans.

Le carbone de démolition et le carbone récurrent reste actuellement une grande source d'incertitude temporelle. En raison de ces incertitudes, cette étude se concentre sur le carbone initial au sein du carbone incorporé, ce qui correspond aux phases A1 à A5 de l'analyse en cycle de vie. Ce choix méthodologique isole les phases générant la majorité des émissions matérielles en réduisant les incertitudes temporelles.

2.4 Poids relatif du gros œuvre

Le secteur de la construction monopolise une part majoritaire des ressources matérielles mondiales. À l'échelle planétaire, l'édification de bâtiments consomme environ 50 % de l'ensemble des matières extraites de la lithosphère (Gervásio & Dimova, 2018). Cette pression extractive se traduit par l'absorption de 75 % de la production mondiale de béton, de 65 % des agrégats, 21 % de l'acier et 37 % du bois de construction produits à l'échelle globale (Gervásio & Dimova, 2018).

L'intervention de l'architecte et de l'ingénieur dès la phase d'esquisse constitue le levier d'atténuation majeur pour réduire les émissions de carbone incorporé (ECE). À titre de comparaison, les politiques d'achats publics (telles que les initiatives « Buy Clean » aux États-Unis) imposant des matériaux à plus faible intensité carbone sur des systèmes constructifs figés après conception se limitent à des réductions d'environ 16 % pour les structures en béton (Feickert & Mueller, 2025). En revanche, le recours à des stratégies de conception avancées, telles que l'optimisation géométrique des dalles, permet d'atteindre jusqu'à 79 % de réduction des ECE pour un système matériel donné (Feickert & Mueller, 2025).

Toutefois, si l'optimisation géométrique maximise l'efficacité d'un système conventionnel, le potentiel de décarbonation absolu de l'ouvrage reste intrinsèquement limité par la nature de la matière première. La sélection de la famille de matériaux prime ainsi hiérarchiquement sur l'optimisation paramétrique subséquente (Shi et al., 2025). Le remplacement d'une structure conventionnelle par un système intégrant des matériaux biosourcés (tels que le bois) diminue les émissions initiales de près de 65 % avant toute modification spatiale (Shi et al., 2025). Une fois ce basculement matériel fondamental opéré, l'optimisation géométrique secondaire n'apporte qu'une réduction additionnelle de 6 % du bilan carbone (Shi et al., 2025). Par conséquent, l'approche méthodologique la plus efficace identifiée consiste à substituer prioritairement les matériaux traditionnels par des alternatives écosourcées, pour ensuite appliquer une optimisation paramétrique sur ces systèmes performants. Cela impose un changement plus global de stratégie en intégrant la question du choix du matériau du système structurel et de l'optimisation géométrique de la structure comme éléments à combiner pour réduire les émissions de carbone incorporé dès les phases initiales de conception.

2.5 Equivalence fonctionnelle des systèmes constructifs

L'application objective de cette démarche décisionnelle se heurte actuellement à deux obstacles méthodologiques majeurs en ACV. Ces biais affectent précisément chacune des deux étapes d'optimisation précitées : l'incertitude des données et hypothèses compliquent la comparaison matérielle initiale, tandis que la métrique surfacique standardisée biaise ensuite l'optimisation géométrique subséquente.

L'évaluation comparative de l'énergie et du carbone incorporés révèle une hiérarchie stricte entre les familles de matériaux. Les matériaux conventionnels, tels que l'acier et le ciment, dominent outrageusement le bilan des émissions en raison de l'intensité énergétique de leur manufacture (Cabeza et al., 2021). À l'inverse, les matériaux naturels et biosourcés se distinguent par l'énergie incarnée la plus faible du panel constructif. Cependant, les éco-matériaux souffrent souvent de performances mécaniques et de durabilité intrinsèquement inférieures à celles des composites industriels (Cabeza et al., 2021).

La validité d'une évaluation comparative exige la transposition de la notion d'équivalence fonctionnelle stricte définie dans l'EN 15978 à l'échelle du système constructif. Le concept d'équivalent fonctionnel est une représentation des caractéristiques techniques et des fonctionnalités requises du bâtiment. Ici cela correspond ainsi au « cahier des charges » minimal que le système constructif doit satisfaire (Gervásio & Dimova, 2018). La comparaison objective des systèmes porteurs requiert une approche multicritère qui intègre et neutralise les biais liés à leurs spécificités physiques.

Pour illustrer ce biais, dans le cadre d'une modélisation comparative, Brahma et al (2024) traite le problème de l'équivalence de la conductivité thermique d'une paroi avec différent système constructifs. Les solutions biosourcées affichent une conductivité thermique désavantageuse par rapport aux produits synthétiques. Pour compenser ce déficit, une surépaisseur substantielle est requise : à titre d'exemple, 27 cm de chanvre sont nécessaires contre 9 cm de polyuréthane afin d'atteindre une même performance thermique de la paroi (Brahma et al., 2024). Cet excédent de masse détériore directement leur score environnemental absolu calculé en ACV, démontrant que l'implémentation de cet équivalent fonctionnel s'avère indispensable pour éviter une sous-estimation de l'empreinte carbone réelle de l'ouvrage (Souaid et al., 2024) et pour prévenir tout transfert d'impact vers d'autres catégories environnementales.

2.6 Problème du Transfert d'impact.

Le transfert d'impact est un phénomène crucial dans l'analyse du cycle de vie (ACV), où la réduction d'un impact environnemental entraîne l'augmentation d'un autre. Dans le cas des biomatériaux, alors que le potentiel de réchauffement global diminue, d'autres indicateurs environnementaux tels que l'utilisation des sols, les émissions de particules fines et l'écotoxicité

terrestre augmentent souvent de manière significative (Brahma et al., 2024). L'évaluation des matériaux biosourcés doit donc idéalement intégrer ces indicateurs pour s'assurer qu'une diminution d'impact carbone ne provoque pas une dégradation sévère ailleurs.

2.7 Limite de l'Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle en métrique surfacique standardisée dans la méthode ACV pour permettre une comparaison plus fiable biaise les comparaisons d'optimisation géométrique.

L'unité par mètre carré constitue le standard dominant dans l'évaluation environnementale des bâtiments et des structures, principalement pour s'aligner sur les outils d'interface actuels comme TOTEM (Mouton et al., 2022). Toutefois, cette approche mathématique engendre un biais méthodologique favorisant artificiellement les constructions de grande taille. Ce phénomène, qualifié d'effet de masquage (" m^2 masking effect"), dilue l'impact environnemental total sur une plus grande aire (Mouton et al., 2024). Par conséquent, cela pénalise durement les stratégies de conception axées sur la sobriété spatiale. Souaid et al. (2024) démontrent que les petites habitations, bien qu'affichant l'empreinte carbone absolue la plus faible, héritent de la pire performance environnementale par mètre carré de l'échantillon statistique. La minimisation des valeurs absolues ($kgCO_2e$) et la masse matérielle globale (kg) doivent être intégrées à l'optimisation en complément de l'indicateur surfacique, qui est conservé comme métrique permettant d'évaluer les solutions générées de différentes échelles entre elles et de les comparer aux références standard de l'industrie et de la littérature.

2.8 Revue de la littérature sur l'ACV de matériaux structurels

A cause de ces biais, la comparaison directe des émissions entre différentes études ACV s'avère compliquée. Bacheva et Raposo Grau (2025) soulignent que la définition des frontières du système et les structures des bases de données varient considérablement, entraînant des variations massives des résultats pour des bâtiments identiques. L'absence d'unités fonctionnelles communes rend le processus de sélection des matériaux hautement subjectif (Mouton et al., 2023). Pour ces raisons, la fiabilité d'une analyse comparative repose sur la confrontation systématique des scénarios étudiés à un modèle de référence commun. Pour garantir l'objectivité de l'évaluation de l'efficacité structurelle, il est impératif d'évaluer chaque variante de conception par rapport à des modèles théoriques fondés sur des critères de conformité et des contraintes strictement identiques (Mena, 2020 ; Cabeza et al., 2021).

Le choix des matériaux structuraux évalués dans cette étude s'appuie sur plusieurs revues bibliométriques ainsi que sur une revue systématique personnelle d'environ 350 articles.

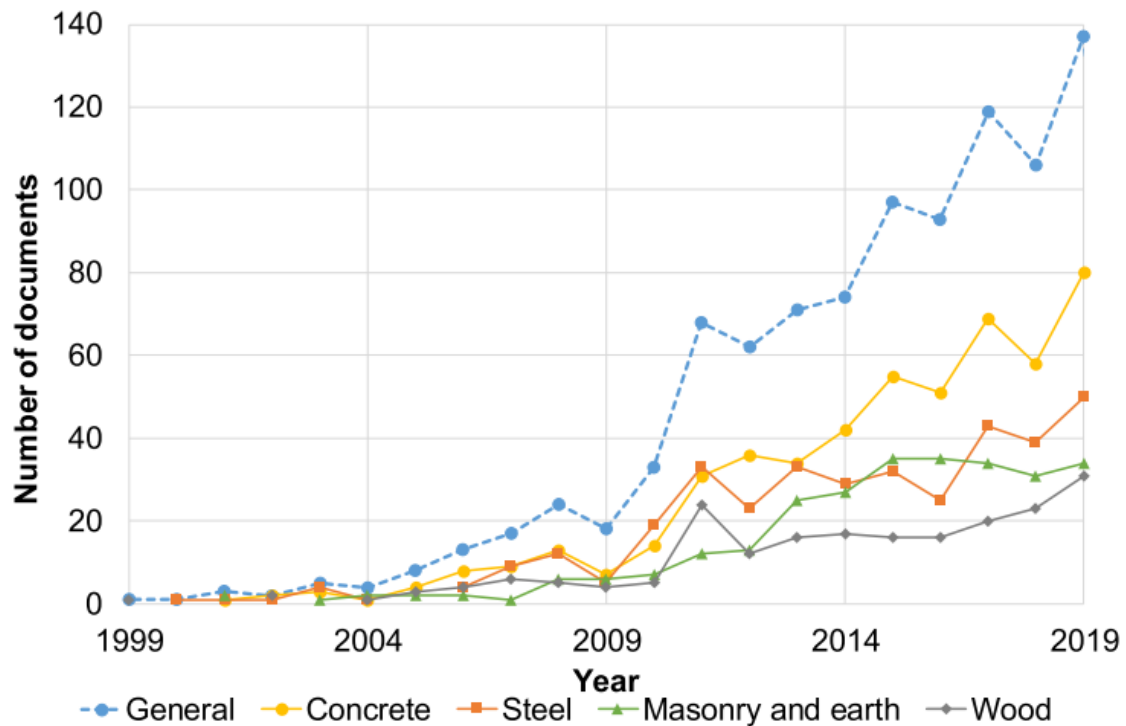


Fig. 2. Tendence du nombre de publications par types de matériaux (Cabeza et al., 2021).

L'étude de Cabeza et al. (2021) dresse une cartographie de la littérature scientifique mondiale pour extraire les coefficients d'énergie et de carbone incorporés des principales familles structurales. Cette analyse révèle que le béton constitue le matériau le plus examiné, suivi de près par l'acier, tandis que la recherche sur la maçonnerie et la terre stagne et que l'évaluation du bois présente un intérêt croissant plus récent (Cabeza et al., 2021).

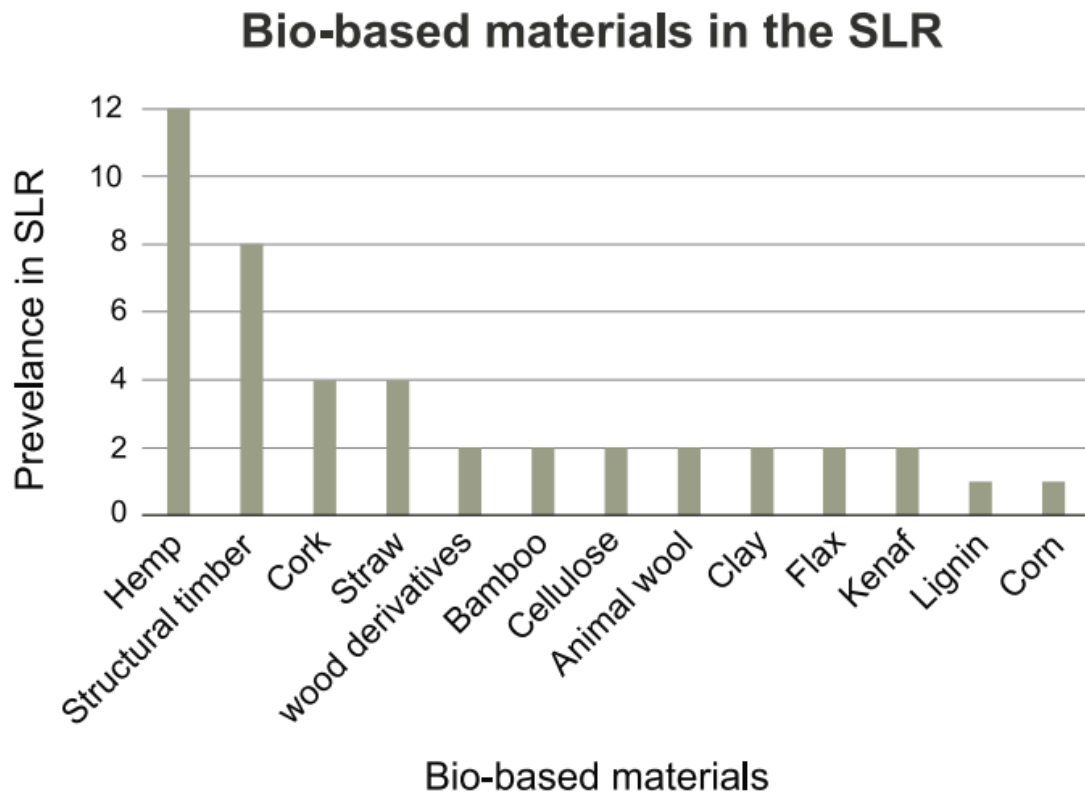


Fig. 3. Matériaux biosourcés évalués au sein d'une revue systématique de la littérature (Mouton et al., 2023)

D'autre part, certaines revues de littérature ciblent exclusivement le développement et l'évaluation environnementale des matériaux éco-sourcés. Par le biais d'une revue systématique, Mouton et al. (2023) recensent les matériaux biosourcés applicables à la structure et à l'enveloppe des bâtiments résidentiels. L'analyse de la fréquence d'apparition de ces matériaux indique que le chanvre (notamment sous forme de béton de chanvre et le bois d'ingénierie) constituent les solutions les plus documentées (Mouton et al., 2023).

Pour compléter ces observations, une revue systématique a été réalisée sur les articles récents entre 2017 et 2026 traitants d'une ACV sur un ou plusieurs bâtiments. En prenant en compte le temps et les moyens dont je disposais, j'ai procédé à cette revue via un script de requête API pour rassembler un corpus initial puis j'ai identifié les matériaux structurels grâce à un script d'analyse sémantique.

La base de données a été constituée par une interrogation systématique de la plateforme académique Semantic Scholar via son interface de programmation (API). La requête de recherche a ciblé les publications en accès libre (*Open Access*) combinant les opérateurs booléens suivants : « Whole building » AND « LCA » AND « embodied carbon ». Cette phase d'acquisition a permis de consolider un corpus initial de 367 articles scientifiques uniques publiés entre 2017 et 2026.

Afin d'extraire de manière rigoureuse le matériau structurel principal de chaque étude, un algorithme de traitement du langage naturel (NLP) développé en Python a été appliqué au

corpus. Le script opère une analyse hiérarchique : il traite d'abord les titres et résumés (*abstracts*), puis scanne la section « Méthodologie » du texte intégral.

L'identification repose sur un dictionnaire sémantique spécialisé, dont voici quelques exemples de catégories :

- Bois (Mass Timber) : mass timber, CLT, cross-laminated, glulam, LVL, laminated veneer.
- Terre crue (Earth) : rammed earth, compressed earth, CEB, adobe, cob.

La fiabilité de l'identification est assurée par un paramètre de récurrence : un matériau n'est validé comme structurel que si les mots-clés associés présentent une densité critique et une redondance significative au sein de la zone technique de l'article, évitant ainsi les erreurs liées aux citations isolées.

Une attention particulière a été portée à la fidélité des données vis-à-vis des bâtiments réels étudiés :

- Désagrégation des données : Pour les études comparatives ou les articles portant sur des parcs immobiliers, le script a généré une entrée distincte pour chaque bâtiment ou scénario constructif analysé.
- Traitement de l'incertitude : Lorsqu'aucun matériau ne pouvait être identifié avec certitude malgré l'analyse du texte intégral, l'entrée a été classée comme « Non spécifiée » afin de ne pas biaiser les résultats.

À l'issue de ce processus, les 367 articles sources ont été fragmentés en 493 études de cas individuelles.

Pour réduire l'incertitude inhérente à l'automatisation, un protocole d'audit itératif a été mis en œuvre. Des lots de 100 entrées ont été extraits aléatoirement et soumis à une vérification croisée. L'algorithme a été affiné de manière itérative jusqu'à atteindre un taux d'erreur de 0 % sur un échantillon de 100 vérifications consécutives, garantissant la robustesse de la base de données finale.

Sur les 493 cas d'études générés, 231 entrées correspondent à des matériaux non spécifiés ou non identifiables. Le corpus exploitable se compose donc de 262 études de cas documentées où la méthode constructive a été isolée.

Bien que ces résultats ne prétendent pas à l'exhaustivité absolue de la littérature mondiale, ils offrent une base statistique pour identifier les tendances actuelles et orienter les choix de matériaux pour ce TFE.

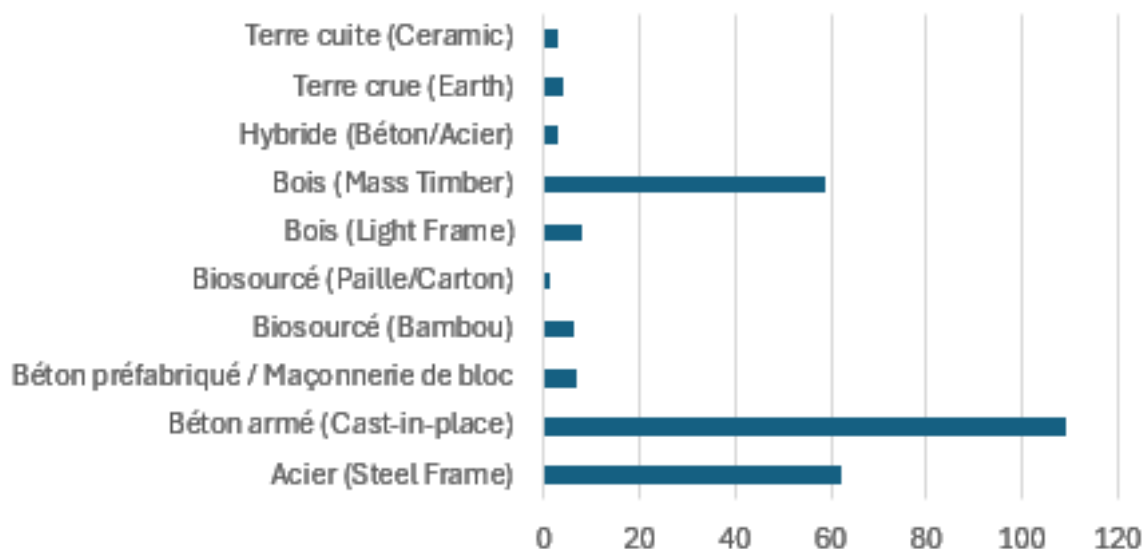


Fig. 4. Nombres d'articles scientifiques présentant une étude ACV avec le matériau.

L'analyse de ces données met en exergue une surreprésentation majeure du béton armé dans les études ACV, suivi de l'acier et du bois d'ingénierie (*Mass Timber*). Les autres typologies constructives (terre crue, maçonnerie, structures légères) restent encore marginalement documentées, soulignant un besoin de recherche accru pour ces alternatives décarbonées.

L'analyse systématique préliminaire de cette recherche démontre que le bois d'ingénierie s'impose aujourd'hui comme le système constructif alternatif le plus documenté, se positionnant immédiatement après le béton armé et l'acier. Ce constat statistique rejoint les conclusions de Mouton et al. (2023), qui identifient le bois structural comme l'une des ressources écosourcées les plus examinées par la communauté scientifique. La maturité de cette filière garantit la disponibilité de coefficients d'émissions standardisés. Par conséquent, l'utilisation d'une ossature bois en tant que ligne de base (SO) fournit un référentiel scientifiquement stable pour évaluer les performances relatives d'autres systèmes porteurs décarbonés.

À l'inverse, l'évaluation environnementale des typologies géosourcées souffre d'un déficit critique de données quantitatives. Les résultats de la présente analyse mettent en évidence que les structures en terre crue et en maçonnerie de terre cuite alvéolée restent marginalement documentées. Ce manque de représentativité est corroboré par une stagnation récente de la recherche axée sur l'ACV de ces matériaux (Cabeza et al., 2021). Cette asymétrie de l'information constitue un vide scientifique (*research gap*) majeur, entravant la prescription objective de ces matériaux lors de la phase d'esquisse. L'intégration de la terre crue et de la maçonnerie de terre cuite alvéolaire comme scénarios d'étude alternatifs répond donc directement à ce besoin de recherche. Elle vise à générer des données comparatives inédites pour ces typologies sous-étudiées, en les confrontant à un référentiel biosourcé déjà standardisé.

La suite de cet état de l'art, se concentre maintenant sur l'analyse de ces trois familles de matériaux : le bois d'ingénierie, la terre crue et la terre cuite alvéolaire. Pour chaque matériau, nous suivons une approche "en entonnoir", partant des propriétés fondamentales pour aboutir aux contraintes systémiques et aux lacunes de recherche identifiées dans la littérature scientifique actuelle.

2.9 Le Bois d'Ingénierie : Lamellé-Croisé (CLT)

2.9.1 Propriétés fondamentales et atout environnemental intrinsèque

Le bois est un matériau organique naturel dont l'usage dans la construction de bâtiments, de ponts et de diverses structures remonte à plusieurs siècles (Cabeza et al., 2021). Son application dans l'ingénierie est intrinsèquement liée au développement de la civilisation humaine (Li et al., 2022). Aujourd'hui, il demeure un matériau structural de premier plan grâce à l'amélioration constante des connaissances techniques qui permettent aux concepteurs de l'utiliser plus efficacement (Cabeza et al., 2021). Le bois est considéré comme un matériau courant, car ses possibilités d'application ainsi que les problématiques qui y sont liées sont désormais bien identifiées (Mouton et al., 2023).

Sur le plan technique, le bois se distingue par sa facilité de transport, de manipulation et son accessibilité, tout en offrant des propriétés intéressantes en termes d'isolation thermique, d'absorption acoustique et de résistance (Cabeza et al., 2021). Traditionnellement, les bâtiments de faible hauteur privilégiaient l'ossature légère (en bois ou en acier) ou la maçonnerie, tandis que les structures de moyenne hauteur s'orientaient vers le béton armé. Toutefois, l'impératif de durabilité a intensifié la volonté d'intégrer des produits en bois d'ingénierie dans ces deux typologies (Allan & Phillips, 2021).

L'émergence des produits bois de nouvelle génération, regroupés sous le terme de "bois massif" (*mass timber*), marque un tournant. Ces produits exploitent des déchets manufacturés ainsi que des bois de petit diamètre ou de qualité inférieure pour créer des solutions structurales polyvalentes et exceptionnellement résistantes (Duan et al., 2022). Contrairement aux constructions à ossature bois légère, où la descente de charge repose sur des montants individuels, l'utilisation de grands panneaux massifs permet de supporter des charges verticales très élevées tout en garantissant la rigidité et la robustesse de l'ouvrage (Frangi et al., 2008). Ces bois d'ingénierie, tels que le bois lamellé-croisé (CLT), le bois lamellé-placage (LVL) ou le bois lamellé-collé (*Glulam*), sont constitués de couches de bois ou de composites laminés ensemble (Migoni Alexandre et al., 2024). Dans un système constructif type, le CLT est privilégié pour les surfaces (murs, planchers, toitures) tandis que le *Glulam* est principalement utilisé pour les éléments linéaires tels que les poutres et les colonnes (Li et al., 2022).

D'un point de vue physique, les propriétés des essences utilisées, comme l'épicéa, présentent des densités moyennes exploitables de l'ordre de 420 kg/m³ pour une teneur moyenne en humidité de 11 % (Frangi et al., 2008). La caractérisation mécanique révèle une forte anisotropie : les modules de flexion peuvent varier d'un facteur 10 selon que l'on se place parallèlement (environ 10766 MPa) ou perpendiculairement aux fibres (Li et al., 2022). En outre, si le bois présente une rupture ductile lors des essais de compression axiale, il affiche un comportement fragile en traction axiale, offrant toutefois une résistance ultime supérieure dans ce dernier cas (Li et al., 2022).

L'atout environnemental majeur du bois réside dans sa capacité de séquestration du carbone. Par le mécanisme de la photosynthèse, le bois convertit le CO₂ atmosphérique en biomasse

durant sa croissance (Arehart et al., 2021). Tant que les produits sont issus de forêts gérées de manière responsable, ils agissent comme des puits de carbone en stockant efficacement celui-ci au sein des composants structurels du bâtiment (Hemmati et al., 2024). Cette capacité conduit souvent la littérature à qualifier le bois de "neutre en carbone" (Allan & Phillips, 2021). Dans un cadre d'ACV rigoureuse, l'absorption de CO₂ biogénique est enregistrée comme une émission négative lors de la phase de production, tandis que son rejet est comptabilisé comme une émission positive en fin de vie (Mouton et al., 2022).

2.9.2 Limites dimensionnelles et panneau surfacique (CLT)

Malgré ses qualités, l'usage du bois scié traditionnel rencontre des limites pour les constructions urbaines multi-étages. Le système constructif en CLT a été conçu pour lever ces contraintes de dimensionnement (Younis & Dodoo, 2022). En croisant les plis de fibres à 90°, l'orthogonalité des plis permet de répartir la rigidité et la résistance dans toutes les directions, annulant ainsi les effets de l'anisotropie naturelle (Li et al., 2022). Cette configuration permet d'obtenir un voile structurel comparable à un mur en béton armé, capable de répondre aux exigences de contreventement. Toutefois, cette massivité impose de nouveaux défis réglementaires, notamment encadrés par l'Eurocode 5 (Frangi et al., 2008). Lors d'un incendie, une couche de carbonisation se forme sur les surfaces exposées ; l'épaisseur de cette couche augmente progressivement, réduisant ainsi la section efficace du membre structurel (Frangi et al., 2008). Cette "épaisseur sacrificielle" doit être intégrée dans le calcul de la résistance au feu. Par ailleurs, la faible densité relative du bois pose des défis acoustiques. Pour satisfaire aux exigences de confort et de vibrations, il est fréquent de devoir ajouter une chape de béton léger (environ 51 mm) sur les planchers en CLT, ce qui alourdit le bilan environnemental global (Allan & Phillips, 2021).

2.9.3 Le paradoxe de la massivité et l'impératif d'optimisation matérielle

L'adoption de solutions massives (CLT) pour réduire le carbone opérationnel soulève un paradoxe environnemental majeur : celui du transfert d'impact. Bien que les matériaux biosourcés séquestrent du carbone, leur mise en œuvre intensive peut dégrader d'autres indicateurs environnementaux, tels que l'occupation des sols ou l'écotoxicité, en raison de l'emprise territoriale nécessaire à la foresterie industrielle (Brahma et al., 2024 ; Navaro Auburtin et al., 2024). Sur le plan industriel, la pénalité énergétique du CLT en phase A3 est significative : la résine adhésive peut représenter jusqu'à 30 % du potentiel de réchauffement global (GWP) du CLT, tandis que le séchage en four consomme d'importantes quantités d'énergie grise (Duan et al., 2022 ; Cabeza et al., 2021).

Face au risque de surconsommation de la ressource forestière, la recherche souligne l'urgence de développer des stratégies de « dimensionnement juste » (*downsizing*). Il s'agit de rompre avec la perception du bois comme une solution miracle justifiant un usage extensif, pour se

concentrer sur une utilisation plus judicieuse et moins massive de la matière (Arehart et al., 2021 ; Duan et al., 2022).

Actuellement, la déconnexion entre les choix architecturaux et les métriques de performance environnementale en temps réel freine l'optimisation concrète des structures en bois (Souaid et al., 2024 ; Navaro Auburtin et al., 2024 ; Bacheva et al., 2025). Sans un retour d'information dynamique durant la modélisation, le risque de « verrouillage carbone » (*carbon lock-in*) est réel, les outils complexes n'intervenant souvent qu'après que les décisions structurelles majeures ont été figées (Shi et al., 2025). L'enjeu est donc d'identifier, le point d'équilibre optimal entre réduction de la masse et performance carbone pour éviter tout gaspillage de la ressource (Souaid et al., 2024).

Cependant, si le bois massif répond aux défis de la densité urbaine par sa légèreté et sa séquestration carbone, d'autres approches géosourcées privilégient la minimisation radicale de l'énergie de transformation par l'usage monolithique de la terre crue.

2.10 La Terre Crue : la Brique de Terre Compressée (BTC)

2.10.1 Potentiel de décarbonation et comportement mécanique fondamentale

En réponse à l'urgence climatique, la terre crue s'impose comme une alternative crédible grâce à un potentiel de réchauffement global (GWP A1-A3) quasi nul, résultant de l'absence de cuisson industrielle. Ce matériau géosourcé regroupe plusieurs techniques ancestrales qu'il convient de distinguer (Arduin et al., 2022). L'adobe, technique la plus simple et ancienne, consiste en un mélange de terre et d'eau moulé sans compactage et séché au soleil. Le bauge (*cob*), quant à lui, intègre de la paille pour ériger des murs porteurs par stratification successive de couches humides. Le pisé, plus dense, utilise une terre humide compactée à l'intérieur de coffrages. Enfin, la brique de terre compressée (BTC) représente la variante la plus industrielle, fabriquée par compression mécanique ou hydraulique au sein d'une presse (Arduin et al., 2022).

D'un point de vue physique, la terre crue est un matériau massif dont la densité sèche varie généralement entre 1750 et 2200 kg/m³ (Ávila et al., 2021). Bien qu'elle affiche une résistance en compression relativement faible, située entre 1,0 et 2,5 MPa (Ávila et al., 2021 ; Cabeza et al., 2021), sa capacité thermique massique lui confère un rôle de "réservoir de chaleur" capable de réguler les variations de température intérieure plus efficacement que certains isolants conventionnels (Ávila et al., 2021 ; Zhang et al., 2024). Cependant, comme beaucoup de matériaux terreux, elle présente une résistance très faible en traction et en cisaillement, avec un comportement unilatéral fragile qui exclut son utilisation pour des éléments sollicités purement en traction (Ávila et al., 2021 ; Cabeza et al., 2021). Son usage porteur traditionnel est ainsi principalement limité par sa difficulté à répondre aux exigences architecturales contemporaines, poussant son utilisation vers des applications structurelles uniquement en compression (Zhang et al., 2024).

2.10.2 Vulnérabilité hygrothermique et limites des techniques traditionnelles

La performance de la terre crue est intrinsèquement liée à sa teneur en eau. Une augmentation de l'humidité, même légère (de 0,0 % à 4,2 %), peut entraîner une chute de 75 % de sa résistance au cisaillement (Ávila et al., 2021). Dans certains cas, les briques non stabilisées perdent totalement leur intégrité structurelle lors d'une immersion (Bogas et al., 2018). Cette sensibilité aux cycles de mouillage-séchage engendre une érosion et un affaiblissement progressif des parois (Zhang et al., 2024).

Ces limites physiques se traduisent par des contraintes géométriques majeures : les constructions résidentielles en terre dépassent rarement les 6 mètres de hauteur et nécessitent des épaisseurs de parois considérables, variant de 30 à 60 cm pour le pisé (Zhang et al., 2024 ; Ávila et al., 2021). Au-delà de ces freins physiques, la filière souffre d'un manque de connaissances consolidées et d'une hétérogénéité des sols selon leur origine géographique, ce qui empêche toute standardisation universelle (Bogas et al., 2018). La littérature scientifique appelle ainsi à la mise en place de protocoles de test standardisés pour rendre les études comparables et favoriser des applications plus larges (Ávila et al., 2021 ; Zhang et al., 2024).

2.10.3 La solution industrielle : La Brique de Terre Compressée (BTC) et les stratégies de protection

Pour lever les verrous réglementaires et favoriser l'adoption du matériau à grande échelle, l'industrie s'est tournée vers la BTC. L'application d'une contrainte de compactage élevée (de 5 à 20 MPa) permet d'augmenter la résistance en compression de près de 70 %, atteignant des valeurs moyennes de l'ordre de 9,0 MPa (Bogas et al., 2018 ; Teixeira et al., 2020). Au-delà de ces performances mécaniques, l'intérêt majeur de la BTC réside dans son format modulaire standardisé, qui permet de mobiliser le savoir-faire et la main-d'œuvre déjà existants des maçons traditionnels, facilitant ainsi son intégration sur les chantiers contemporains (Teixeira et al., 2020).

Cependant, l'usage de stabilisants chimiques pour garantir la durabilité face à l'eau est au cœur d'un débat environnemental. L'ajout de ciment peut représenter jusqu'à 95 % du GWP total d'une brique (dont 75 % pour le ciment seul et 20 % pour la chaux), annulant ainsi l'intérêt écologique initial du matériau (Arduin et al., 2022). Même à des dosages plus faibles, le ciment est responsable de plus de 50 % des émissions A1-A3 du bloc stabilisé (Arduin et al., 2022). Il est toutefois essentiel de noter que la stabilisation n'est pas une nécessité absolue : l'usage de BTC non stabilisées est possible si la conception architecturale intègre des stratégies de protection « défensives ». Cela inclut notamment des débords de toiture généreux pour protéger les parois de l'exposition directe à la pluie et la mise en œuvre de parois perspirantes permettant une régulation naturelle de l'humidité interne (Ávila et al. 2021 ; Bogas et al. 2018 ; Zhang et al., 2024). Face à ce constat, des recherches explorent également l'utilisation de sous-

produits industriels (laitier, cendres volantes, phosphogypse) ou de fibres biosourcées pour renforcer la terre sans sacrifier son bilan carbone (Zhang et al., 2024 ; Arduin et al., 2022).

2.10.4 Le fardeau de la masse

Le principal verrou de la terre crue réside dans sa dimension logistique. En raison de la masse considérable nécessaire, le transport de la matière première représente plus de 80 % de l'impact environnemental dans toutes les catégories pour le module A2 (Fernandes et al., 2019 ; Arduin et al., 2022). Cette masse exerce également une charge critique sur les fondations, lesquelles peuvent contribuer jusqu'à 40 % des émissions totales de GWP pour un bâtiment de 12 étages (Allan & Phillips, 2021). De plus, pour obtenir une performance thermique équivalente (U-Value) à une paroi de briques creuses de 26 cm, un mur en pisé nécessite une épaisseur de 60 cm (Fernandes et al., 2019). Une comparaison de l'émission carbone sur une base équivalente à l'échelle du bâtiment devient nécessaire entre les différentes solutions de principes constructifs (Feickert & Mueller, 2025 ; Arduin et al., 2022).

2.11 La Terre Cuite : La brique monomur alvéolaire (BMA)

2.11.1 Propriétés inhérentes et paradoxe thermo-structurel de la terre cuite

La brique de terre cuite demeure un matériau de construction dominant à l'échelle mondiale en raison de son faible coût et de sa simplicité de production (Olsson et al., 2025). Constituées de blocs modulaires liés par du mortier, les parois de maçonnerie sont structurellement efficaces en compression (Asdrubali et al., 2023). L'argile, travaillée à une consistance plastique, permet de façonner une grande variété de produits, tels que des briques pleines, creuses ou des blocs alvéolaires (Asdrubali et al., 2023). La résistance en compression de ces éléments est remarquable, variant typiquement de 20 à 40 MPa pour une brique d'habitation commune, et pouvant atteindre 100 MPa pour des produits de haute qualité (Shibib et al., 2013).

Cependant, cette performance structurelle est indissociable d'un impact environnemental significatif lors de la production. La cuisson des matières premières, réalisée à des températures comprises entre 800 °C et 2000 °C, constitue le processus le plus impactant, représentant avec le séchage jusqu'à 87 % de l'énergie totale employée (Asdrubali et al., 2023). Ces phases sont responsables de la majorité des émissions de CO₂ et peuvent engendrer des impacts nocifs sur l'environnement (Dabaieh et al., 2020). Les parois en briques pleines et creuses conventionnelles ne parviennent souvent pas à respecter les exigences thermiques légales minimales sans l'ajout de couches d'isolation supplémentaires, en raison du comportement

fragile du matériau et de la forte conductivité thermique de l'argile dense (environ 0,90 W/m·K pour une densité de 2400 kg/m³) (Fioretti & Principi, 2014 ; Shibib et al., 2013).

2.11.2 La brique monomur alvéolaire (BMA) : Efficacité carbone par l'intégration de l'isolation

C'est précisément pour lever ce verrou que l'innovation géométrique a conduit au bloc alvéolaire haute performance. En densifiant le réseau de cavités, le système alvéolaire transforme la maçonnerie en un mur composite auto-isolant (Kandhan & Jeevanantham, 2022). L'optimisation de la configuration des alvéoles, parfois remplies d'isolant, réduit les échanges thermiques radiatifs au sein des vides (Fioretti & Principi, 2014 ; Kandhan et al., 2022). Cette diminution de la conductivité thermique équivalente λ_{eq} dépend alors de l'épaisseur du bloc et de la configuration de ses parois internes (Ahmad & Al-Hadhrami, 2009).

Sur le plan environnemental, ce passage du plein à l'alvéolaire est probant. En comparant deux systèmes de parois courantes non isolées, l'étude de Maithel (2023) démontre qu'un mur de 150 mm en blocs creux permet, grâce à la réduction de matière, de générer une économie de 55 % des émissions de CO₂ par rapport à un mur traditionnel de 230 mm en briques pleines. De plus, malgré sa plus faible épaisseur, la paroi alvéolaire offre une meilleure performance thermique grâce aux alvéoles d'air emprisonnées dans les blocs (Maithel, 2023). Les parois en briques alvéolaires présentent ainsi souvent les impacts moyens les plus faibles tant pour le réchauffement global que pour la consommation d'énergie primaire en phase A1-A3 (Asdrubali et al., 2023 ; Maithel, 2023)..

2.12 Comparaison d'une typologie structurelle en voiles continues

Pour que l'évaluation environnementale comparative soit rigoureuse et exempte de biais géométriques, il est impératif de définir une typologie structurelle commune afin de rendre pertinente la comparaison. L'étude propose de faire varier le matériau de voiles structurels entre le CLT, la BTC et les briques alvéolaires afin de comparer leur impact carbone.

La validité scientifique d'une étude comparative exige l'établissement d'une stricte équivalence fonctionnelle entre les différentes alternatives modélisées (Gervásio & Dimova, 2018). Comparer un mur maçonné en terre avec un système en portiques (poteaux-poutres) ou une ossature légère en bois, invalideraient la comparaison à cause des variations des parcours de charges et de la trame spatiale. Pour isoler l'impact carbone réel de la substitution matérielle, l'évaluation doit s'effectuer à une échelle globale avec des portées et des principes de distribution de charges alignés (Feickert & Mueller, 2025). Il est donc nécessaire d'imposer le comportement en "voile continu" à toutes les variantes évaluées.

Afin de satisfaire cette exigence d'équivalence structurelle, le bois lamellé-croisé (CLT) est sélectionné comme scénario de référence biosourcé (SO). En agissant mécaniquement comme un voile bidirectionnel, le CLT reproduit la logique de descente de charges d'un mur en maçonnerie de terre crue ou cuite (Frangi et al., 2008).

La nécessité d'évaluer des voiles porteurs structurellement équivalents exige au préalable de définir un cadre géométrique objectif. Pour éviter les biais inhérents aux modélisations purement théoriques, l'ancrage des évaluations environnementales dans une réalité architecturale constitue un prérequis méthodologique (Mouton et al., 2024). La littérature scientifique préconise l'adoption d'approches ascendantes (*bottom-up*), qui s'appuient sur l'évaluation de bâtiments réels représentatifs ou d'archétypes afin de refléter fidèlement les contraintes et les pratiques actuelles de l'industrie (Mouton et al., 2022). L'utilisation d'un cas d'étude préexistant fournit ainsi une volumétrie, des portées et des contraintes spatiales standardisées. Isoler rigoureusement l'impact de la substitution matérielle des voiles porteurs exige une évaluation menée à l'échelle globale du bâtiment (Feickert & Mueller, 2025). La modification d'un système constructif engendre des répercussions mécaniques et thermiques en cascade sur les autres composants de l'ouvrage pour maintenir une stricte équivalence fonctionnelle et prendre en compte les transferts d'impacts inter-éléments (Arduin et al., 2022 ; Souaid et al., 2024).

2.13 La loi de MacLeamy

La capacité d'atténuation des impacts environnementaux est maximale durant les phases initiales de conception (Shi et al., 2025). Cette dynamique, conceptuellement associée à la loi de MacLeamy, démontre que les choix matériels initiaux verrouillent l'empreinte carbone globale (Bacheva & Raposo Grau, 2025).

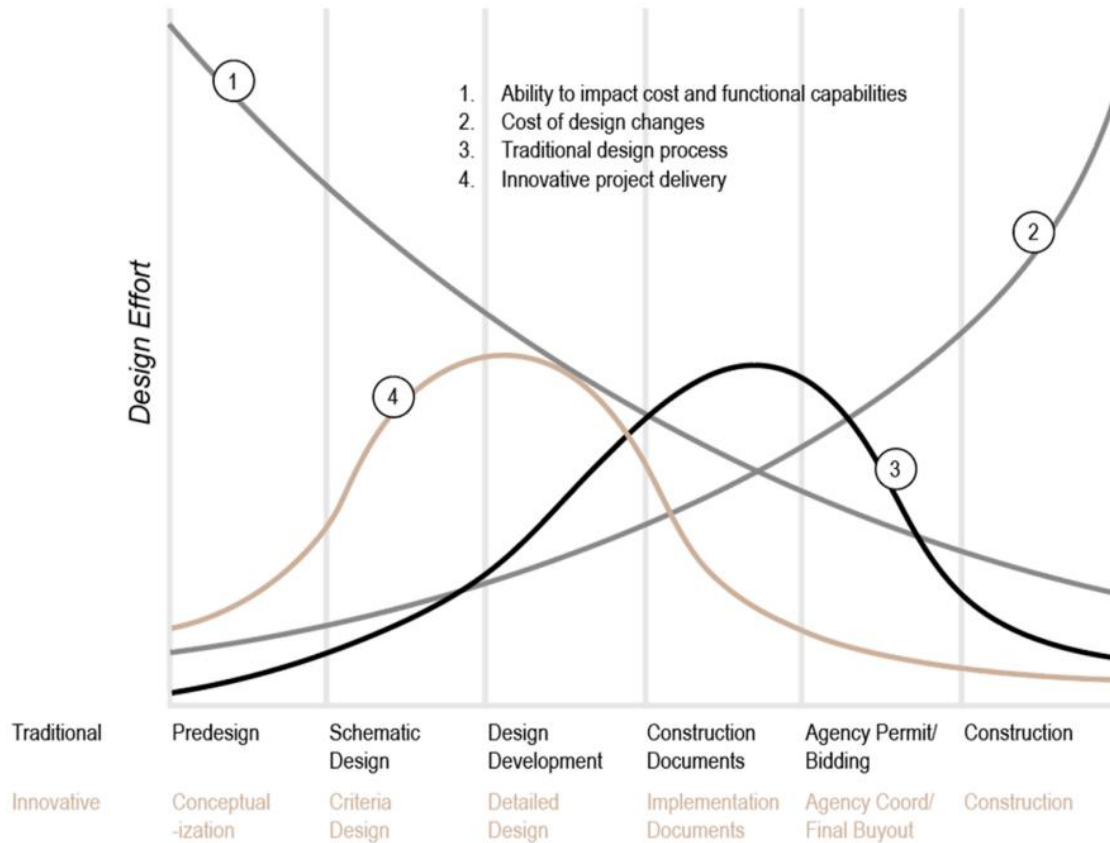


Fig 5. Courbe améliorée de MacLeamy (Helmrich et al., 2025)

La courbe de MacLeamy démontre que la capacité d'influencer les performances fonctionnelles de l'ouvrage est maximale lors des phases initiales, là où l'effort de conception génère le plus de bénéfices pour un coût de mise en œuvre contenu (Helmrich et al., 2025). À l'inverse, si des modifications structurelles interviennent tardivement, la complexité et le coût des changements augmentent de manière exponentielle. Cette dynamique crée un effet de verrouillage (*lock-in*) : les choix de géométrie et de structure pris en esquisse figent la majorité des impacts environnementaux sur tout le cycle de vie, bien avant le début du chantier (Bacheva & Raposo Grau, 2025). En intégrant l'évaluation du carbone dès les premières étapes, il devient possible de limiter proactivement les volumes de matériaux et d'optimiser les systèmes constructifs, constituant ainsi le levier de décarbonation le plus efficace de la pratique architecturale (Tigani et al., 2024).

2.14 Apport du design paramétrique

L'exploitation de la marge de manœuvre décisionnelle dictée par la loi de MacLeamy requiert des outils d'évaluation environnementale agiles. L'intégration de la conception paramétrique offre une réponse technique pertinente à cette contrainte temporelle. Ces environnements algorithmiques estiment l'empreinte carbone dès la phase d'esquisse (Shi et al., 2025). Le concepteur dépasse ainsi l'évaluation post-conception pour adopter une approche d'atténuation proactive dans lequel l'ACV s'intègre (Navaro Auburtin et al., 2024)

La conception paramétrique repose sur des algorithmes pour générer dynamiquement des modèles architecturaux. Des plateformes de programmation visuelle, telles que Grasshopper, traduisent les objets physiques en variables mathématiques interconnectées (Navaro Auburtin et al., 2024). Cette méthode décompose l'ouvrage en une hiérarchie stricte de composants et de données matérielles (Mouton et al., 2023). La modification d'un seul paramètre d'entrée actualise l'ensemble du système géométrique et informationnel (Mouton et al., 2023).

Cette automatisation facilite l'exploration systématique de multiples itérations de conception. Le processus algorithmique maintient des exigences fonctionnelles et spatiales constantes entre les scénarios évalués (Mouton et al., 2023). L'intégration de solveurs physiques permettent aux concepteurs de générer des bases de données synthétiques d'alternatives strictement viables structurellement (Feickert & Mueller, 2025). Cette structuration de l'information assure une compréhension et la sensibilité globale des paramètres et des impacts pour chaque décision (Souaid et al., 2024).

L'évaluation de ces nombreuses variantes implique la résolution d'objectifs de performance contradictoires. La minimisation du carbone incorporé s'oppose fréquemment à l'augmentation des portées ou à la réduction de la masse (Shi et al., 2025). L'utilisation d'algorithmes génétiques d'optimisation multicritère permet de converger vers des solutions rationnelles. Ils identifient les points d'équilibre optimaux pour construire un front de Pareto, objectivant ainsi la décision finale (Shi et al., 2025).

2.15 Analyse multicritères

L'interprétation des solutions d'équilibre exige de dépasser la stricte évaluation du carbone incorporé. L'applicabilité industrielle des résultats d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) se heurte fréquemment aux contraintes budgétaires des projets. Le secteur de la construction perçoit généralement les structures à faible impact comme intrinsèquement plus onéreuses à livrer (Bacheva & Raposo Grau, 2025). Par conséquent, l'évaluation environnementale requiert un couplage systématique avec l'Analyse des Coûts du Cycle de Vie (LCC). Cette méthode garantit l'évaluation exhaustive de la viabilité économique des diverses variantes de conception (Shi et al., 2025). L'adoption d'un cadre d'analyse triangulaire, articulant la conception technique, les paramètres financiers et les contraintes environnementales, s'impose pour générer des alternatives constructives viables (Kayaçetin et al., 2023).

L'opérationnalisation de cette démarche holistique repose sur l'évolution des environnements paramétriques. L'innovation logicielle doit prioriser une intégration multi-domaine fusionnant la modélisation géométrique, la performance opérationnelle et les bases de données économiques et carbone (Bacheva & Raposo Grau, 2025). La structuration croisée de ces informations quantifie objectivement les répercussions de chaque variation matérielle sur l'ensemble de l'ouvrage. L'évaluation comparative des systèmes structurels permet de cartographier scientifiquement les compromis du projet (Bacheva & Raposo Grau, 2025). L'outil paramétrique fournit ainsi aux praticiens un spectre de solutions rationnelles, assurant l'applicabilité directe des stratégies de décarbonation sur le marché réel.

2.16 Conclusion de l'état de l'art

En conclusion, la revue de la littérature a permis de clarifier les questions de recherche en lien avec les “research gaps” actuels de la littérature scientifique (voir point 1.6) et a posé les fondements méthodologiques de l'approche paramétrique au travers des choix structurants suivants :

- La restriction de l'analyse environnementale au carbone initial (étapes A1 à A5 de l'ACV), permettant de quantifier l'impact direct de la production et de la mise en œuvre, tout en évitant les incertitudes liées aux scénarios de fin de vie.
- Le couplage systématique entre le choix des matériaux et l'optimisation géométrique, afin d'agir sur le carbone incorporé dès les phases amont de la conception.
- L'application d'une équivalence fonctionnelle rigoureuse conforme à la norme EN 15978, le système structurel vertical étant évalué dans sa globalité pour garantir la comparabilité technique des alternatives.
- Une évaluation multicritère intégrée, croisant simultanément les émissions de gaz à effet de serre, le coût économique et la masse globale de la structure.
- La focalisation sur les voiles porteurs du gros œuvre, éléments structuraux majeurs et représentatifs de l'ossature verticale.
- La sélection de trois variantes éco-sourcées de référence, issues d'une collecte personnelle et d'une analyse systémique : le bois lamellé-croisé (CLT), la brique de terre cuite alvéolaire et le bloc de terre comprimée (BTC).

3. Méthodologie

3.1 Introduction

En s'appuyant sur l'état de l'art, cette étude propose une transition d'une évaluation carbone rétrospective (souvent réalisée en fin de projet lorsque les décisions sont verrouillées) vers une démarche d'aide à la décision dès la phase d'esquisse. La méthodologie repose sur la comparaison environnementale et économique de trois modes constructifs de voiles porteurs : le bois lamellé-croisé (CLT), les blocs de terre compressée (BTC) et les blocs de terre cuite alvéolaire. L'évaluation s'appuie sur la méthode de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) et sur le principe d'équivalence fonctionnelle des structures.

Afin de simuler le processus de conception, la modélisation prend appui sur l'environnement paramétrique Rhinoceros-Grasshopper, qui permet de générer une multitude de variantes géométriques en agissant sur des paramètres d'esquisse (Shi et al., 2025 ; Navaro Auburtin et al., 2024). Chaque variante est automatiquement pré dimensionnée via le plug-in Karamba3D, selon la logique de screening structurel proposée par Feickert & Mueller (2025), puis évaluée sur le plan de l'impact carbone, du coût et des volumes de matériaux. Le protocole de recherche s'inscrit ainsi à la croisée de trois stratégies complémentaires : l'analyse paramétrique multi-objectif, le dimensionnement automatisé en phase d'esquisse et la comparaison environnementale par variation géométrique. L'originalité de ce travail réside dans la synthèse de ces approches et dans son application spécifique à la comparaison de voiles porteurs en matériaux bio & géo sourcés pour identifier leurs domaines d'efficacité (Moncaster et al., 2018 ; Schneider et al., 2025). Afin d'évaluer la robustesse des comparaisons, des analyses de sensibilité ciblées sont menées sur la nature de l'isolant, aux distances d'approvisionnement des matériaux et l'impact du carbone biogénique. Enfin, la recherche des meilleures configurations s'appuie sur une analyse exhaustive multi-objectif, permettant d'extraire des fronts de Pareto (Shi et al., 2025 ; Wang et al., 2020).

Schéma récapitulatif méthodologique

Voici une récapitulation de la démarche méthodologique en un schéma synthèse. On peut résumer cette démarche en 6 points majeurs :

- Le choix et l'utilisation d'un cas d'étude réel simplifié pour une utilisation paramétrique,
- Une documentation technique sur le comportement mécanique, l'impact carbone et le coût des matériaux et mode constructif sélectionnée.
- Une modélisation sous le logiciel de simulation Rhinoceros-Grasshopper comprenant la géométrie, le prédimensionnement grâce au plugin Karamba 3D et une calibration du modèle.
- Une implémentation des données des matériaux au sein d'un processus de simulation afin de simuler les matériaux, et calculer leur impact carbone et monétaire.
- La mise en place d'un algorithme exhaustifs afin de calculer l'ensemble des solutions du champ d'étude grâce au plugin Anemone.
- Trois analyses des résultats successives, une analyse comparative, une analyse de sensibilité et une analyse multicritère. Enfin une interprétation de ces résultats au sein d'une partie discussion.

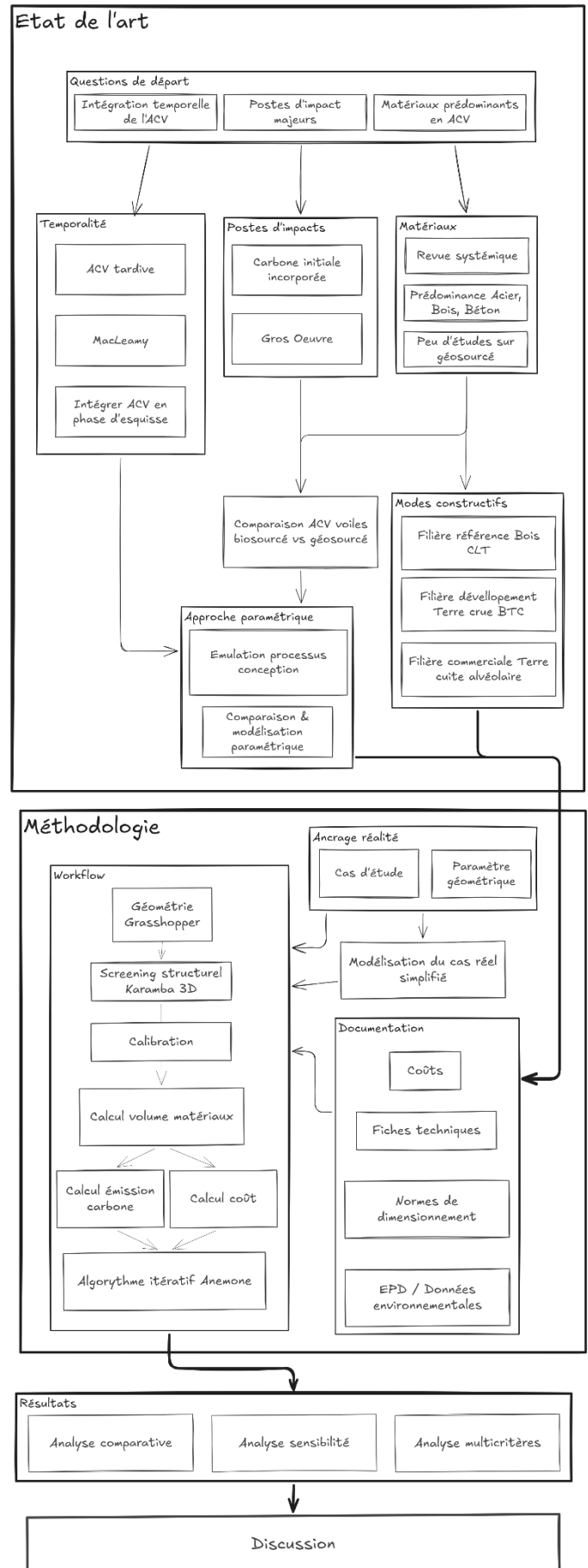


Fig 6. Schéma méthodologique récapitulatif

3.2 Cadrage & hypothèses

3.2.1 Choix du cas d'étude

Pour asseoir cette recherche sur des bases constructives réalistes, la méthodologie s'appuie sur un cas d'étude réel fourni par une entreprise de construction, plutôt que sur un modèle géométrique défini arbitrairement. Le but de cette démarche n'est pas d'effectuer une analyse de cycle de vie statique et exhaustive du bâtiment tel que construit, mais d'utiliser ce projet comme un point d'ancrage pour développer un modèle paramétrique adapté à la phase d'esquisse. En effet, en phase amont, il est nécessaire de simplifier les géométries en éliminant les composants non structurels et invariants (Mena, 2020) afin de se concentrer sur la structure primaire (Feickert & Mueller, 2025). Le modèle est donc une version simplifiée du cas réel, soumise à des variations géométriques contrôlées (Di Santo et al., 2023).

La recherche de ce cas d'étude auprès d'une entreprise a été spécifiquement orientée vers un bâtiment s'inscrivant dans le domaine d'application logique des matériaux étudiés (CLT, blocs de terre compressée BTC, maçonnerie alvéolaire de terre cuite). Les critères de recherche ont été les suivants :

- Présence d'un système porteur en voiles verticaux
- Trame structurelle régulière
- Nombre d'étages ne dépassant pas R+3
- Géométrie simple pour ne pas complexifier la modélisation
- Pas de façade rideau et ratio d'ouverture modéré

Le bâtiment sélectionné remplit exactement ces conditions de cadrage. C'est un hôtel de ville, faisant l'objet d'un projet de restructuration et d'extension administrative. Dans cette étude l'analyse se concentre sur l'extension qui se développe sur 2 ou 3 niveaux comprenant ponctuellement un sous-sol, puis 2 niveaux jusqu'au R+1 et une toiture plate. Elle est composée d'une trame régulière de 5.5m qui suit le bâtiment sur 2 axes perpendiculaires reliés par une jonction oblique. Le système porteur vertical combine des voiles porteurs en blocs de terre cuite alvéolaire en façades et des poteaux en lamellés-collés en intérieur. Ces appuis verticaux supportent des planchers légers composés d'un gîtage bois et d'une dalle en CLT. Enfin, le plancher bas du R+0, est composé d'un radier en béton armé.

L'utilisation de ce cas réel remplit deux fonctions méthodologiques. Premièrement, elle permet d'extraire des hypothèses de charges mécaniques réelles et conformes aux Eurocodes (charges d'exploitation et charges permanentes), garantissant que le dimensionnement repose sur des conditions de sollicitation réalistes (Tecchio et al., 2018). Deuxièmement, le bâtiment réel sert de base de calibration pour l'outil de screening structurel développé dans Grasshopper. En simulant la structure avec les mêmes matériaux et la même géométrie que le projet réel, nous pouvons comparer le dimensionnement obtenu automatiquement par le script avec celui réellement validé par le bureau d'études du constructeur. Ce processus de calibration permet de vérifier la validité de l'outil de calcul et de s'assurer qu'il fournit des épaisseurs et des volumes réalistes avant d'étendre les simulations à d'autres matériaux et à des variations géométriques (Feickert & Mueller, 2025).

3.2.3 Choix trame structurelle

Afin de mener à bien l'optimisation paramétrique multi-objectif sans se heurter à des temps de calcul trop long, l'évaluation environnementale et mécanique se concentre sur une trame structurelle unitaire isolée et représentative du bâtiment.

Cette modélisation physique d'une trame représentative constitue une approche différente des benchmarks surfaciques globaux. En effet, là où les ratios classiques au m² peinent à capturer les effets d'échelle non-linéaires des structures spatiales (Weber et al., 2021), l'évaluation paramétrique d'une trame représentative permet d'ajuster les choix constructifs directement selon les paramètres géométriques influents sur le carbone incorporé (Weber et al., 2021). Cette échelle d'étude fournit ainsi des bases d'évaluation claires pour arbitrer entre efficacité mécanique, coût et durabilité selon les contraintes géométriques testées (Paknahad et al., 2026).

Bien que l'exclusion d'éléments invariants limite la représentativité des émissions absolues du bâtiment complet (Souaid et al., 2024), ce choix est cohérent avec une étude comparative visant à identifier des ordres de grandeur et des tendances de sensibilité environnementale sous contraintes géométriques variables.

Pour garantir la représentativité physique de la trame isolée, son périmètre est délimité d'axe en axe. Cette convention est la méthode standard en ingénierie des structures pour définir les surfaces et largeurs contributives agissant sur les éléments porteurs (Navaro Auburtin et al., 2024). Elle est systématiquement appliquée dans les études comparatives de systèmes de planchers, où les axes de la grille de colonnes forment les frontières du modèle structurel (Paknahad et al., 2026).

3.2.4 Choix des paramètres géométriques

Le plan d'expériences s'articule autour de quatre paramètres géométriques majeurs dont la variation régit directement le comportement mécanique (stabilité) et l'impact environnemental (volumes de matière) de la trame :

1. La portée : C'est le paramètre le plus influent sur le volume des dalles et des planchers. Les moments de flexion augmentant avec le carré de la portée, chaque incrément de portée exige des épaisseurs de dalles ou des sections de solives accrues, entraînant une hausse quadratique du carbone incorporé (Feickert & Mueller, 2025 ; Navaro Auburtin et al., 2024).
2. Le nombre de niveaux : Ce paramètre régit l'accumulation des charges gravitationnelles vers la base du bâtiment. Plus le nombre d'étages est élevé, plus les efforts de compression appliqués sur les voiles porteurs du rez-de-chaussée sont importants, influençant de fait leur dimensionnement et le report sur les fondations (Navaro Auburtin et al., 2024).
3. La hauteur sous plafond : Contrairement aux structures à portiques métalliques ou en béton où la masse des colonnes est jugée négligeable (Navaro Auburtin et al., 2024), la hauteur d'étage est une variable critique pour des voiles porteurs massifs (comme la

terre crue/BTC ou la maçonnerie de terre cuite). Elle détermine la longueur de flambement des parois verticales. Une augmentation de la HSP accroît l'élancement des voiles, ce qui déclenche des risques d'instabilité par flambement (Eurocode 6) et impose une augmentation de leur épaisseur, augmentant de manière non linéaire le volume de matière et l'impact environnemental (Navaro Auburtin et al., 2024).

4. Le ratio de vitrage (WWR) : Le *Window-to-Wall Ratio* influe à la fois sur le confort d'été et l'éclairage naturel des locaux (Shi et al., 2025). D'un point de vue structurel, un WWR élevé réduit la longueur linéaire de voile opaque disponible pour reprendre les charges verticales et horizontales, augmentant la concentration des contraintes dans les trumeaux de maçonnerie. Enfin, comme les fenêtres représentent un poids carbone disproportionné par rapport au reste de la façade (Mouton et al., 2024), faire varier ce paramètre permet d'analyser son effet de masquage sur la performance carbone des parois opaques.

3.2.5 Equivalence fonctionnelle

Pour assurer une étude comparative fiable, il est essentiel d'assurer une équivalence fonctionnelle stricte entre les différents scénarios comme expliqué dans la partie 2.5 de l'état de l'art (Feickert & Mueller, 2025 ; Gervásio & Dimova, 2018). Ce concept définit le cahier des charges technique et dimensionnel que chaque alternative doit satisfaire pour rendre la comparaison pertinente (Gervásio & Dimova, 2018). Par conséquent, la modélisation paramétrique développée dans cette méthodologie impose des contraintes mécaniques et thermiques à tous les modes constructifs pour chaque scénario géométrique permettant d'isoler l'impact environnemental de la substitution matérielle tout en prenant en compte ses répercussions en cascade sur l'ensemble du bâtiment (Arduin et al., 2022).

3.2.5.1 Biais Spatial

L'ACV des bâtiments mesure les émissions par unité fonctionnelle généralement par mètre carré de surface brute (Gross floor area GFA). Cependant, cette métrique engendre une distorsion lors de la comparaison de différents systèmes constructifs. Les systèmes massifs, comme la terre crue, exigent des murs nettement plus épais que les solutions légères en bois lamellé-croisé (CLT) pour atteindre une performance équivalente (Fernandes et al., 2019 ; Schneider et al., 2025). Si l'analyse fixe la GFA comme constante, cette surépaisseur réduit la surface nette (Net floor area NFA) réellement utilisable par l'occupant. Le bilan carbone au mètre carré GFA ne prend pas en compte cette perte d'espace. Inversement, si l'analyse fixe la NFA, le bâtiment en terre crue génère une GFA plus grande. La division des émissions par cette GFA élargie dilue mathématiquement l'impact surfacique du matériau lourd. Dans les deux cas, l'usage du mètre carré GFA masque la réalité physique et fausse la comparaison (Mouton et al., 2024).

La maîtrise de l'empreinte spatiale absolue constitue un levier de décarbonation. La réduction de la surface construite totale reste la stratégie la plus efficace pour limiter les émissions

environnementales (Röck et al., 2020). De plus, l'empreinte carbone d'un bâtiment ne diminue pas proportionnellement à sa taille (Souaid et al., 2024). Diviser la surface d'un logement par deux ne divise donc pas ses émissions par deux, car certains éléments constructifs de base restent indispensables (Souaid et al., 2024). Par conséquent, la comparaison environnementale des modes constructifs doit impérativement s'effectuer à surface intérieure exploitable identique pour neutraliser ces distorsions géométriques.

Cette méthodologie fixe la surface nette (NFA) comme constante de l'unité fonctionnelle pour les analyses de comparaison et de sensibilité (Duan et al., 2022 ; Navaro Auburtin et al., 2024). Par conséquent, ces deux analyses se concentreront uniquement sur les émissions globales absolues (en kgCO₂e) et indicateurs globaux pour évaluer les modes constructifs sur un même scénario géométrique. L'analyse multicritère, ayant des paramètres géométriques comme variable libre utilisera les indicateurs surfaciques cependant pour éviter tout biais, des tranches de surface cible seront mis en place pour assurer la pertinence de la comparaison.

3.2.5.2 Biais structurel

Changer le matériau du voile périphérique entraîne souvent une modification du mode constructif global (Mouton et al., 2024), ce qui fait varier les dimensions macro-structurelles et fausse la comparaison des impacts (Navaro Auburtin et al., 2024). Pour isoler l'effet du seul matériau de façade, Schneider et al. (2025) fixent la géométrie et l'ensemble des éléments porteurs, ne faisant varier que le matériau structurel et ses implications. La même approche logique est appliquée ici : la matérialité du gros œuvre et du second œuvre sont maintenus constants, à l'exception du système de voile et de ses implications directes (isolation, inertie, gestion de l'humidité, perspiration), afin de garantir l'équivalence fonctionnelle entre scénarios. Cette approche est validée par Migoni Alexandre et al. (2024) et Allan & Phillips (2021), qui excluent de leur périmètre les éléments communs à tous les scénarios. Les composants strictement identiques d'un mode constructif à l'autre peuvent être écartés de l'étude, car ils n'introduisent aucune variation dans le bilan carbone (Kayaçetin et al., 2023). Le système porteur retenu est celui du cas d'étude réel : des poteaux intérieurs en lamellé-collé supportant des planchers légers composés d'un gîtage bois et d'une dalle en CLT. Le plancher bas du rez-de-chaussée repose sur un radier en béton armé, et les charges permanentes et variables sont reprises du projet réel. Ceux-ci seront dimensionnés en fonction de l'itération géométrique.

3.2.5.3 Biais mécanique

Les différents scénarios de modes constructifs des voiles répondent à des exigences techniques et mécaniques identiques (Wittstock et al., 2012 ; Andersen et al., 2021). Pour éliminer tout biais mécanique, les éléments de la trame structurelle doivent être pré-dimensionnés en respectant les mêmes règles de calcul et charges réglementaires que dans la

pratique réelle (Mena, 2020). De plus, les voiles porteurs de chaque variante reprennent les mêmes sollicitations et descentes de charges, garantissant une base de comparaison équitable.

Pour assurer cette cohérence réglementaire, l'ensemble des éléments de structure étudiés sont dimensionnés en stricte conformité avec les Eurocodes et les normes utilisées dans la pratique réelle (Navaro Auburtin et al., 2024). Cette règle s'applique ainsi aux planchers (gîtage bois et dalles CLT), aux poutres, aux poteaux en bois lamellé-collé (LC) ainsi qu'au radier de fondation. L'intégration et le dimensionnement de ces éléments secondaires et des fondations s'avèrent indispensables pour éviter un biais de troncature structurelle, puisque la masse des fondations et des éléments horizontaux varie de façon significative en fonction du poids propre et des charges de la superstructure (Moncaster et al., 2018 ; Younis & Dodoo, 2022 ; Hemmati et al., 2024).

Voici les charges permanentes et variables de plancher retenues issues du cas d'étude réel :

Catégorie	Élément	Charge (kg/m ²)
Charges permanentes	Total admissible	180
	Finition de sol lino	5
	Chape ciment allégé 50 mm	32
	Laine minérale 30 mm	25
	Chape ciment allégé 66 mm	43
	Cloisons légères	70
	Éclairage, câblage, gainage	5
Surcharges variables	Total (Exploitation)	300
	Exploitation	300

Fig 7. Table récapitulative des charges surfaciques

3.2.5.4 Biais d'idéalisation technique

Dans le cadre de la modélisation paramétrique, une simplification des voiles maçonnés engendre un biais d'idéalisation technique. Modéliser la maçonnerie en terre crue ou cuite comme un panneau homogène et intrinsèquement auto-stable occulte les renforts structurels nécessaires dans la réalité constructive. Cette omission avantage injustement la brique face à des systèmes de panneaux continus et intrinsèquement stables comme le bois lamellé-croisé (CLT). En effet, le calcul des parois doit impérativement intégrer les sollicitations horizontales telles que le vent ou les risques sismiques, et non se limiter à la compression verticale (Galán-Marín et al., 2015). Or, la terre crue présente une résistance en traction quasi nulle, ce qui la rend extrêmement vulnérable aux efforts latéraux sans renforcement (Ávila et al., 2021).

La solution technique est l'intégration du principe de maçonnerie chaînée. Maithel (2023) souligne que l'utilisation de blocs d'argile dans l'industrie requiert l'incorporation d'une ossature en béton armé (chaînages) dont les ratios matériels doivent être rigoureusement comptabilisés.

De même, Asdrubali et al. (2023) rappellent que l'épaisseur et l'efficacité d'un mur dépendent directement du système de renforcement adopté. Conformément au principe d'équivalence fonctionnelle stricte édicté par Andersen et al. (2022), l'ACV doit comptabiliser l'ensemble des exigences supplémentaires nécessaires au fonctionnement réel du système.

Pour remédier à ce biais, on modélise le chaînage horizontal BA en tête de mur (faisant aussi office de linteau) présent dans le cas d'étude réel pour les scénarios en maçonnerie (BTC & Terre cuite alvéolaire).

De l'autre côté le scénario CLT nécessite de nombreux connecteurs métalliques pour assurer la liaison avec le gîtage. Ils seront pris en compte sous forme de ratio massique issue des fiches techniques équivalent à 0.13 kg d'acier par m² de CLT.

Néanmoins, l'équivalence d'un voile ne se limite pas à sa stabilité mécanique, elle doit également intégrer la performance thermique de l'enveloppe là où les scénarios géo sourcés présentent de nombreux avantages.

3.2.5.5 Biais thermiques

L'analyse du cycle de vie ne peut occulter l'aspect thermique des bâtiments. Évaluer un voile porteur sans considérer ses propriétés isolantes (thermique statique) ou sa capacité de régulation des températures (thermique dynamique) conduirait à comparer des systèmes inégaux. Bien que cette étude n'ait pas les moyens d'intégrer une étude ou simulation thermique précise pour garantir l'équivalence thermique parfaite des modes constructifs, une équivalence simplifiée est établie reposant sur deux spectres complémentaires : ses propriétés isolantes statiques et sa régulation inertielle dynamique.

3.2.5.5.1 Résistance thermique

Sur le plan statique, la comparaison de voiles porteurs soulève un biais majeur si elle se limite à l'évaluation du carbone intrinsèque du matériau brut sans considérer ses propriétés isolantes. À épaisseur égale, un matériau dense comme la brique de terre compressée (BTC) requiert nettement plus d'isolant rapporté qu'un panneau en bois lamellé-croisé (CLT) pour atteindre une performance thermique équivalente exigée par la réglementation. En effet, la résistance thermique de la terre crue s'avère insuffisante de manière isolée, obligeant l'ajout d'isolants conventionnels, souvent d'origine pétrochimique (XPS, PUR, EPS), pour augmenter significativement les capacités thermiques de la paroi (Ávila et al., 2021). L'intégration de ces isolants synthétiques ruine le bilan environnemental de l'assemblage, les agents gonflants très émissifs dominant massivement les émissions en phase de production et en fin de vie (Mouton

et al., 2023). Bien que l'utilisation d'isolants biosourcés constitue une alternative, leur plus faible pouvoir isolant engendre une surépaisseur massive de matériau, ce qui détériore mécaniquement le bilan carbone global (GWP) en raison de la quantité de masse requise (Brahma et al., 2024).

Pour neutraliser ce biais et garantir une comparaison juste, l'unité fonctionnelle ACV doit inclure le complexe isolant complet permettant d'atteindre une transmittance thermique (U-value) cible identique pour toutes les variantes (Asdrubali et al., 2023 ; Fernandes et al., 2019 ; Trachte et al., 2025). Dans cette optique, la valeur cible est fixée à $U = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$, conformément aux exigences de la réglementation PEB wallonne pour les murs extérieurs (Annexe 3 de l'arrêté du Gouvernement wallon du 1er janvier 2017). Par ailleurs, le choix de l'isolant de référence se porte sur la laine de roche, car il s'agit de l'un des matériaux les plus documentés et utilisés sur le marché européen (Füchsl et al., 2022). Cet isolant affiche un profil d'émissions intermédiaire, se situant entre les matériaux biosourcés peu émissifs et les isolants synthétiques très polluants, ce qui justifie son utilisation comme valeur de base neutre pour équilibrer thermiquement l'ensemble des parois sans fausser artificiellement les résultats finaux (Füchsl et al., 2022).

3.2.5.5.2 Inertie thermique

Sur le plan dynamique, l'étude doit prendre en compte la capacité de déphasage et inertielle des matériaux denses comme la terre compressée (BTC), qui sont cruciales pour le confort estival des usagers (Cabeza et al., 2021). L'énergie grise doit impérativement être mise en perspective avec le comportement thermique dynamique du bâtiment, l'ACV seule fournissant une vision trop partielle de la durabilité (Arduin et al., 2022 ; Di Santo et al., 2023). D'un autre côté, imposer une inertie thermique extrême constitue une aberration écologique, car cela alourdit inévitablement l'énergie grise sans justification fonctionnelle au-delà de la saturation thermique (Cabeza et al., 2021).

La solution méthodologique consiste à intégrer un indicateur d'inertie équivalent entre les différents scénarios. Les structures légères en bois (CLT) présentent une faible inertie, obligeant l'ingénierie à y ajouter de la masse sous forme de chapes en ciment pour compenser ce déficit et atténuer les surchauffes (Migoni Alexandre et al., 2024 ; Mouton et al., 2023 ; Rodrigues et al., 2016). La masse surfacique, exprimée en kg/m^2 , constitue l'indicateur retenu pour évaluer la capacité inertielle des différents scénarios (Asdrubali et al., 2023). Les normes ISO 52016-1 et PEB fournissent des valeurs de capacité thermique surfacique de référence selon le type de construction (légère, moyenne, lourde). En se basant sur la littérature, Asdrubali et al. (2023) fixent une exigence de masse surfacique de 260 kg/m^2 . Parallèlement, Migoni Alexandre et al. (2025) démontrent qu'une chape de béton structurelle standard ajoute environ 146 kg/m^2 . L'intégration de cette couche de masse additionnelle pour les systèmes légers garantit l'équivalence inertielle requise pour évaluer le poids carbone de chaque alternative, transformant ainsi l'ACV en un véritable outil d'aide à la décision holistique. C'est pourquoi la valeur cible du facteur d'inertie a été fixée à 152 kg/m^2 pour cette étude. Ce seuil représente la moyenne entre la valeur de 142 kg/m^2 (moyenne des classes « moyenne » à 110 kg/m^2 et « lourde » à 175 kg/m^2 de la norme ISO 52016-1) et la valeur de 162 kg/m^2 issue du cas d'étude

réel. Ce compromis garantit une inertie minimale pour le confort d'été. Une chape en ciment est intégrée dynamiquement à chaque scénario pour atteindre ce seuil de 152 kg/m².

3.2.5.6 Biais d'enveloppe

Les blocs de terre comprimée (BTC) présentent une vulnérabilité critique face à l'humidité. En effet, une hausse minimale de la teneur en eau du matériau (passant de 0,0 % à seulement 4,2 %) suffit pour provoquer une diminution de 75 % de sa résistance au cisaillement (Ávila et al., 2021). Pour surmonter ces contraintes, la variante BTC doit intégrer une protection externe par un enduit à la chaux naturelle. Correspondent perspirant permet d'assurer la migration et la régulation naturelle de l'humidité interne sans piéger l'eau dans le mur, ce qui correspond aux règles de l'art pour les structures en terre (Ávila et al., 2021 ; Bogas et al., 2018). Pour assurer l'équivalence fonctionnelle, les parois en bois lamellé-croisé (CLT) et en briques monomur alvéolaires de terre cuite (BMA), intègrent un parement sous forme de bardage en bois sur lame d'air ventilée. Ce choix est conforme aux pratiques usuels de l'industrie et est neutre sur les différents indicateurs évitant d'introduire des biais d'impacts environnementaux typiques des revêtements lourds conventionnels (Kayaçetin et al., 2023) et facilitant la comparaison environnementale et économique des superstructures.

L'équivalence fonctionnelle établie dans cette étude permet d'isoler et de comparer de manière rigoureuse l'impact environnemental de la substitution matérielle du voile porteur est récapitulé dans le tableau suivant :

Biais	Solution (Mots-clés)
Biais Spatial	Surface Nette (NFA) constante et calcul des émissions globales absolues (kgCO ₂ e)
Biais Structurel	Éléments structurels constants (poteaux LC, gîtage, dalle CLT, radier) et invariants exclus
Biais Mécanique	Prédimensionnement aux Eurocodes et charges identiques (G=180 kg/m ² , Q=300 kg/m ²)
Biais d'Idéalisation	Modélisation des chaînage BA et connecteurs acier CLT (0,13 kg/m ²)
Biais Thermique (Statique)	Valeur U cible commune (0,24 W/m ² K) et utilisation laine de roche.
Biais Thermique (Dynamique)	Inertie cible commune (152 kg/m ²) et utilisation chape de ciment compensatoire

Biais d'enveloppe	Enveloppe modélisée, enduit chaux (BTC) et bardage bois (CLT & BMA)
-------------------	---

Fig 8. Table récapitulative de l'équivalence fonctionnelle

3.3 Modes constructifs

La méthodologie s'appuie sur l'équivalence fonctionnelle établie pour assurer une modélisation équitable des trois modes constructifs de parois de façade. Pour illustrer ces modes constructifs 3 détails techniques de références ont été réalisés avec un code couleur fonctionnel :

- En **orange** figurent les composants structurels modélisés et dimensionnés géométriquement par la boucle de calcul (sujets au prédimensionnement et à l'optimisation).
- En **bleu** sont indiqués les éléments pris en compte exclusivement dans l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), tels que les isolants, les enduits de finition.
- En **noir** sont représentés les composants invariants, exclus de l'analyse car identiques d'un scénario à l'autre (finitions intérieures fixes, précadres, etc.).

3.3.1 S0 : Mur en bois lamellé croisé

Mode constructif S0 : Mur lamellé croisé CLT (Bois)

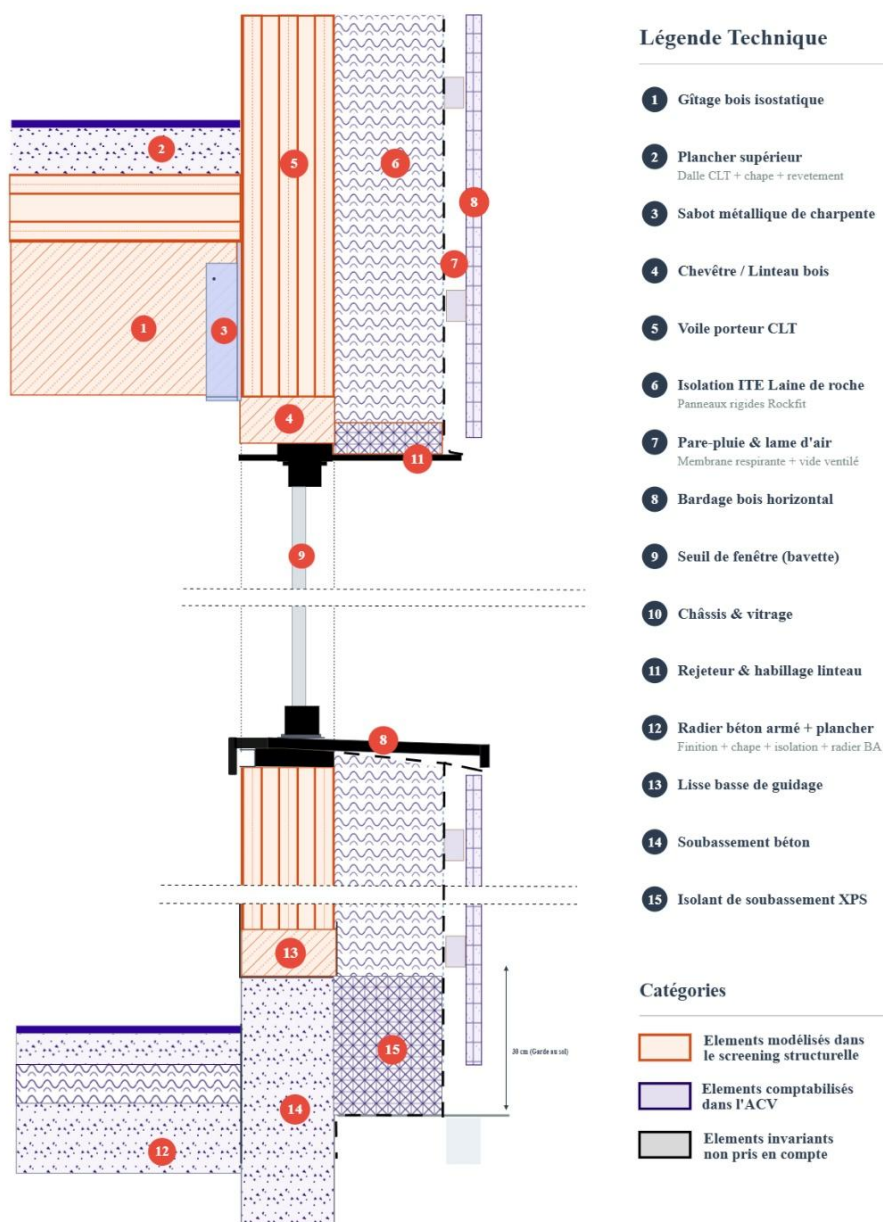


Fig 9. Détails techniques mode constructif S0 : Mur lamellé croisé CLT

Le mode constructif biosourcé en bois lamellé croisé (S0) repose sur un voile porteur constitué d'un panneau de 5 plis d'épicéa provenant de chez Stabilame. La performance thermique requise est assurée par l'ajout d'une isolation extérieure en laine de roche rigide Rockwool Rockfit Mono. La face externe de la paroi est protégée par un pare-pluie respirant, une lame d'air ventilée et un bardage en bois correspondant aux standards de l'industrie. En pied de mur, le panneau démarre au-dessus du sol fini sur une lisse basse en bois autoclave et

une membrane EPDM. La dalle supérieure en CLT repose sur un gîtage en bois relié au mur par des sabots métalliques. La fabrication du panneau de CLT répond aux spécifications de la norme EN 16351 et à l'Évaluation Technique Européenne spécifique du fabricant (Stabilame, 2020), tandis que le prédimensionnement structural s'appuie sur l'Eurocode 5 (CEN, 2005) en combinant ses équations avec les méthodes de calcul des couches croisées validées dans l'Évaluation Technique Européenne.

3.3.2 S1 : Brique terre cuite alvéolaire porteuse

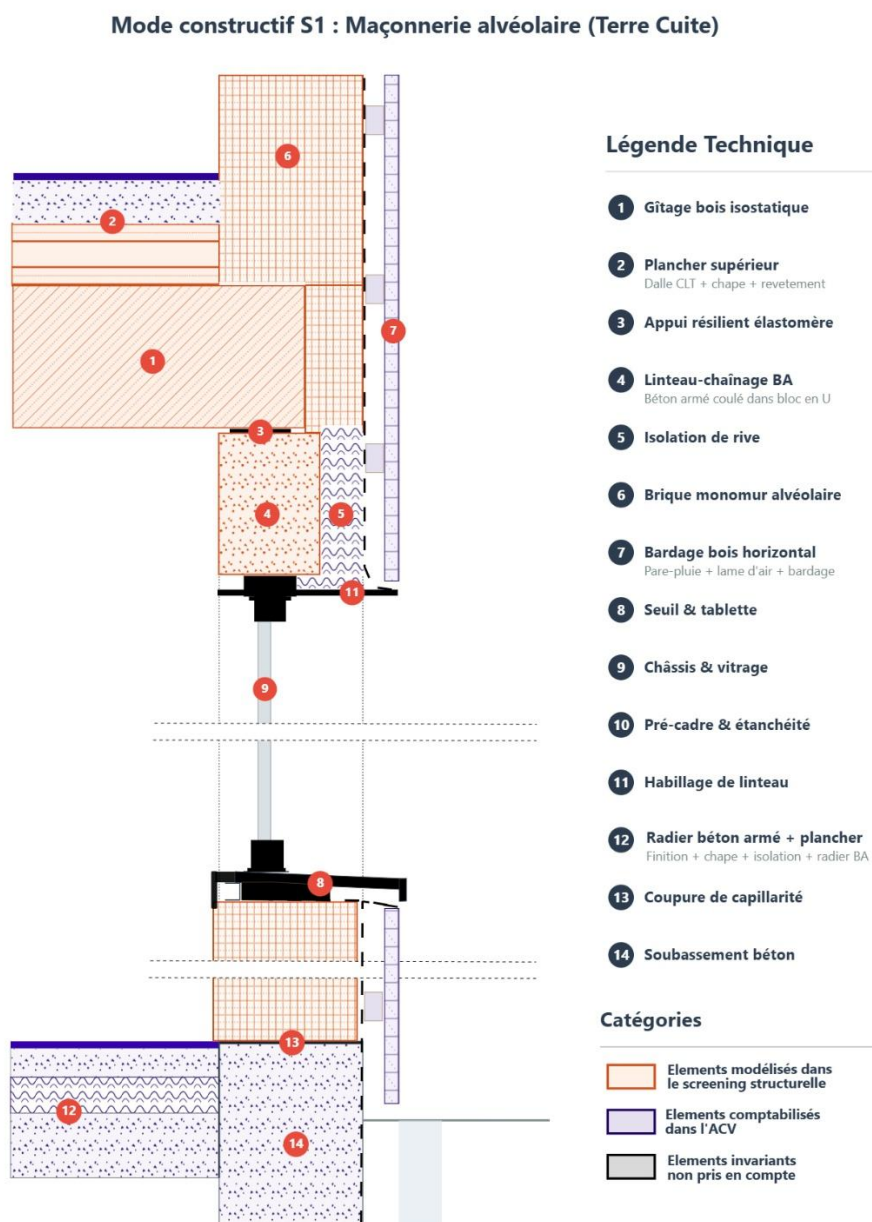


Fig 10. Détails techniques mode constructif S1 : Mur brique monomur alvéolaire BMA

Le mode constructif de référence en maçonnerie alvéolaire (S1) se base sur le cas d'étude référence utilisée pour cette étude. Il est composé d'un mur porteur constitué de blocs de terre cuite à alvéoles verticales JUWO Thermoplan assemblés par des joints minces de mortier-colle.

L'isolation thermique de la paroi est assurée directement par l'air emprisonné dans la structure alvéolaire des blocs. La protection extérieure est complétée par une lame d'air ventilée et un bardage bois pour garantir l'équivalence fonctionnelle. Le mur repose sur un soubassement en béton armé au-dessus du sol fini équipé d'une membrane de coupure de capillarité. Le gîtage en bois du plancher supérieur s'appuie sur un chaînage horizontal en béton armé coulé dans des blocs périphériques en U, avec l'interposition d'un appui résilient en élastomère. Les blocs de maçonnerie répondent à la norme harmonisée EN 771-1 (CEN, 2011) et bénéficient d'une certification BENOR garantissant la régularité de leurs performances. Le prédimensionnement mécanique de la paroi sous charges verticales et horizontales s'effectue directement selon les équations de l'Eurocode 6 (CEN, 2012), en appliquant le coefficient de sécurité partiel standard pour la maçonnerie de terre cuite de classe industrielle.

3.3.3 S2 : Brique de terre crue comprimée

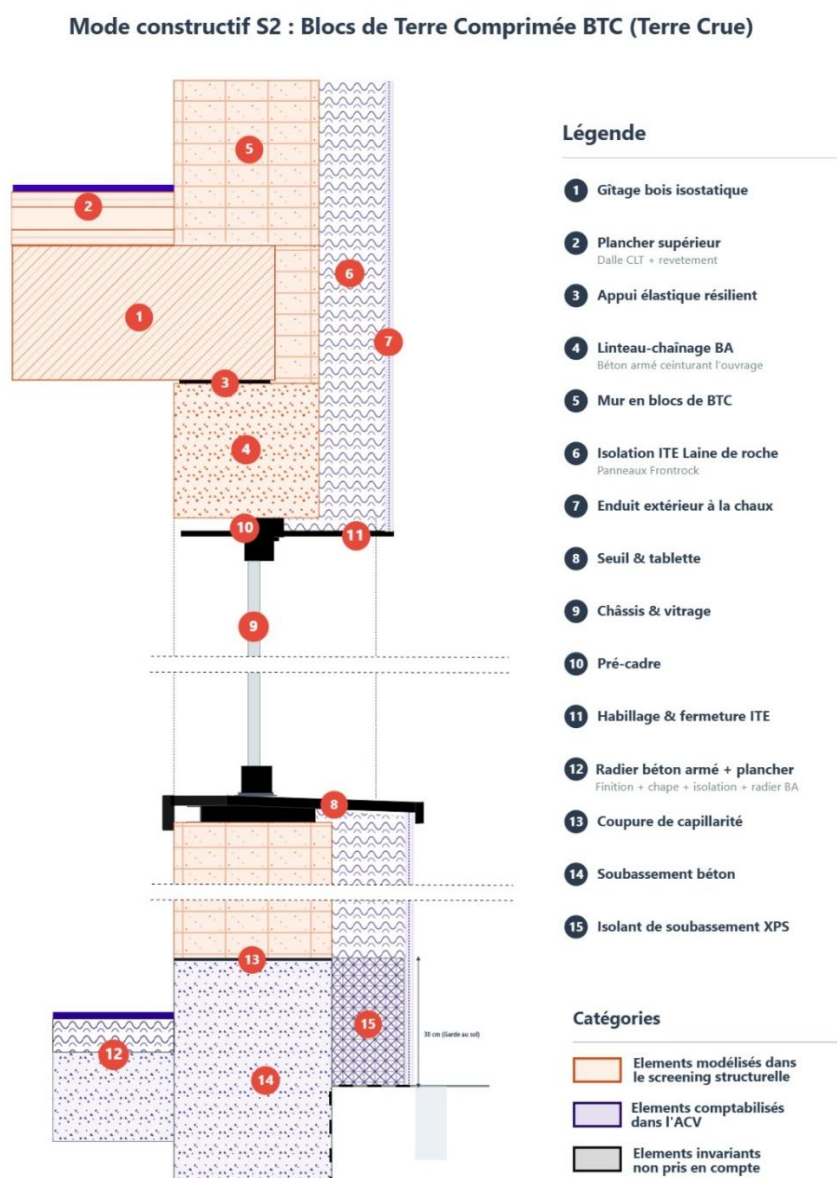


Fig 11. Détails techniques mode constructif S2 : Mur brique de terre crue comprimée BTC

Le mode constructif en blocs de terre comprimée (S2) met en œuvre un mur porteur en blocs de terre crue provenant de chez BC Materials, il est assemblé à l'aide d'un mortier bâtard industriel modifié sur chantier par l'ajout de l'additif terreux Léem. Afin d'assurer la stabilité structurale, les blocs sont stabilisés à l'aide de ciment CEM III. L'enveloppe extérieure comprend une isolation en laine de roche Rockwool Frontrock et un enduit de chaux NHL. La terre crue dicte l'intégration de l'enveloppe extérieure pour l'ensemble des modes constructifs évalués. La performance mécanique de ce matériau dépend strictement de sa teneur en eau (Ávila et al., 2021). Une humidification excessive peut entraîner une perte critique de son intégrité structurale (Bogas et al., 2018). La conception exige donc l'adoption de stratégies de protection défensives capables de garantir une régulation naturelle de l'humidité (Zhang et al., 2024). Pour respecter cette contrainte physique tout en maintenant une équivalence fonctionnelle, un enduit extérieur à la chaux naturelle est appliqué uniformément aux différents scénarios évalués. Ce matériau hygroscopique représente un standard de l'industrie pour les constructions perspirantes. Le mur est implanté au-dessus du sol fini sur un soubassement en béton armé muni d'une membrane d'étanchéité et de coupure de capillarité. Le plancher supérieur, constitué d'une dalle CLT sur gîtage en bois, repose sur un chaînage horizontal en béton armé par l'intermédiaire d'un appui résilient en élastomère. Les caractéristiques mécaniques et physiques des blocs de terre comprimée respectent les normes DIN 18945 (DIN, 2018) pour la compression et DIN 4102 pour la tenue au feu, ainsi qu'à la norme expérimentale XP P13-901 (AFNOR, 2022) et aux recommandations de l'ATEX du CSTB. Le dimensionnement structurel à la compression et au flambement est réalisé par analogie avec la maçonnerie non armée selon l'Eurocode 6 (CEN, 2012).

3.4. Modélisation

Pour évaluer chacune des variantes constructives décrites précédemment, l'étude s'appuie sur un environnement de modélisation paramétrique couplé à une analyse structurelle intégrée. Voici un schéma récapitulatif qui résume dans les grandes lignes le processus de modélisation :

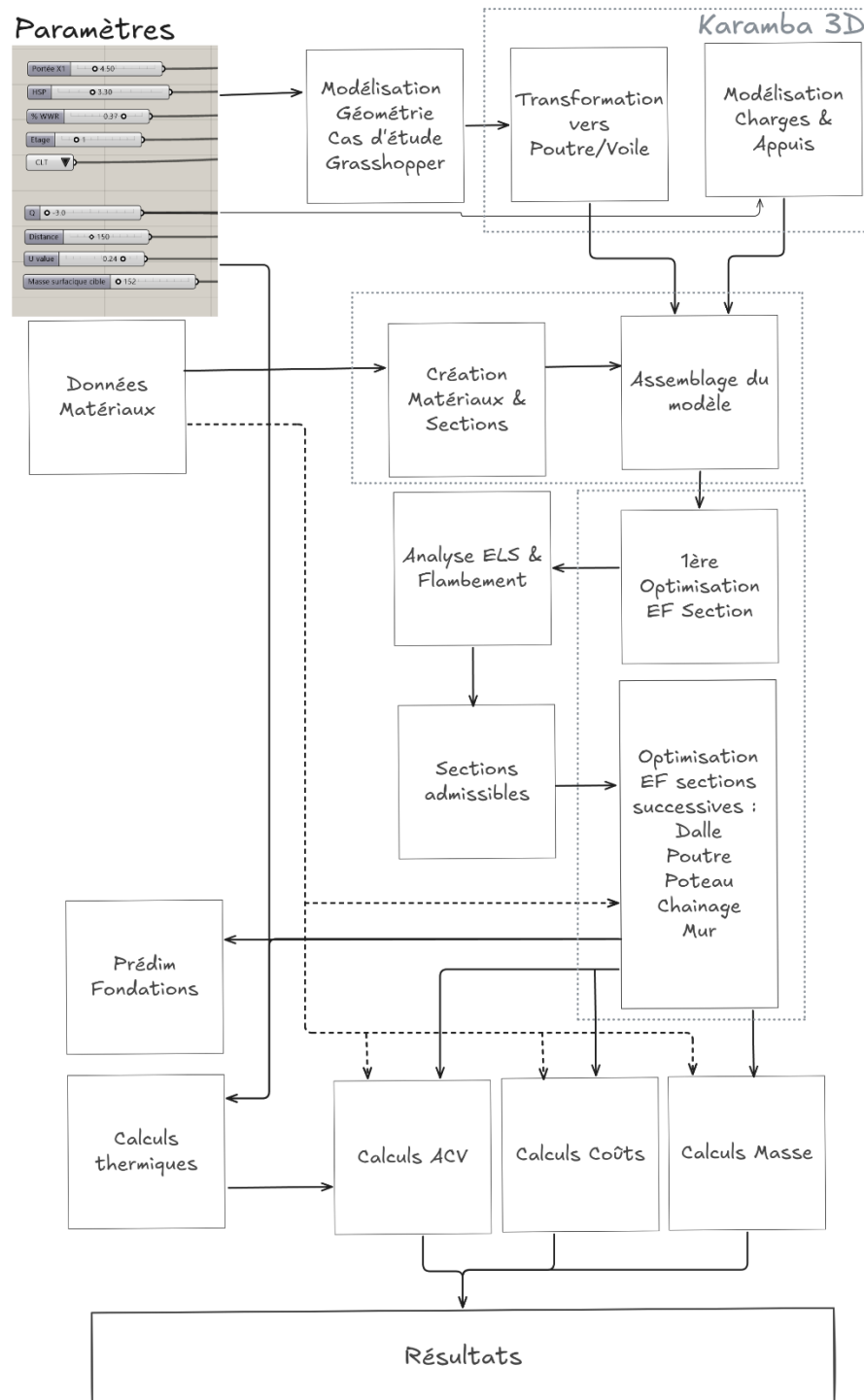


Fig 12. Schéma méthodologique du processus de modélisation avec Grasshopper

3.4.1 Modélisation paramétrique avec Grasshopper

La géométrie du bâtiment est définie sous Rhinoceros 3D via son éditeur algorithmique Grasshopper. Cet outil permet de construire un modèle associatif à partir de paramètres d'esquisse (portée, hauteur d'étage, ratio de vitrage) ; toute modification d'un paramètre se répercute automatiquement sur l'ensemble du modèle. L'espace de conception est ainsi entièrement piloté par un jeu réduit de variables, ce qui facilite la génération et la comparaison de multiples configurations.

3.4.2 Analyse structurelle avec Karamba3D

L'analyse par éléments finis est directement embarquée dans ce flux paramétrique grâce au plug-in Karamba3D. Présenté par Preisinger (2013) comme un outil de calcul destiné aux phases amont de conception, Karamba3D traduit les entités géométriques de Grasshopper en éléments structurels (poutres, coques, appuis), applique les charges et les combinaisons, puis résout le modèle par éléments finis pour obtenir les efforts internes, les déplacements et les contraintes élastiques (Preisinger, 2013). En sortie, le modèle fournit directement les volumes de matériaux nécessaires à l'évaluation carbone.

L'exploration paramétrique des sections est réalisée au moyen du composant OptiCroSec de Karamba3D. Pour un sous-ensemble donné de la structure, une liste de profils est classée par ordre de préférence. L'algorithme évalue d'abord la réponse mécanique par un calcul élastique linéaire aux éléments finis, puis, pour chaque élément, il confronte les sollicitations obtenues aux capacités résistantes de chaque section. Si le critère n'est pas satisfait, la section est incrémentée vers la suivante et le calcul est relancée, jusqu'à ce que tous les éléments respectent simultanément les exigences (Preisinger, 2013).

Le dimensionnement à l'ELU s'appuie sur un taux d'utilisation cible (MaxUtil), rapport entre la contrainte de calcul et la résistance caractéristique du matériau. Le composant permet d'intégrer des coefficients de sécurité gammaMO (hors instabilité) et gammaM1 (sections comprimées susceptibles de flamber) directement issus des Eurocodes. L'algorithme de prédimensionnement se déroule en 3 étapes, à l'issue de l'assemblage des éléments du modèle, une 1^{ère} optimisation de section (OptiCroSec) est lancée avec tous les éléments et toutes leurs sections correspondantes. Cela permet d'obtenir une première estimation de la dimension des éléments.

Le critère ELS est piloté à la suite, l'algorithme extrait les flèches maximales de chaque composant du modèle issue de la 1^{ère} itération des calculs de section (OptiCroSec). Il les compare avec les flèches admissible issue des Eurocodes pour en déduire les sections vérifiant le critère de déformations parmi la liste prédéfinie. De la même manière le calcul au flambement s'effectue via la formule de la charge critique d'Euler $FS \cdot N_{ELU} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{req}}{h_m^2}$. À partir de la hauteur

libre de l'élément (hm) et de l'effort normal de compression maximal de calcul (NELU) extrait de la 1ère itération structurelle Karamba3D, il est possible d'isoler le moment d'inertie minimal requis (I_{req}) et de déduire la largeur minimal admissible de l'élément.

Enfin la structure est décomposée en sous-ensembles fonctionnels (planchers, poutres, poteaux, murs) traités successivement dans l'ordre de la descente de charge. Chaque famille d'éléments se voit associer un algorithme OptiCroSec dédié, alimenté par la liste réduite de sections du matériau considéré (réduite après la vérification à l'ELS et au flambement). Les charges sont appliquées au modèle complet, préservant la compatibilité entre sous-ensembles et garantissant que chaque composant est dimensionné en cohérence avec la rigidité des éléments adjacents. Les propriétés de matériau et les constantes de calcul adoptées pour chaque élément de structure sont récapitulées ci-dessous.

3.4.3 Poteaux & poutres lamellées collés :

Les éléments structurels de la marque Stabilame ont été retenus avec des sections allant de 100 à 250 mm en largeur et de 200 à 550 mm en hauteur. L'Eurocode 5 autorise une analyse élastique linéaire globale sur la base des modules moyens $E_{0,mean}$ et G_{mean} (EN 1995-1-1). Dans ce cadre, le matériau est traité comme isotrope transverse, ce qui permet d'utiliser le critère de Von Mises lors du criblage paramétrique. Bien que ce critère ignore le caractère fragile et orthotrope du bois, il délivre une enveloppe de contrainte acceptable lorsque la flexion simple domine, comme c'est le cas pour les poutres et poteaux ; cette pratique est d'ailleurs courante dans les analyses préliminaires de structures en bois (Blaß & Sandhaas, 2017). On modélise du GL24h Epicea qui est une essence courante représentative de l'industrie. On utilise un module de cisaillement fictif issu du calcul $G = E/[2(1+\nu)]$ pour coïncider avec le comportement isotrope. La résistance de calcul est directement obtenue en divisant les valeurs caractéristiques par $\gamma_M = 1,25$ et une limite de déplacement est imposée afin de garantir l'aptitude au service, en conformité avec la double vérification ELU/ELS exigée par l'EN 1990. Les sections verticales avant d'être dimensionnée à l'ELU sont vérifiées au flambement. Un tableau synthétique des paramètres mécanique du bois peut être retrouvée en annexe.

3.4.4 Éléments en bois lamellé-croisé (CLT)

Pour cette étude les éléments structurels en CLT de la marque Stabilame sont retenus avec des épaisseurs variant de 80mm à 200mm. Le comportement mécanique d'un panneau CLT est gouverné par l'orthogonalité de ses couches successives. La modélisation en coque requiert donc une loi élastique orthotrope distinguant les rigidités parallèle (E_1) et perpendiculaire (E_2) (Brandner et al., 2016 ; EN 1995-1-1). La modélisation sous Karamba 3D impose de calculer des modules d'élasticité équivalents (E_1 et E_2) pour chaque épaisseur afin de prendre en compte le croisement et la position des plis de bois (Brandner et al., 2016 ; Li et al., 2022). Pour sécuriser les calculs, le modèle retient pour chaque direction la valeur de E la plus faible (la plus conservatrice) entre le calcul basé sur l'épaisseur des couches et celui basé sur leur inertie, conformément aux validations de Martínez-Martínez et al. (2018).

Ainsi, le module vertical (fort) E_1 est calculé selon l'épaisseur des couches (stabilité de membrane) :

$$E_1 = \frac{E_0 \cdot t_{long} + E_{90} \cdot t_{trans}}{t_{total}}$$

Et le module horizontal (faible) E_2 est calculé selon l'inertie des couches (stabilité de flexion) :

$$E_2 = \frac{E_0 \cdot I_{trans} + E_{90} \cdot I_{long}}{I_{total}}$$

(Où E_0 et E_{90} sont les modules du bois massif C24 parallèle et perpendiculaire au fil, t_{long} et t_{trans} sont les épaisseurs cumulées des plis dans chaque sens, de la même manière I_{trans} et I_{long} sont les moments d'inertie cumulés des plis dans chaque direction par rapport au centre du panneau).

Pour l'optimisation paramétrique sous Karamba3D, le critère de contrainte principale maximale de Rankine (S-Hypo=2) a été retenu comme méthode de vérification simplifiée des contraintes de flexion des plaques. La résistance de calcul est obtenue en minorant les valeurs caractéristiques par le coefficient de sécurité $\gamma_M = 1,25$ (EN 1995-1-1), directement saisi dans gammaMO et gammaM1. En parallèle, une limite de flèche est imposée sous combinaisons quasi-permanentes, en conformité avec la double vérification ELU/ELS prescrite par l'EN 1990. Les sections verticales avant d'être dimensionnée à l'ELU sont vérifiées au flambement. En flexion hors plan, la ruine est souvent dictée par le cisaillement roulant des plis transversaux ; le module de cisaillement roulant (G_{12}) et sa résistance caractéristique (t_{12}) constituent ainsi les paramètres déterminants du dimensionnement (Brandner et al., 2016 ; EN 1995-1-1). Le prédimensionnement réalisé dans cette étude n'inclue pas cette vérification, constitue une limite importante. Un tableau synthétique des paramètres mécanique du CLT peut être retrouvée en annexe.

3.4.5 Éléments en bloc de terre comprimée (BTC)

Les murs porteurs sont réalisés en blocs de terre comprimée BC Materials, mis en œuvre en 2 épaisseurs (140 et 190 mm) avec un mortier mélangé avec des additifs Leem. Les propriétés mécaniques de la maçonnerie sont directement extraites des essais fournis par le fabricant, sous la norme EN1052-1. Le module de cisaillement est ensuite déduit par $G=0,4E$ (EN 1996-1-1). La maçonnerie de terre crue est modélisée en prédimensionnement comme un milieu continu isotrope fragile. L'Eurocode 6 (EN 1996-1-1) autorise une analyse élastique à condition de négliger la résistance à la traction de la maçonnerie, celle-ci se fissurant et redistribuant naturellement ses contraintes dans la réalité (Lourenço, 1996). Le solveur linéaire de Karamba3D ne pouvant modéliser ce comportement non linéaire, il génère des pics de traction locaux qui bloquent l'algorithme d'optimisation (Lourenço, 1996). L'utilisation d'un paramètre de traction non nul pour stabiliser les calculs est courante en modélisation (Lagioia et al., 2014). Afin de s'assurer de prédimensionner les sections uniquement vis-à-vis de la compression et du flambement, la résistance à la traction est portée artificiellement à 10 kN/cm², en supposant les tractions locales reprises par les chaînages. La rupture est régie par le critère de Rankine (S-Hypo = 2), adapté aux matériaux fragiles gouvernés par la contrainte principale maximale

(Lagioia et al., 2014 ; Fundi et al., 2021). La valeur de calcul est obtenue en appliquant un coefficient partiel $\gamma_M=3$ justifié par la forte variabilité du matériau et les préconisations de la littérature spécialisée (Müller et al., 2016 ; DIN 18940). Les déplacements hors plan sous vent sont bornés par une limite de flèche horizontale, conformément à la double exigence ELU/ELS de l'EN 1990. Les sections verticales avant d'être dimensionnée à l'ELU sont vérifiées au flambement. Un tableau synthétique des paramètres mécanique de la maçonnerie terre crue modélisé peut être retrouvée en annexe.

3.4.6 Éléments en briques alvéolaires de terre cuite

Les murs extérieurs sont constitués de briques alvéolaires ThermoPlan S75, S8, S9, TS11 & 12 de JUWO, disponibles en épaisseurs en de 300, 365 et 425 mm, assemblées au mortier-colle à joint mince Diamur 355N/265N. La résistance caractéristique en compression f_k de la maçonnerie est extraite de la fiche technique du fabricant, puis le module d'élasticité sécant à court terme est calculé conformément à l'Eurocode 6 par $E=1000 \cdot f_k$ (EN 1996-1-1). Le module de cisaillement est déduit de la relation $G=0,4$. La maçonnerie étant incapable de reprendre des efforts de traction, on applique de la même manière la résistance artificielle en traction de 10 kN/cm^2 . La résistance de calcul est obtenue en divisant f_k par un coefficient partiel $\gamma_M=2,2$, valeur intermédiaire de la plage fixée pour les éléments de Catégorie I et les mortiers performanciers (EN 1996-1-1). Ce coefficient est directement saisi dans γ_{MO} et γ_{M1} , autorisant un taux d'utilisation cible MaxUtil de 1,0. Une limite de déplacement horizontal est fixée conformément à la double exigence ELU/ELS de l'EN 1990 et les sections sont vérifiées au flambement. Un tableau synthétique des paramètres mécanique de la maçonnerie terre cuite modélisé peut être retrouvée en annexe.

3.4.7 Fondation en béton armé

Afin d'éviter tout biais de troncature structurelle dans le bilan carbone (Allan & Phillips, 2021), les fondations sont prédimensionnées dynamiquement en fonction de la descente de charges et des réactions aux appuis des murs après l'analyse par éléments finies. Le système de fondation est conforme au cas d'étude réel et correspond à un radier général nervuré sous les murs de façade en béton armé. Le calcul de prédimensionnement s'appuie sur les règles de l'art et les exigences de l'Eurocode 2 (EN 1992-1-1) :

- Épaisseur de la dalle : Déterminée par le critère de limitation des déformations des dalles continues sur sol élastique, soit $h_{dalle} \geq L/20$, avec L la portée libre maximale. Un seuil minimal constructif de 0,20 m est imposé (Guerrin & Lavour, 2016).
- Largeur des nervures (B_{nerv}) : Calculée sur la base d'une diffusion des contraintes de compression du mur (b_w) à 45° à travers l'épaisseur de la dalle (Bowles, 1996), soit :

$$B_{nerv} = \left\lceil \frac{b_w + 2 \cdot h_{dalle}}{0,05} \right\rceil \times 0,05$$

- Hauteur totale des nervures (H_{nerv}) : Dimensionnée vis-à-vis de la résistance à l'effort tranchant ultime sous charge linéaire (n_{ELU}). Pour se dispenser d'armatures d'effort tranchant transversales conformément à la section 6.2 de l'Eurocode 2, la contrainte de cisaillement du béton est limitée à $v_{Rd,c}=0,35$ MPa :

$$H_{nerv} = \max \left(h_{dalle} ; \left\lceil \frac{n_{ELU} \times 10^{-3}}{0,9 \times B_{nerv} \times v_{Rd,c} \times 0,05} \right\rceil \times 0,05 \right)$$

- La masse d'acier est extrapolée en appliquant des ratios de ferrailage représentatifs de la pratique belge (CSTC, 1983), soit 80 kg/m³ pour la dalle et 100 kg/m³ pour les nervures.

3.4.7 Calibration

La calibration globale du modèle paramétrique constitue une exigence méthodologique stricte pour garantir que la simulation reproduit les phénomènes physiques (EN 1990). Cette validation empirique limite les incertitudes algorithmiques et comble l'écart scientifique récurrent entre la modélisation théorique et la réalité matérielle (Bacheva & Raposo Grau, 2025). Une vérification et une calibration ont été effectuée pour s'assurer qu'avec les mêmes paramètres géométriques et la même configuration que le cas d'étude réel, l'algorithme prédimensionne des sections du même ordre de grandeur que celle présent dans la réalité. Des ajustements ont été réalisés en conséquence au cours de l'étude pour s'assurer que les modèles calculés étaient cohérents avec le cas d'étude. Les deux figures suivantes illustrent la modélisation géométrique et structurelle générée au sein de l'environnement paramétrique. Les contraintes de traction apparaissent en bleu, tandis que les contraintes de compression sont représentées en rouge.

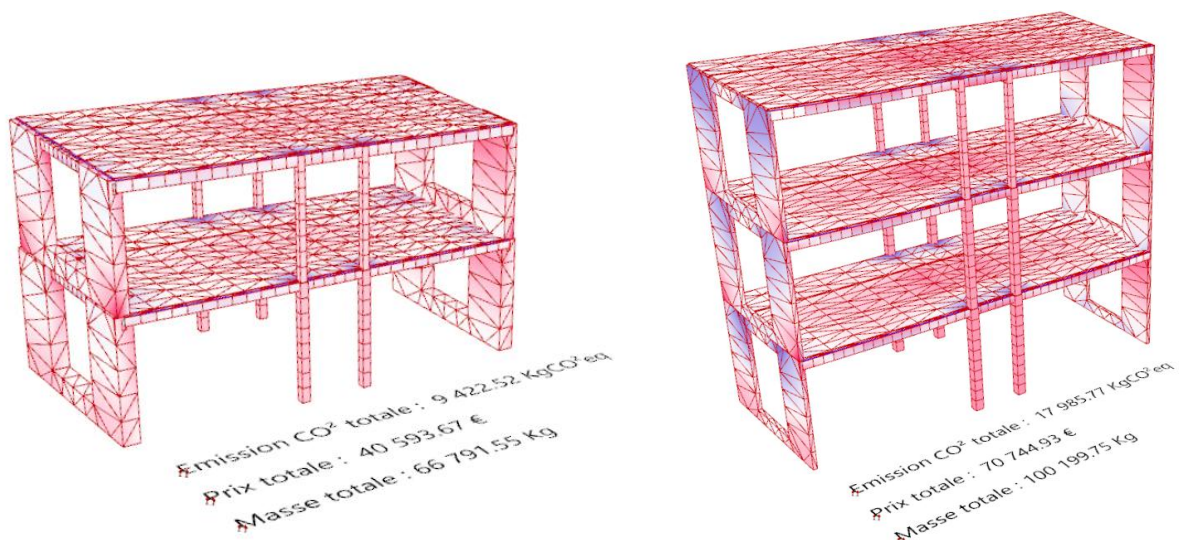


Fig 13. Vue 3D du modèle réalisé sous deux configurations différentes : BMA, R+1, Portée 4.5m & CLT, R+2, Portée 6m

3.5 Choix méthodologiques ACV

3.5.1 Périmètre de l'étude (A1-A5)

L'évaluation environnementale d'un ouvrage structurel en phase d'esquisse exige une délimitation des frontières du système. Limiter le périmètre de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) aux modules de production (A1-A3), de transport vers le chantier (A4) et de construction/installation (A5) communément appelés carbone initial ("upfront carbon") répond à cette exigence. En effet, Shi et al. (2025) soulignent que le processus d'optimisation en phase conceptuelle doit privilégier les paramètres contrôlables par les concepteurs, les étapes ultérieures (B, C, D) requérant une coordination de la chaîne d'approvisionnement et des décisions d'exploitation hors de leur contrôle immédiat. De plus, restreindre l'étude aux modules A1-A5 permet de réduire l'incertitude liée aux prédictions à très long terme de la fin de vie (Moncaster et al., 2018). Enfin, Gervásio & Dimova (2018) démontrent empiriquement que les étapes initiales A1-A3 représentent généralement plus de 80 % de l'impact carbone structurel global (GWP), légitimant la concentration de l'effort d'analyse sur ces phases majeures. Néanmoins, la fiabilité de cette analyse dépend directement de la qualité locale et spécifique des données d'inventaire utilisées.

3.5.2 Utilisation de fiches EPD

L'utilisation de bases de données génériques de second plan introduit une variabilité et un flou méthodologique propices aux choix arbitraires ou au "cherry-picking" (Bacheva & Raposo Grau, 2025). Pour pallier ce manque de standardisation, l'étude s'appuie exclusivement sur des Déclarations Environnementales de Produits (EPD) spécifiques, vérifiées par des tiers indépendants selon les directives de la norme ISO 14025 et conformes aux règles de catégorie de produits de la norme EN 15804. Pour refléter la réalité constructive locale du projet, les fiches utilisées proviennent prioritairement de la base de données fédérale belge (B-EPD). Ce choix méthodologique garantit que les facteurs d'émission carbone intègrent les spécificités du mix énergétique et des procédés industriels nationaux. Cette rigueur dans la sélection des intrants s'avère indispensable pour que les indicateurs géométriques issus des premières phases de conception guident les choix structurels.

3.5.3 Rôle comparatif de la phase d'esquisse

Comme exposé dans l'État de l'art (notamment dans la Section 3.4 : Poids relatif du gros œuvre et la Section 3.13 : La loi de MacLeamy), l'intervention de l'architecte et de l'ingénieur dès la phase d'esquisse (*Early Design Stage*) constitue le levier d'atténuation majeur pour réduire les émissions de carbone incorporé (ECE). À cette étape, l'ambition de l'évaluation environnementale n'est pas d'atteindre la précision d'un bureau de contrôle, mais de guider les

choix structurels et matériels avec une comparaison d'ordre de grandeur pour contourner le phénomène de verrouillage carbone (Bacheva & Raposo Grau, 2025).

Les décisions de conception influencent le bilan carbone de manière disproportionnée par rapport aux phases d'exécution. Feickert & Mueller (2025) démontrent à cet égard que des décisions de conception structurelle génèrent des gains carbone allant jusqu'à 70 %, tandis que les politiques d'achat de matériaux à faible empreinte sur des géométries figées ne permettent que 9 % à 16 % de réduction. De même, en découplant la sélection globale du système structurel (Phase I) de son optimisation paramétrique secondaire (Phase II), on maximise l'efficacité environnementale de la substitution (Shi et al., 2025 ; Di Santo et al., 2023). Le modèle développé sous Grasshopper et Karamba3D s'inscrit directement dans le prolongement opérationnel de cette analyse théorique.

3.5.4 Calcul carbone manuel et simplifié

L'utilisation de logiciels d'ACV commerciaux ou de plateformes intégrées au BIM (telles que TOTEM ou One Click LCA) pose un obstacle majeur lors des phases amont de conception. Ces outils nécessitent une nomenclature de projet exhaustive et figée, ce qui les rend incompatibles avec le flux de travail itératif de l'esquisse (Shi et al., 2025) et empêche l'obtention de retours d'informations en temps réel (Bacheva & Raposo Grau, 2025). Pour pallier ce désalignement, l'étude implémente un calcul manuel de l'inventaire carbone directement au sein de Grasshopper. La méthode s'appuie sur le couplage des volumes extraits du Quantity Take-Off (QTO) de Karamba3D avec les facteurs d'émission des EPD, une approche simplifiée validée scientifiquement pour les phases conceptuelles (Di Santo et al., 2023).

Cette approche permet d'avoir une maîtrise sur les constantes d'émissions des matériaux utilisés et donc d'étudier l'incertitude de celles-ci. C'est le cas de la constante d'émissions liée aux transports qui s'avère trompeuse, particulièrement pour les matériaux lourds et à faible impact de production (comme la terre crue), pour lesquels le transport peut représenter une part dominante du bilan global. Pour intégrer cette sensibilité, l'impact logistique est modélisé sous la forme paramétrique normalisée de tonne-kilomètre (t.km), dissociant la masse transportée de la distance d'acheminement, conformément aux recommandations du RICS (2023) et de Pomponi & Moncaster (2018). Le modèle intègre donc un curseur dynamique permettant de réaliser des analyses de sensibilité selon différents scénarios d'approvisionnement.

3.5.5 Indicateurs de sortie et limite

Bien que l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) soit par nature une démarche multicritère, cette étude fait le choix délibéré de se focaliser uniquement sur le Potentiel de Réchauffement Global d'origine fossile (GWP-fossil, exprimé en kgCO₂e'q.), qui s'impose comme la métrique dominante dans les arbitrages carbone de structures (Mouton et al., 2023). Conformément à cette orientation, le stockage temporaire du carbone biogénique propre aux matériaux biosourcés (CLT et bois de structure) est strictement exclu dans le bilan environnemental. Cette

exclusion s'appuie d'une part sur l'approche statique dite "O/O" (Andersen et al., 2021), qui neutralise la biomasse en raison des fortes incertitudes temporelles liées à la fin de vie du bois, et d'autre part sur les recommandations normatives de la RICS (2023) proscrivant la soustraction du carbone biogénique pour embellir artificiellement le bilan carbone initial d'un bâtiment.

Néanmoins, limiter l'évaluation environnementale à cette seule métrique fossile comporte des limites méthodologiques majeures et des risques de transfert d'impacts (burden shifting) que la présente étude reconnaît pleinement (Di Santo et al., 2023 ; Navaro Auburtin et al., 2024). En effet, comme le soulignent Brahma et al. (2024), la substitution des systèmes minéraux par des alternatives biosourcées réduit le GWP fossile mais peut déplacer la charge environnementale vers d'autres indicateurs, notamment une augmentation de l'utilisation et de la transformation des sols due aux besoins de la foresterie (Navaro Auburtin et al., 2024). L'exclusion de ces indicateurs secondaires constitue une limite de cette étude, qui doit être comprise comme un outil de conception, nécessitant des analyses multicritères approfondies en phases ultérieures pour arbitrer ces compromis complexes (Bacheva & Raposo Grau, 2025).

3.5.6 Extraction des facteurs d'émissions à partir des EPD

L'évaluation de l'empreinte carbone en phase de conception préliminaire repose sur l'hypothèse de proportionnalité entre le volume de matériau mis en œuvre et les émissions de gaz à effet de serre. Pour chaque matériau i , le volume V_i (m³) issu du screening structurel sous Karamba3D est multiplié par un facteur d'émission volumique (FE_i) extrait des déclarations environnementales (EPD) en divisant l'impact indiqué par le volume d'une unité déclarée. L'impact total de la structure s'écrit alors :

$$GWP_{total} = \sum_i (V_i \times FE_{A1-A3,i} + V_i \times \rho_i \times d_i \times FE_{A4,i} + V_i \times FE_{A5,i})$$

Où (ρ_i) est la masse volumique (t/m³) et (d_i) la distance de transport (km). Cette approche, qui fait correspondre les sorties géométriques du modèle paramétrique aux unités déclarées des EPD, est reconnue par le standard RICS (2023) comme la méthode de référence pour les évaluations simplifiées en amont des projets. Une logique identique a été employée par Navaro et Auburtin (2024) dans une étude de screening structurel : après avoir extrait les quantités de matériaux par type d'élément, ils leur ont directement appliqué les facteurs d'émission des EPD.

3.5.6.1 La conversion volumétrique et massique (Modules A1-A3)

Pour le module A1-A3, l'impact déclaré dans l'EPD est convertie en facteur d'émission volumique FE_{A1-A3} (kgCO₂eq/m³) en le divisant par le volume d'une unité déclarée (UD). Cela suppose que les émissions de production sont proportionnelles au volume de matériau mis en œuvre. Selon l'unité de l'UD, ce volume est :

- $1/\rho$ (si l'UD est en kg, avec ρ la masse volumique)
- 1 m^3 (si l'UD est en m³)
- $E \cdot m^2$ pour une UD exprimée en m² de mur d'épaisseur e .

Le standard RICS (2023) exige précisément cette cohérence métrique et préconise l'usage de la densité pour passer de la masse au volume. La formule « A1—A3 = material quantity × material embodied carbon factor » (RICS, 2023) résume cette approche.

La formule suivante est obtenue pour FE A1-A3 (kgCO₂éq/m³)

$$FE_{A1-A3} = \frac{\text{Impact A1-A3 par UD}}{\text{Volume d'une UD (m}^3\text{)}}$$

3.5.6.2 La proportionnalité du transport et l'unité t·km (Module A4)

Le module A4 est maintenu paramétrique afin d'en faire un levier de l'analyse de sensibilité. L'EPD fournit un impact de transport pour une distance de référence et une masse transportée données. On en extrait un facteur d'émission indépendant du kilométrage, exprimé en kgCO₂éq/(m³·km), en divisant l'impact A4 par le produit du volume transportée (en mètre cube) et de la distance de référence (en km) :

$$FE_{A4} = \frac{\text{Impact A4 par UD}}{\text{Volume transportée (m}^3\text{) × Distance de référence (km)}}$$

Ce facteur, une fois isolé, peut être réinjecté pour n'importe quelle distance. Pour un volume de matériau (m³), et une distance choisie d (km), l'impact transport devient ($V \times d \times FE_{A4}$).

L'intérêt de l'unité m³·km pour découpler la masse et la distance est souligné par Pomponi et Moncaster (2018) : contrairement à un facteur rapporté uniquement à la masse, le kgCO₂éq/(m³·km) exige de connaître à la fois le volume transportée et le trajet parcouru, ce qui permet de différencier deux scénarios logistiques impliquant la même quantité de matériau. Le standard RICS (2023) traduit cette approche en règle opérationnelle: « Transport impacts should be calculated as follows: A4 = material or product mass (a) x transport distance (b) x carbon conversion factor outward (c1) + (empty running factor x carbon conversion factor returns (c2)) ». Cette approche est utilisée uniquement pour les matériaux variants des voiles, pour les autres éléments, le facteur de transport d'émission est uniquement divisé par l'unité fonctionnelle pour avoir les émissions par m³.

3.5.6.3 Proportionnalité volume et mise en œuvre

Pour le module A5, la même logique de proportionnalité au volume est reconduite : un facteur d'émission volumique est extrait de l'EPD en divisant l'impact de mise en œuvre par le volume d'une unité déclarée, puis appliqué directement aux quantités issues du modèle.

L'EN 15978 (2011) formalise cette approche pour l'ensemble des modules du cycle de vie : le potentiel de réchauffement global d'un module i s'écrit comme la somme, sur tous les produits

et services n , du produit de la quantité mise en œuvre ($a_{n,i}$) par le facteur d'émission correspondant. Cette équation générique justifie structurellement l'emploi d'un facteur rapporté à l'unité de métré, qu'il s'agisse de la production ou de la mise en œuvre. Le standard RICS (2023) précise que les données A5 figurant dans les EPD peuvent être utilisées telles quelles pour l'évaluation, à condition que les méthodes de pose et les hypothèses de pertes coïncident avec les pratiques réelles du projet.

$$FE_{A5} = \frac{\text{Impact A5 par UD}}{\text{Volume d'une UD (m}^3\text{)}}$$

Retrouver les valeurs des facteurs de chaque matériau issu des EPD récapitulée dans des tableaux en annexe.

3.6 Méthodologie d'estimation des coûts de construction

L'estimation financière des variantes structurelles et matérielles s'effectue en associant de manière dynamique les quantités géométriques extraites du modèle paramétrique Grasshopper aux prix unitaires de référence issus du bordereau des prix unitaires réalisé par l'ABEX. Les volumes de béton, de bois et de maçonnerie, ainsi que les surfaces d'isolant, d'enduits et de chapes sont issus directement du Quantity Take-Off (QTO) généré par Karamba3D et Grasshopper.

Afin d'assurer la cohérence et la comparabilité temporelle des estimations, l'ensemble des prix a été harmonisé pour représenter le niveau des prix de juillet 2025, en utilisant l'indice officiel de l'Association des Experts de Belgique (ABEX). L'indice ABEX est la référence nationale pour mesurer l'évolution des coûts de construction résidentielle en Belgique. Les formules d'indexation appliquées pour ramener les coûts historiques à l'indice de juillet 2025 ($\text{Index}_{\text{juillet 2025}} = 1057$) sont les suivantes :

- **Pour les prix issus du bordereau ABEX de janvier 2023**

($\text{Index}_{\text{janvier 2023}} = 1004$) :

$$\text{Prix}_{\text{indexé}} = \text{Prix}_{\text{base 2023}} \times \frac{1057}{1004} \approx \text{Prix}_{\text{base 2023}} \times 1,0528 \quad (+5,28 \%)$$

- **Pour les prix issus de l'offre du fabricant JUWO de janvier 2022** ($\text{Index}_{\text{janvier 2022}} = 906$) :

$$\text{Prix}_{\text{indexé}} = \text{Prix}_{\text{base 2022}} \times \frac{1057}{906} \approx \text{Prix}_{\text{base 2022}} \times 1,1667 \quad (+16,67 \%)$$

Pour les matériaux non référencés directement dans les bordereaux nationaux ou les devis de l'étude (tels que le CLT ou les blocs de terre comprimée de BC Materials), des tarifs issus du

marché régional belge ont été adoptés et indexés selon la même méthodologie. Un tableau récapitulatif des prix de chaque matériau est disponible en annexe.

3.6. Plan D'expérience

3.6.1 Analyses comparatives

L'interaction de multiples paramètres architecturaux génère un espace de conception complexe lors d'une évaluation computationnelle (Wang et al., 2020). L'exploration de cet espace exige l'élaboration d'un plan d'expériences rigoureux pour structurer les itérations. La première étape de ce plan requiert un ancrage basé sur un cas d'étude réel pour garantir la validité des résultats (Mouton et al., 2022). Le bâtiment public de référence évalué fixe les constantes géométriques initiales : en R+1, une portée structurelle de 4,5 m, une hauteur de plancher à plancher (HSP) de 3,3 m et un ratio d'ouverture (WWR) de 37 %. Ces valeurs constituent le scénario central du plan d'expériences. Pour isoler l'influence stricte de chaque variable sur le bilan environnemental, l'étude comparative modifie un seul paramètre à la fois (Dasse et al., 2026). Lors de cette variation individuelle, l'ensemble des autres paramètres géométriques est strictement maintenu à sa valeur de base issue du cas d'étude (Shi et al., 2025). Enfin, afin de refléter les exigences d'un bâtiment administratif, les plages de variation de chaque paramètre encadrent ce point d'ancrage en s'appuyant sur les standards de l'architecture tertiaire.

La détermination de la plage de portée structurelle, fixée entre 4,0 m et 8,0 m, répond aux besoins de flexibilité spatiale des fonctions administratives. Mena (2020) modélise l'efficacité structurelle en se basant sur le fait qu'un immeuble de bureaux standard possède « une trame de poteaux de 8,0 x 8,0 m ». Parallèlement, pour générer des géométries de bureaux modulaires, Dasse et al. (2026) définissent des largeurs de pièces allant de 3,40 m à 6,60 m. La plage retenue de 4,0 m à 8,0 m avec un pas de 0,5 m englobe ainsi la portée initiale de 4,5 m tout en respectant les limites dimensionnelles inhérentes à la maçonnerie porteuse.

L'ajustement de la hauteur d'étage, variant de 2.8 m à 6 m, prend en compte les extremums bas et haut. L'aménagement des espaces administratifs impose des réservations spatiales en façade et sous le plafond. Dasse et al. (2026) modélisent cette contrainte en arrêtant les menuiseries « à 50 cm sous le plafond pour laisser de la place aux radiateurs, aux câbles et aux conduites d'eau de chauffage ». Cette exigence technique requiert une dimension verticale supérieure aux standards résidentiels, validant l'exploration paramétrique autour de l'ancrage initial de 3,3 m.

La variation du ratio d'ouverture (WWR), établie entre 20 % et 50 %, équilibre la nécessité d'autonomie lumineuse et le contrôle des charges de refroidissement. Les recherches paramétriques sur l'enveloppe tertiaire. Dans leur modèle de conception de bureaux, Dasse et al. (2026) précisent que « le WWR peut prendre trois valeurs, qui ont été sélectionnées selon les conclusions de Goia (2016), à savoir 30 %, 40 % et 50 % ». Pour la borne inférieure, l'optimisation énergétique de façades tertiaires démontre que « le WWR optimal est de 20-

30% » pour limiter la surchauffe (Abdou et al., 2022). L'intégration de ces extrêmes 20 % à 50 % encadre de manière justifiée le ratio initial de 37 % évalué dans le cas d'étude.

Tableau récapitulatif du plan d'expériences paramétrique

Paramètre	Valeur cas d'étude	Plage de variation testée	Valeurs
Nombre de niveaux	R+1	R+0 à R+3	R+0; R+1; R+2; R+3 ; R+4
Portée structurelle	4,5 m	4,0 m à 8,0 m	4,0 ; 4,5 ; 5,0 ; 5,5 ; 6,0 ; 6,5 ; 7,0 ; 7,5 ; 8,0 m
Hauteur d'étage (HSP)	3,3 m	3,0 m à 4,0 m	2.8 ; 3,0 ; 3,3 ; 3,6 ; 3,8 ; 4,0 ; 4.4 ; 4.8 ; 5.0 ; 5.4 ; 5.8 ; 6.0 m
Ratio d'ouverture (WWR)	37 %	20 % à 50 %	20 % ; 30 % ; 37 % ; 40 % ; 50 %

Fig 14. Table récapitulative du plan d'analyse comparative

3.6.2 Analyses de sensibilités

L'évaluation de la stabilité et de la robustesse des modèles d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) paramétrique repose sur l'analyse de sensibilité. Selon Wang et al. (2020), cette discipline étudie la manière dont les incertitudes sur les résultats de sortie peuvent être attribuées aux incertitudes sur les données d'entrée. Dans le cadre de ce plan d'expériences, l'analyse de sensibilité est introduite pour éprouver les hypothèses de dimensionnement technique et d'équivalence fonctionnelle établies dans les sections précédentes (Gervásio & Dimova, 2018 ; Röck et al., 2020). Afin d'évaluer la robustesse du modèle face à ces choix de cadrage et d'identifier les seuils de basculement carbone entre les familles de matériaux, six analyses de sensibilité distinctes sont menées.

Premièrement, la sensibilité à la performance thermique est évaluée. Comme exposé dans la section relative aux choix de l'unité fonctionnelle, la transmittance thermique de base a été fixée à $U = 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ conformément aux exigences réglementaires wallonnes minimales. Ce test de sensibilité fait varier ce coefficient cible sur deux seuils plus restrictifs : $U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (standard basse énergie ou semi-passif ; Mouton et al., 2022) et $U = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (standard de la maison passive ; Mouton et al., 2023). De plus, l'influence du type d'isolant est testée en remplaçant la laine de roche (référence de base) par de la ouate de cellulose (isolant biosourcé). Cette double variation permet d'analyser le comportement environnemental des parois sous des exigences thermiques très strictes. L'épaisseur de l'isolant s'ajustant automatiquement pour maintenir l'équivalence thermique statique (Brahma et al., 2024 ; Hollberg & Ruth, 2016).

Deuxièmement, la sensibilité à l'inertie thermique dynamique est analysée. L'équivalence thermique dynamique de base a été fixée à $152 \text{ kg}/\text{m}^2$, ce qui impose l'ajout d'une chape de

béton compensatoire pour combler leur déficit de masse (Migoni Alexandre et al., 2025). Le test de sensibilité fait varier la masse surfacique de chape cible sur quatre niveaux :

- 75 kg/m² (classe « très légère » de la PEB / configuration sans chape additionnelle),
- 110 kg/m² (classe « moyenne » de la norme ISO 52016-1),
- 152 kg/m² (valeur de référence de l'étude),
- 175 kg/m² (classe « lourde » de la norme ISO 52016-1),
- 200 kg/m²,
- 260 kg/m² (classe « très lourde » de la norme ISO / seuil d'Asdrubali et al., 2023),
- 350 kg/m² (classe « lourde » de la PEB).

Ce test permet d'analyser l'impact environnemental de la masse de ciment ajoutée par rapport au risque d'aberration écologique et de saturation thermique mis en évidence par Cabeza et al. (2021) et de voir la pénalisation des variantes légères au niveau de l'inertie thermique.

Troisièmement, la sensibilité aux charges variables d'exploitation (Q) est introduite. La performance d'un système constructif dépend directement de sa capacité portante sous sollicitations gravitationnelles (Mena, 2020). Afin d'évaluer la réponse mécanique différentielle des matériaux porteurs sélectionnés, les charges d'exploitation variables (Q) appliquées aux planchers de la trame sont modifiées selon les catégories de l'Eurocode 1 (EN 1991-1-1) :

- Q = 2,0 kN/m² (bureaux individuels légers, Catégorie A),
- Q = 3,0 kN/m² (bureaux collectifs standard, Catégorie B — valeur de base de l'étude),
- Q = 4,0 kN/m² (salles de réunion/salles de classe, Catégorie C1),
- Q = 5,0 kN/m² (halls administratifs/salles de conférence, Catégorie C3)
- Q = 7,5 kN/m² (locaux d'archives et de stockage, Catégorie E1).

L'accumulation de ces charges influence la descente de charges séquentielle (Navaro Auburtin et al., 2024), modifiant le flambement des parois verticales en maçonnerie de terre crue (BTC) ou de terre cuite et contraignant l'épaisseur minimale des éléments.

Quatrièmement, la sensibilité au matériau de parement extérieur est évaluée. Les parements secondaires et finitions sont souvent exclus des études structurelles de base (Souaid et al., 2024). L'étude teste l'impact environnemental de trois options de parement courantes : un enduit à la chaux (perspirant et conventionnel avec la terre crue), un bardage en bois (léger et écosourcé) et un parement en briques de parement (lourd et conventionnelle dans l'industrie). Cette analyse permet de comprendre la sensibilité de l'étude face aux choix de parement réalisé dans l'équivalence fonctionnelle.

Cinquièmement, la sensibilité aux distances d'approvisionnement des matériaux (étape A4) est quantifiée pour évaluer le fardeau logistique de la masse. La brique de terre compressée (BTC), par sa densité, est un matériau lourd dont l'impact du transport amont (A2) et du transport vers le chantier (A4) représente généralement plus de 80% des émissions de toutes les catégories d'impact (Fernandes et al., 2019 ; Arduin et al., 2022). Le bois massif CLT, plus léger mais souvent importé de régions manufacturières plus éloignées, affiche une sensibilité différente (Hemmati et al., 2024). Les distances d'approvisionnement de l'étude varient sur six paliers pour représenter trois scénarios géographiques réels et normatifs (RICS, 2023) : le circuit Local (50 et 100 km ; RICS, 2023), le circuit Régional (150 et 200 km) et le circuit National/Transfrontalier (300 et 400 km). Ce test vise à identifier des potentiels seuils critiques à partir desquels le transport routier vient détruire le bénéfice environnemental lié à la faible empreinte carbone de production (A1-A3) d'un matériau écosourcé (Duan et al., 2022 ; Gervásio & Dimova, 2018).

Sixièmement, la comptabilisation du carbone biogénique est évaluée en sensibilité. Conformément aux choix décrits dans la section et aux recommandations de la RICS (2023), le stockage temporaire du carbone biogénique a été exclu du bilan de base en raison des fortes incertitudes temporelles liées à la fin de vie du bois (modules C3/C4) (Andersen et al., 2021). Inclure cette variable en sensibilité permet de mettre en valeur le potentiel du bois d'ingénierie (CLT & LC). Néanmoins, la valorisation du stockage biogénique reste conditionnée à une intégration rigoureuse de la fin de vie des matériaux dès la phase de conception (Souaid et al., 2024).

3.6.3 Indicateurs

Pour évaluer de manière holistique les performances des différentes variantes matérielles et géométriques, trois indicateurs de sortie clés sont mesurés et analysés à chaque itération.

Le premier indicateur est le Potentiel de Réchauffement Global (GWP A1-A5), exprimé en kilogrammes d'équivalent dioxyde de carbone (kgCO_{2e}). Il constitue l'indicateur environnemental principal de cette étude pour évaluer le carbone incorporé initial (Röck et al., 2020). Les émissions sont calculées de manière globale pour refléter l'impact absolu de chaque itération. Cette évaluation absolue repose sur l'unité fonctionnelle définie pour cette étude comparative : une section complète de bâtiment prédimensionnée conformément aux Eurocodes, respectant une transmittance thermique limite de $U_{\max} = 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ et une masse surfacique équivalente de $220 \text{ kg}/\text{m}^2$. Toutes les variantes partagent la même surface nette habitable, les mêmes charges d'exploitation surfaciques et les mêmes éléments structurels secondaires (Navaro Auburtin et al., 2024).

Le deuxième indicateur est la quantité de matériau mise en œuvre, exprimée en kilogrammes (kg). Cet indicateur sert de proxy physique pour mesurer l'efficacité et l'intensité matérielle. La construction de bâtiments étant responsable de la moitié de l'extraction mondiale de ressources minérales (Mena, 2020), minimiser la masse globale est une exigence environnementale fondamentale (Arduin et al., 2022).

Le troisième indicateur est le coût d'acquisition de la structure, évalué en euros (EUR). L'optimisation écologique se heurte fréquemment à des barrières économiques et à la perception de surcoûts par les maîtres d'ouvrage (Bacheva & Raposo Grau, 2025). Le coût est calculé en multipliant les volumes de matériaux extraits du modèle Grasshopper par les prix unitaires issus de l'index officiel de la construction de l'Ordre des Architectes Belges. L'articulation conjointe de la performance mécanique, de la viabilité budgétaire et de l'impact carbone permet d'établir une analyse de comparaison réaliste et équilibrée (Kayaçetin et al., 2023).

3.6.4 Analyses multi-critères

Notre étude vise à étudier des indicateurs intrinsèquement contradictoires. Typiquement, la réduction de l'impact carbone d'une structure (GWP A1-A5) peut contrecarrer les impératifs de minimisation des coûts financiers ou de maximisation de l'efficacité spatiale (Gerber & Lin, 2013). Pour résoudre ces arbitrages complexes, l'exploration manuelle s'avère limitante. Cette étude adopte un flux de travail d'optimisation multi-objectif (MOO) automatisé dans l'environnement paramétrique Rhinoceros/Grasshopper (Caetano & Leitão, 2020 ; Cheng et al., 2025). Contrairement aux approches traditionnelles qui agrègent les critères par des coefficients de pondération, l'optimisation multi-objectif cherche à identifier l'ensemble des compromis optimaux (Wang et al., 2020). Cette étude utilise une approche exhaustive pour réaliser cette analyse multicritère. Elle consiste à réaliser un balayage systématique qui calcule de manière déterministe chaque point d'un espace de recherche (Belz & Kromoser, 2025). Hollberg et Ruth (2016) montrent que si cette approche devient irréalisable pour des espaces très volumineux (leur modèle à 373,8 millions de solutions exigeant 432 jours de calcul), elle est extrêmement rapide et avantageuse pour des espaces de taille modérée (comme les 1230 combinaisons étudiées ici), garantissant l'identification du front de Pareto exact.

Le plugin Anemone sous Grasshopper constitue le support technologique de cette exploration. Il s'agit d'une extension de conception algorithmique permettant d'outrepasser le flux linéaire de données en arbre de Grasshopper en introduisant des boucles itératives et récursives (Dasse et al. 2026). Le plugin injecte ainsi séquentiellement chaque ensemble de paramètres (portée, nombre de niveaux, pas d'étage, matériau) dans le modèle structurel Karamba3D. Les résultats des indicateurs carbones et de cout sont exportés automatiquement vers Excel grâce à un script Python ou ils seront traités pour identifier les solutions de Pareto.

Le résultat de l'algorithme exhaustifs n'est pas une solution unique parfaite, mais un ensemble de solutions de compromis non dominées constituant le front de Pareto (Wang et al., 2020). Par définition, un point sur ce front est optimal au sens de Pareto car il est impossible d'améliorer l'un de ses indicateurs sans dégrader simultanément une autre métrique (Wang et al., 2020). Ces concepts et outils forment le socle méthodologique permettant de structurer le plan d'expériences multicritères.

L'espace de recherche est généré par le produit de quatre dimensions :

1. La portée utile de la trame (P) : Variant de 4,0 m à 8,0 m par pas discrets de 0,1 m (soit 41 valeurs).
2. Le nombre de niveaux (N) : Variant de 0 à 4 niveaux (soit 5 valeurs, de R+0 à R+4).
3. La hauteur du pas d'étage : 2 scénarios, la valeur du cas d'étude à 3,3m et un pas d'étage plus extrême à 4.5m.
4. Le matériau de paroi : Évalué sur 3 alternatives (CLT, BTC, BMA).

Soit un univers de $41 \times 5 \times 2 \times 3 = 1230$ variantes simulées.

La même équivalence fonctionnelle définie précédemment est utilisée à laquelle on y ajoute le ratio de vitrage (WWR) à 37%, valeur du cas d'étude. L'impact carbone et monétaire des fenêtres n'étant pas modélisé, cela introduirait un biais dans les résultats. Les itérations avec de grands

WWR, auraient des résultats plus faibles car moins de matière dans les murs et domineraient les résultats.

Les indicateurs de l'analyse multicritère retenue sont l'émission carbone surfacique exprimée en $\text{kgCO}_2\text{eq/m}^2$ et le coût surfacique en €/m^2 . Les paramètres géométriques de portée et de hauteur varient, il est donc impératif de normaliser par m^2 pour comparer l'efficacité spatiale d'alternatives de conception différentes (Röck et al., 2020 ; Weber et al., 2021).

Le post-traitement des 1230 résultats simulés est structuré pour neutraliser les biais et faire émerger les solutions optimales. Il repose sur deux étapes clés : la répartition des données par tranches de surface et le regroupement par configurations géométriques pour l'analyse des fronts de Pareto.

Comme évoqué dans la partie équivalence fonctionnelle, l'utilisation d'indicateurs surfaciques avantage artificiellement les bâtiments plus volumineux (Mouton et al., 2024). Pour neutraliser ce biais et comparer les modes constructifs à « échelle de programme » constante, l'univers de 1230 résultats est découpé en trois tranches de surface de trames très précises (Feickert & Mueller, 2025). Pour chaque tranche, seules les configurations géométriques (combinaison de la portée P et du nombre d'étages N) capables d'atteindre cette surface cible sont conservées et comparées :

1. Trame de petite échelle, 85 à 115 m^2 de plancher
2. Trame de moyenne échelle, 180 à 220 m^2 de plancher
3. Trame de grande échelle 280 à 350 m^2 de plancher

L'analyse des solutions se fait par tranche de surface cible. Les variantes de simulation sont regroupées visuellement selon le nombre de niveaux (de R+0 à R+4), par scénario de pas d'étage (3,3 m ou 4,5 m) et par matériaux de voile (CLT, BMA, BTC). Cela permettra une identification des typologies d'itérations et de leur optimum au travers de trois axes d'étude :

- Analyse Intra-Matériau : Pour un matériau donné, cette analyse détermine quelle configuration géométrique s'approche le plus de la performance optimale.
- Analyse Inter-Matériaux : Elle consiste à comparer un même regroupement géométrique entre le CLT, la BTC et le BMA. À géométrie et hauteur d'étage et pas d'étage équivalents, cette comparaison permet de quantifier le surcoût financier et le bénéfice carbone de la substitution matérielle.
- Optimum : Enfin l'analyse du front de Pareto permet de dégager les meilleures configurations et de dresser les domaines de pertinence de chaque matériau.

4. Résultats

4.1 Analyse cas d'étude

À la suite de la définition du plan d'expériences qui clôture la méthodologie, cette section amorce la présentation des résultats de la simulation paramétrique. Comme première étape de cette analyse, avant d'aborder les comparaisons globales et les analyses de sensibilité, les indicateurs physiques, économiques et environnementaux sont décomposés par élément structural sur le cas d'étude de référence en configuration R+1. Cette décomposition permet d'identifier les contributeurs majeurs au sein de chaque variante constructive (CLT, BMA et BTC). L'analyse par éléments est réalisée sur la configuration du cas d'étude réel (portée : 4.5m, R+1, WWR : 37% et pas d'étage : 3.3m).

4.1.1 Émissions CO₂ (GWP fossile A1-A5) par élément

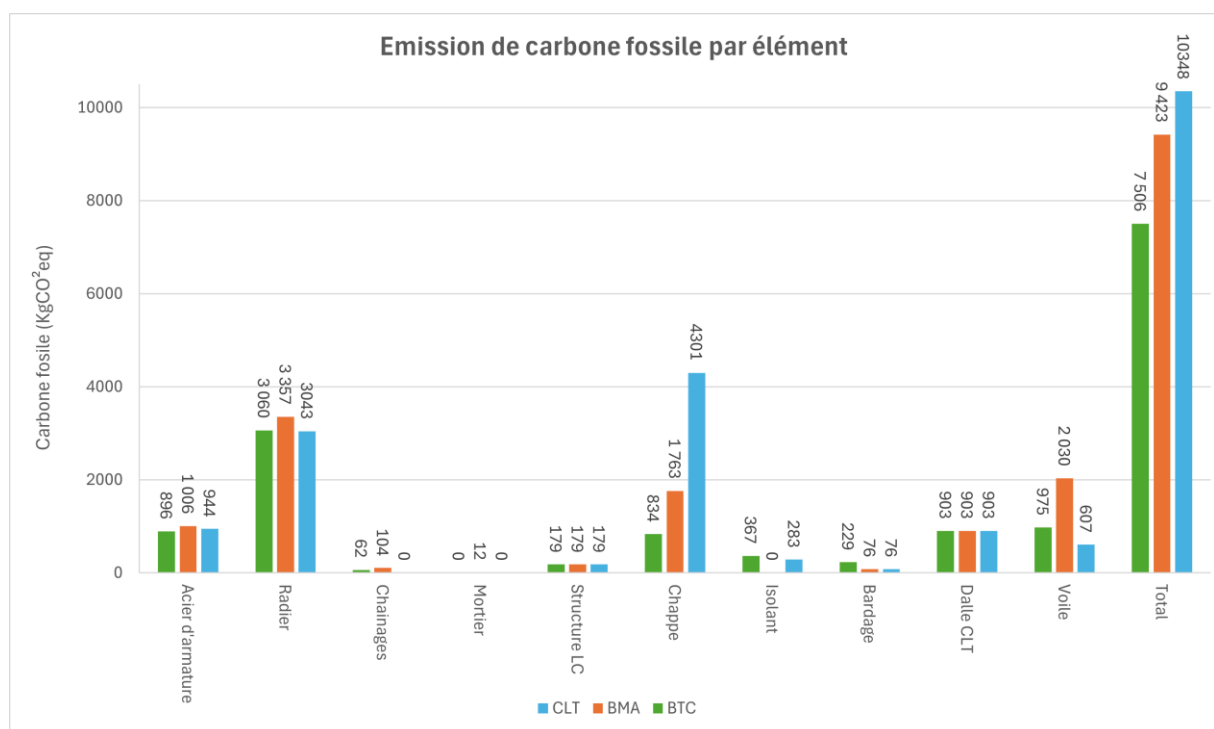


Fig 15. Graphique détaillant les émissions carbone fossiles par élément

Le bilan carbone fossile global de la structure complète est de 10 348,35 kgCO₂eq pour le CLT, 9 422,52 kgCO₂eq pour la BMA et 7 505,87 kgCO₂eq pour la BTC.

Le principal poste d'impact est le radier oscillant dans une plage étroite (3 043,03 kgCO₂eq (CLT), 3 356,99 kgCO₂eq(BMA) et 3 059,63 kgCO₂eq (BTC)). Malgré la forte densité de la maçonnerie lourde en BTC, sa charge n'entraîne pas de surdimensionnement carbone significatif des fondations en radier.

La chape en béton s'impose comme le poste le plus déterminant sur la différenciation d'émissions des 3 scénarios. La variante CLT avec 4 300,53 kgCO₂eq, représentant 41,5 % de son bilan carbone global est largement pénalisé par la cible d'inertie thermique équivalente (152 kg/m²). Pour la maçonnerie de BMA (orange) et de BTC (vert), ce besoin de chape additionnelle est fortement diminué, le poste se réduisant à respectivement 1 763,33 kgCO₂eq et 834,00 kgCO₂eq.

Les éléments en béton présents dans la trame étudiée (radier et chape) représentent entre 80% et 65% des émissions totales si l'on inclut l'impact des aciers d'armature. Cela illustre la prédominance des matériaux de structure conventionnels à fortes émissions dans le bilan carbone et limite les bénéfices environnementaux directs liés à l'usage de parois verticales écosourcés.

L'impact des voiles des façades n'arrive qu'en troisième avec de fort écart. La BMA représente le poste le plus émissif avec 2 029,68 kgCO₂eq (21,5 % du total), suivie par la BTC à 975,20 kgCO₂eq (10,3 % du total) et le CLT à seulement 606,65 kgCO₂eq (5,9 % du total).

Enfin l'impact des éléments de l'équivalence fonctionnelle, l'isolation, le bardage et les chainages restent limités. Combinés ces éléments représentent respectivement 3.5% pour le CLT, 1.9% pour la BMA et 8.9% pour la BTC de la part des émissions globales.

4.1.2 Masse (Kg) et coût (Kg) par élément

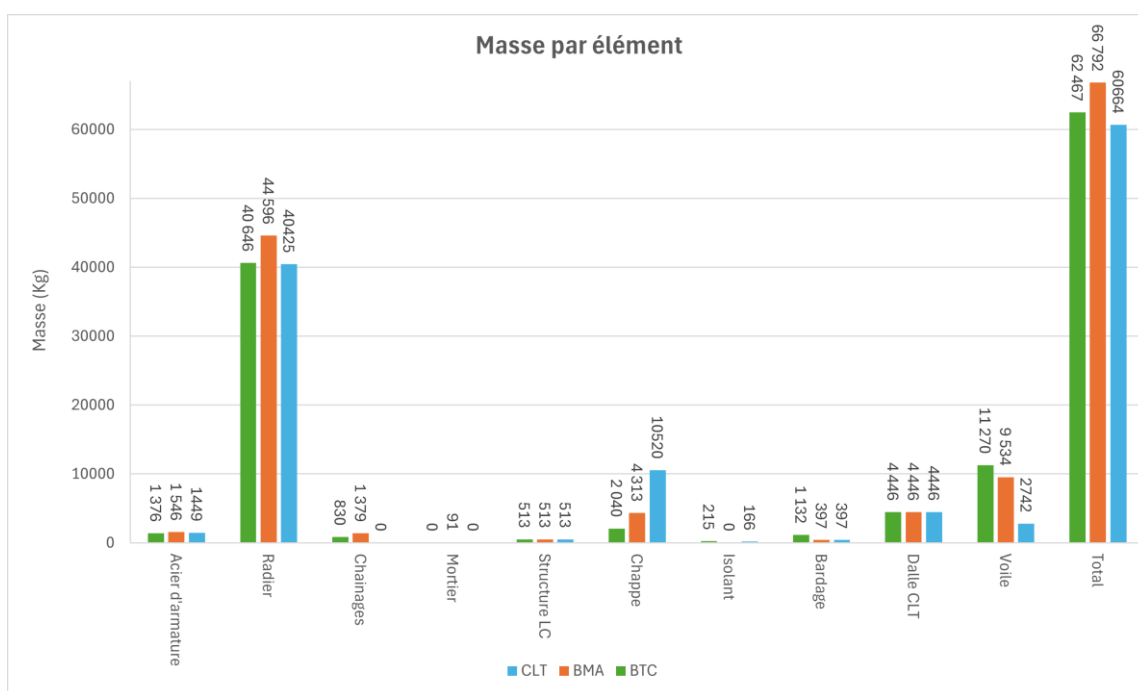


Fig 15. Graphique détaillant la répartition de la masse entre les éléments

Le poids total du bâtiment s'élève à 60 664,30 kg pour le CLT, 66 791,55 kg pour la BMA et 62 466,50 kg pour la BTC. De la même manière que pour le carbone en représentant plus de 65% de la masse, le radier lisse les variations physiques entre scénarios. On observe le poids des murs en BTC (11270 Kg) qui sont 4 fois plus lourd que ceux en CLT. La BMA s'approche de la BTC avec 9534 Kg.

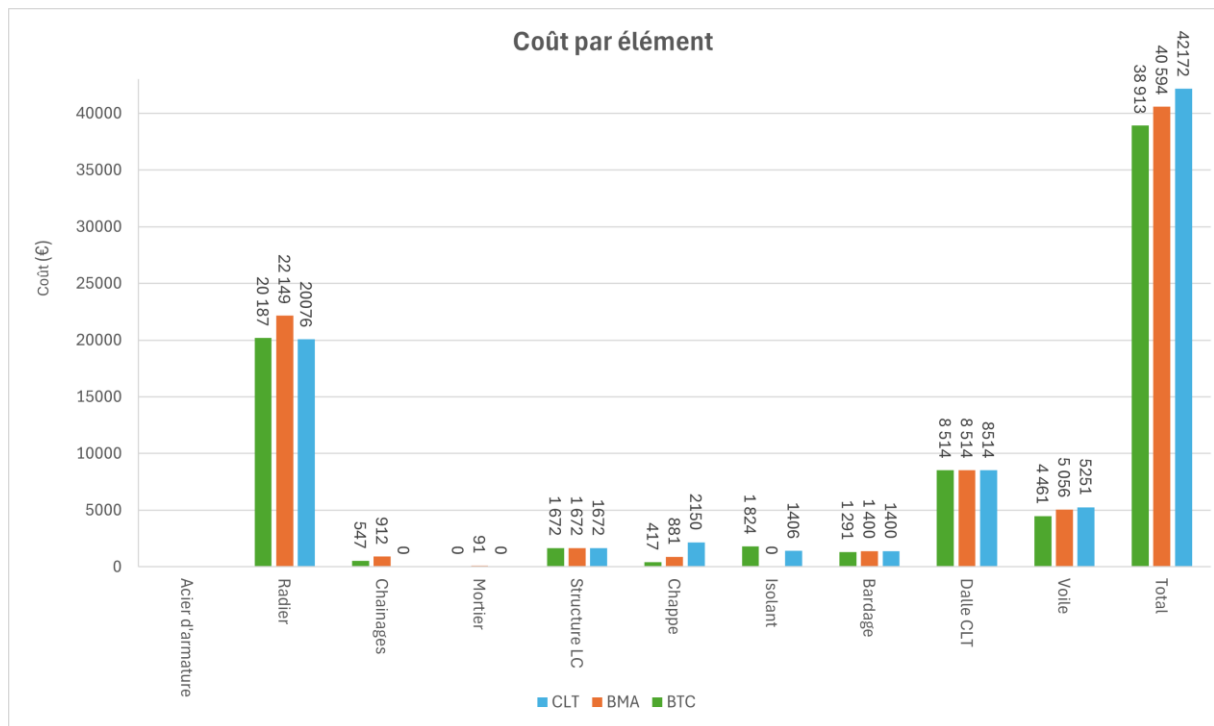


Fig 16. Graphique détaillant la répartition des coûts entre les éléments

L'analyse des coûts totaux s'établit à 42 171,70 € pour le CLT, 40 593,67 € pour la BMA et 38 913,00 € pour la BTC.

Les coûts sont aussi prédominés par les matériaux structurels invariants avec le radier représentant environ 50% des coûts de la trame, la dalle en CLT communes des étages (8 514,00 € pour les trois variantes) et la structure LC en poteaux-poutres (1 672,22 €), le tout représentant plus de 70 % du coût de construction. Le coût des voiles de façades est comparable d'un matériau à l'autre. Les panneaux de voiles en CLT s'élèvent à 5 250,54 €, la maçonnerie de BMA à 5 056,41 € et les murs en BTC à 4 460,50 €. Les différences entre scénarios se dessinent sur les éléments de l'équivalence fonctionnelle. La BTC exige 1 824,35 € d'isolant rapporté et 547,00 € de chaînages en béton armé, mais n'impose que 416,88 € de chape. À l'inverse, le CLT n'a aucun chaînage mais intègre 1 406,35 € d'isolant et 2 149,70 € de chape lourde, ce qui maintient les trois variantes dans un intervalle financier étroit (écart maximum de 7,7 % entre CLT et BTC).

L'analyse par éléments montre la nécessité d'une ACV globale dès l'esquisse pour capter les transferts d'impact (comme la chape du CLT ou l'isolant de la BTC). L'équivalence fonctionnelle

de base permet de limiter ces biais. Ce choix méthodologique simplifié présente toutefois des limites de précision par rapport à une simulation thermique dynamique (STD) complète, ce qui sera développé dans la section des limites de l'étude.

4.2 Analyses comparatives

4.2.1 Nombre d'étages

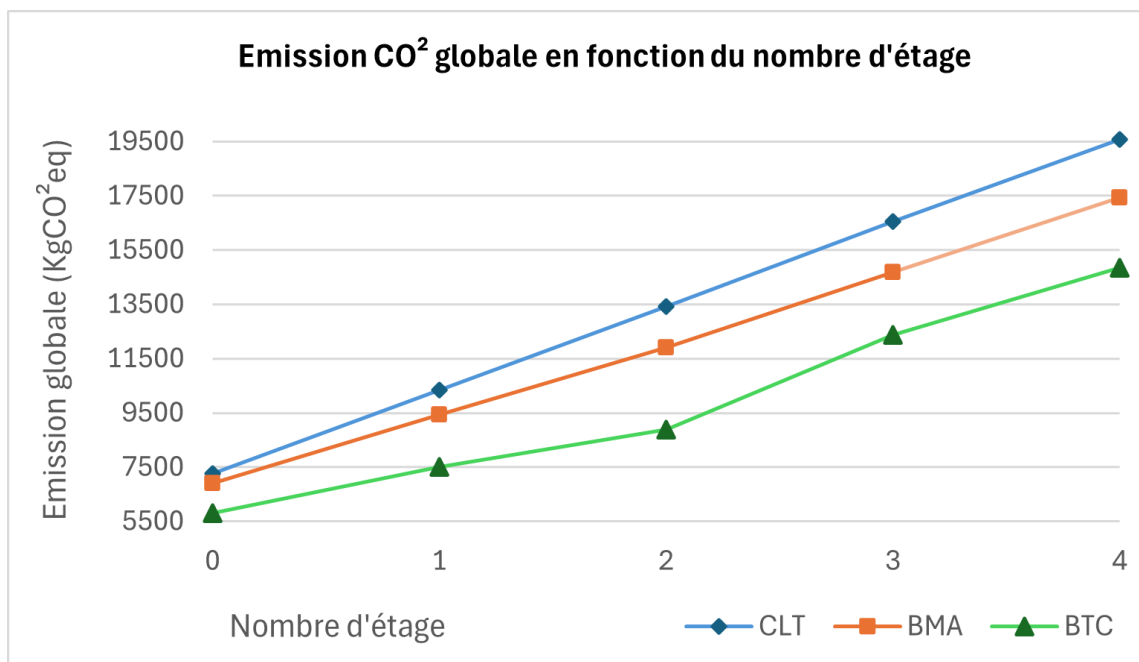


Fig 17. Graphique détaillant l'évolution des émissions carbone fossiles en fonction du nombre d'étages

La hauteur du bâtiment pilote la descente de charges, constituant le principal facteur de croissance linéaire du bilan carbone pour la variante CLT (bleu) et la BMA (orange). Pour le CLT, les émissions passent de 7 260,19 kgCO₂eq (R+0) à 13 429,13 kgCO₂eq (R+2) puis à 19 574,84 kgCO₂eq (R+4). Le BMA émet en moyenne 10% de moins, suit une croissance linéaire très similaire, progressant de 6 913,01 kgCO₂eq (R+0) à 11 915,98 kgCO₂eq (R+2) puis à 17 440,32 kgCO₂eq (R+4) ; bien qu'elle intègre des chaînages béton armé absents du CLT. Enfin la BTC conserve les émissions les plus basses à toutes les hauteurs (5 807,59 kgCO₂eq à R+0 et 14 857,96 kgCO₂eq à R+4). Sa pente s'accélère légèrement à partir de R+2 (passant de +1 366 kgCO₂eq de R+1 à R+2 à +3 495 kgCO₂eq de R+2 à R+3), traduisant l'intensification des contraintes liée à la descente de charge.

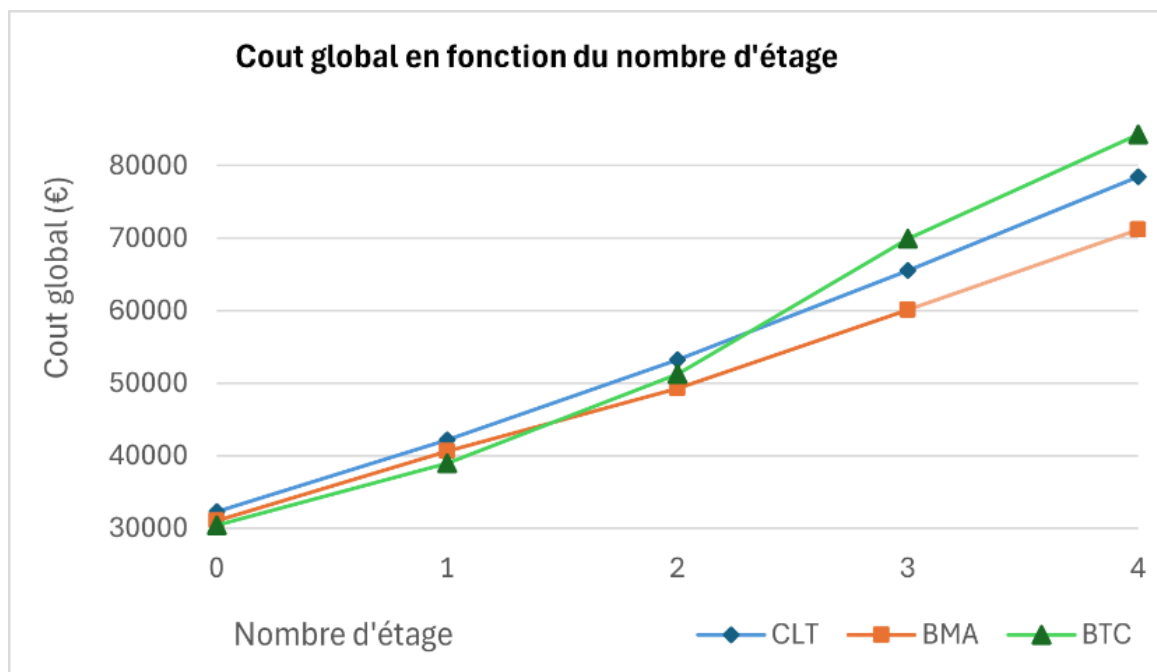


Fig 18. Graphique détaillant l'évolution des coûts en fonction du nombre d'étages

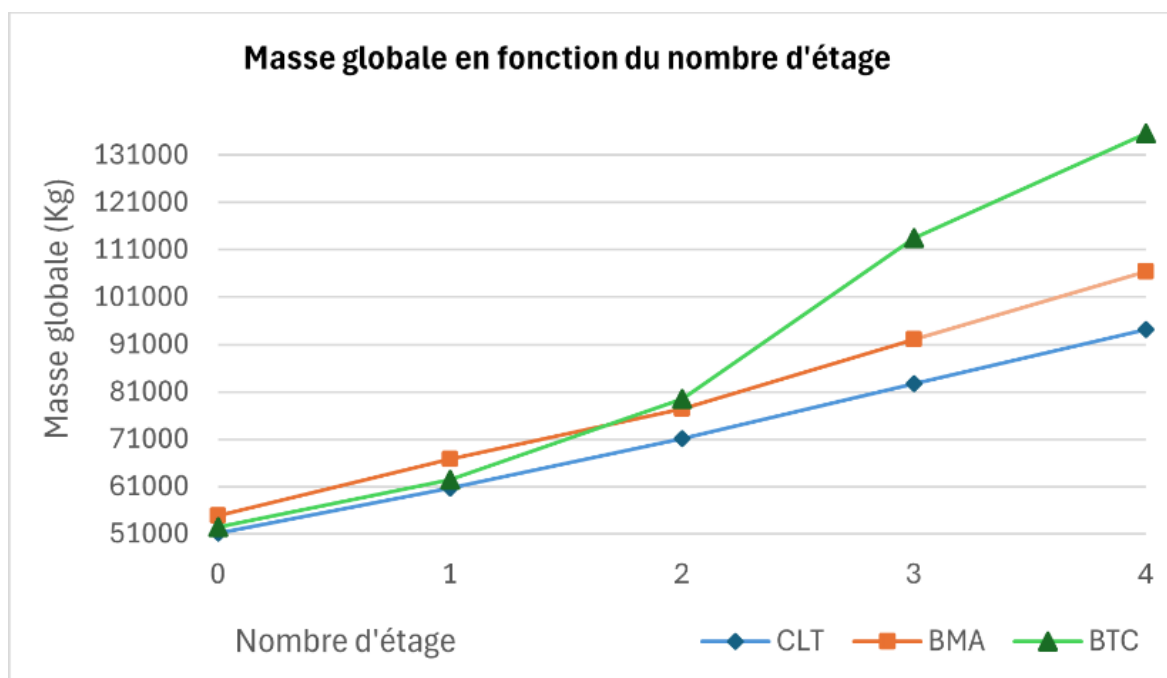


Fig 19. Graphique détaillant l'évolution de la masse en fonction du nombre d'étages

Les indicateurs de coût et de masse mettent en évidence cette rupture de la BTC à partir du R+2. Sur les deux 1^{er}s niveaux les 3 matériaux ont des coûts et masse similaires allant de 31 221 € $\pm$ 3,3 % et 52 783 kg $\pm$ 3,8 % (R+0) à 51 209 € $\pm$ 3,9 % et 75 982 kg $\pm$ 6,6 % (R+2). Puis l'accroissement de l'épaisseur des parois de BTC pour assurer la stabilité mécanique la fait grimper à 135 506,70 kg et 84 346,45 € en R+4, soit un surpoids de 43 % par rapport au CLT et de 27 % par rapport à la BMA. Quant à eux ils gardent un comportement linéaire jusqu'en R+4 avec le CLT + cher mais — lourd. Les résultats démontrent que la hauteur induit une

transition de comportement mécanique : le CLT et la BMA conservent un dimensionnement et des indicateurs linéaires, validant leur robustesse structurelle en hauteur. A l'inverse la BTC atteint sa limite d'efficacité mécanique à R+2.

4.2.2 Portée (4,0m → 7,5m)

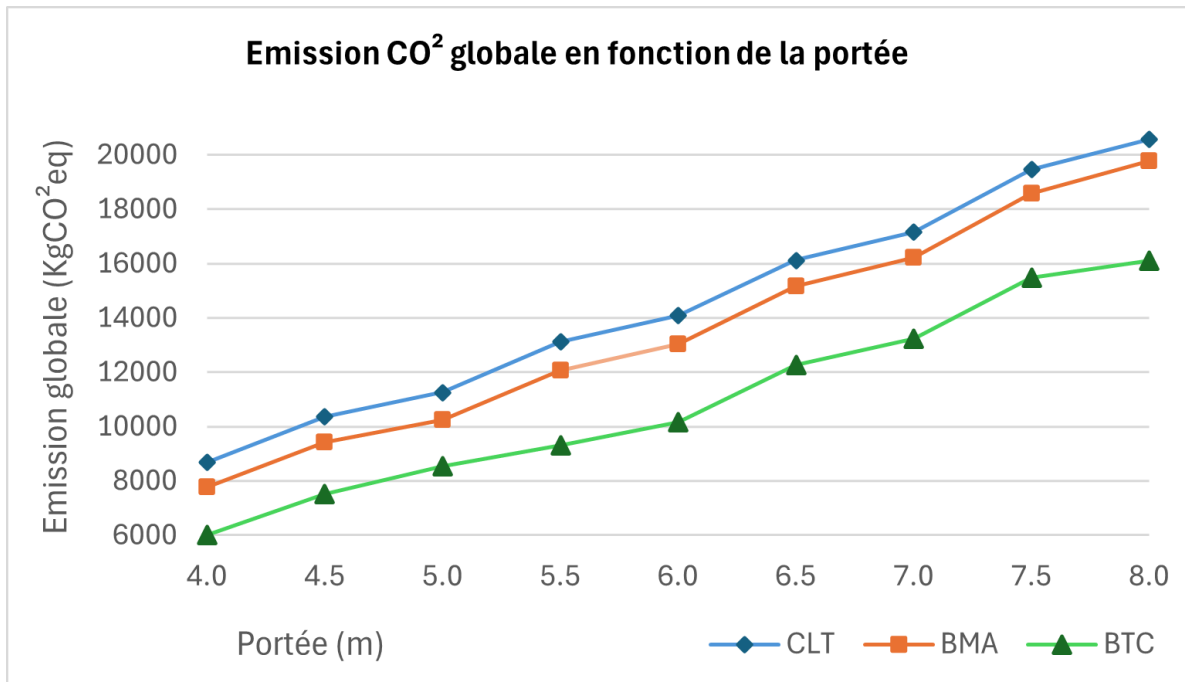


Fig 20. Graphique détaillant l'évolution des émissions carbone fossiles en fonction de la portée

L'augmentation de la portée engendre une croissance par paliers successifs des 3 indicateurs pour les trois variantes, reflétant les sauts d'épaisseur discrets imposés par Karamba3D pour les divers éléments structurels. Pour l'indicateur de coûts et de masses, les 3 scénarios varient de 33 592 € ± 6,0 % et 49 743 kg ± 4,4 % (4,0 m) à 84 232 € ± 5,7 % et 148 296 kg ± 7,3 % (8,0 m). La faible variation entre les 3 matériaux montre une domination de l'influence des éléments structurels horizontal invariants sur ce paramètre géométrique. Pour l'indicateur carbone, la BTC reste le matériau le moins émissif allant de 6 001,63 kgCO₂eq à 4,0m, 9 316,09 kgCO₂eq à 5,5 m pour finir à 15 473,69 kgCO₂eq à 7,5 m. Le CLT et la BMA sont très proches avec un écart d'environ 1 000 kgCO₂eq sur toute la plage et suivent la même croissance avec en moyenne 25 % pour la BMA et 34 % pour le CLT d'émissions supplémentaires que la BTC sur toute la plage. L'impact de la nature du mur issue des moments de flexion des éléments horizontaux reste limité. L'évolution des indicateurs est dictée par le dimensionnement des planchers CLT et poutre LC horizontaux (invariants). Malgré tout la BTC s'impose comme scénario le moins émissif.

4.2.3 Le pas d'étage (2,8m → 6,0m)

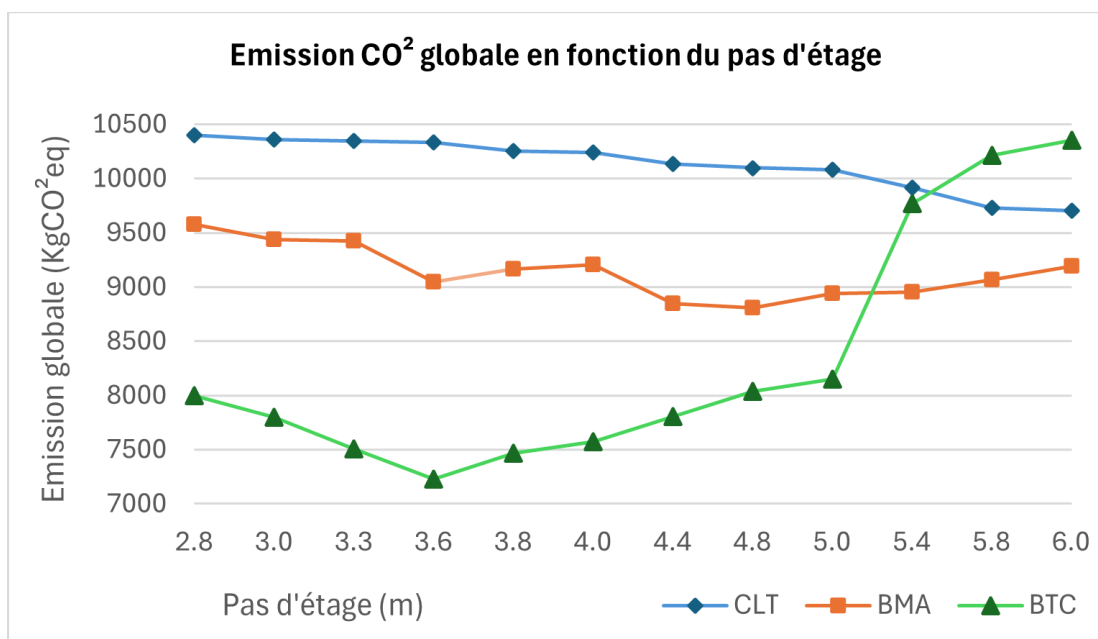


Fig 21. Graphique détaillant l'évolution des émissions carbone fossiles en fonction du pas d'étage

L'émission carbone en fonction de la variation de hauteur du pas d'étage diminue pour le CLT et la BMA. Le CLT passe de 10 397,85 kgCO₂eq (2,8 m) à 9 700,57 kgCO₂eq (6,0 m) ; la BMA recule de 9 579,07 kgCO₂eq (2,8 m) à 9 192,06 kgCO₂eq (6,0 m). Cette baisse met en avant une limite de l'équivalence d'inertie adoptée, un mur plus haut augmente la surface de maçonnerie ou de bois, ce qui accroît la masse de parois du local. L'algorithme réduit donc en proportion l'épaisseur de la chape sur le plancher CLT pour satisfaire le critère d'inertie globale. Cela permet d'entrevoir la proportion d'impact que représente la chape dans ces scénarios que l'on approfondira dans l'analyse de sensibilité. La BTC présente une courbe en cuvette : ses émissions diminuent de 7 995,10 kgCO₂eq (2,8 m) jusqu'à un minimum de 7 229,91 kgCO₂eq à 3,6, point où la masse du mur en terre est suffisante pour atteindre seule l'objectif d'inertie. Au-delà la BTC remonte pour exploser au-delà de 5,0 m (9 769,45 kgCO₂eq à 5,4 m et 10 354,05 kgCO₂eq à 6,0 m), la faible résistance au flambement de la terre crue imposant des sauts d'épaisseur de voiles très importants.

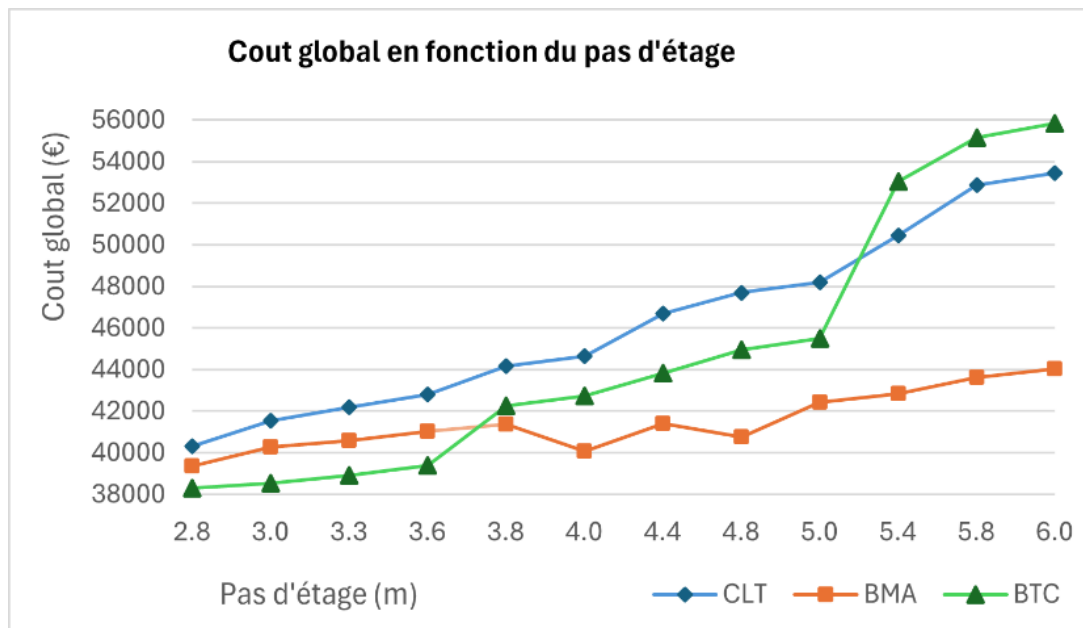


Fig 22. Graphique détaillant l'évolution des coûts en fonction du pas d'étage

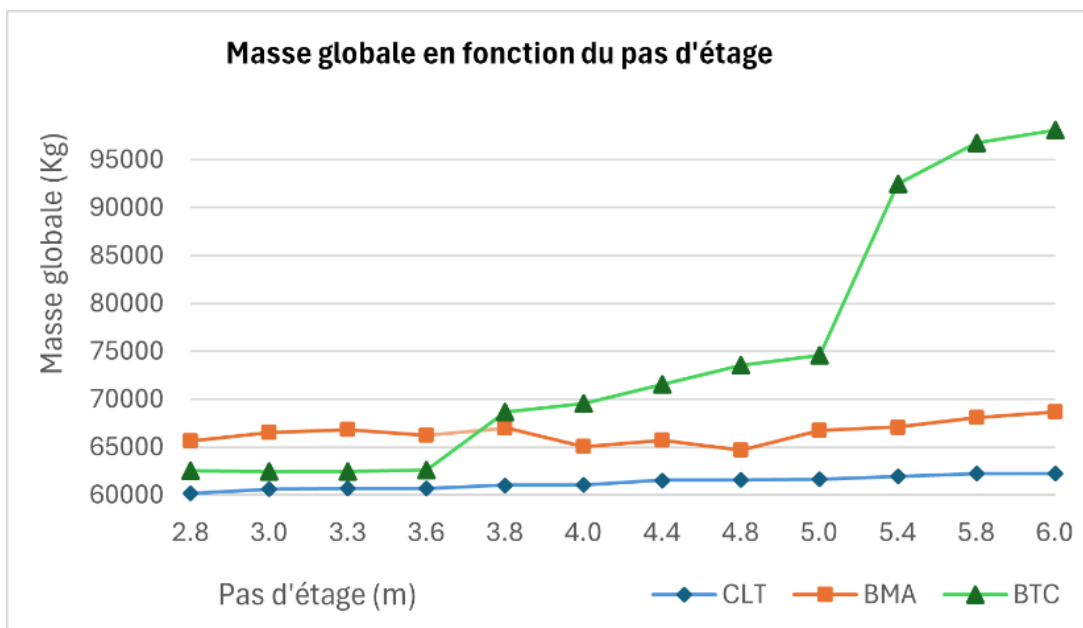


Fig 23. Graphique détaillant l'évolution de la masse en fonction du pas d'étage

Les observations pour la BTC se confirment avec le coût et la masse, les 2 courbes sont très similaires dans leur évolution, inférieures à la BMA jusqu'à 3.6 m pour augmenter plus significativement et faire un bond de 30 % de 5m à 6m. Son optimum physique et économique se situe aux alentours de 3.6m puis réduit pour atteindre une limite de faisabilité géométrique liée au flambement à 5m. Les coûts de la BMA et du CLT augmentent de manière linéaire. Le CLT enregistre une hausse plus marquée, progressant de 40 310,47 € (2,8 m) à 53 451,85 € (6,0 m), tandis que la BMA progresse très lentement de 39 361,47 € (2,8 m) à 44 016,81 € (6,0 m). Les deux matériaux restent stables face aux contraintes d'élancement : le module d'élasticité du CLT lui permet de mieux résister au flambement sous de faibles sections, tandis que la forte épaisseur initiale de la BMA (requisse pour satisfaire les exigences d'isolation thermique du bloc monomur) offre une inertie géométrique élevée qui prévient les contraintes de flambement.

Cette stabilité est confirmée par la masse quasi-constante malgré l'augmentation du pas d'étage, s'établissant pour le CLT à 61 283 kg $\pm$ 1,8 % et pour la BMA à 66 514 kg $\pm$ 3,2 %.

4.2.4 Ratio vitrage/façade wwr (15 % $\rightarrow$ 50 %)

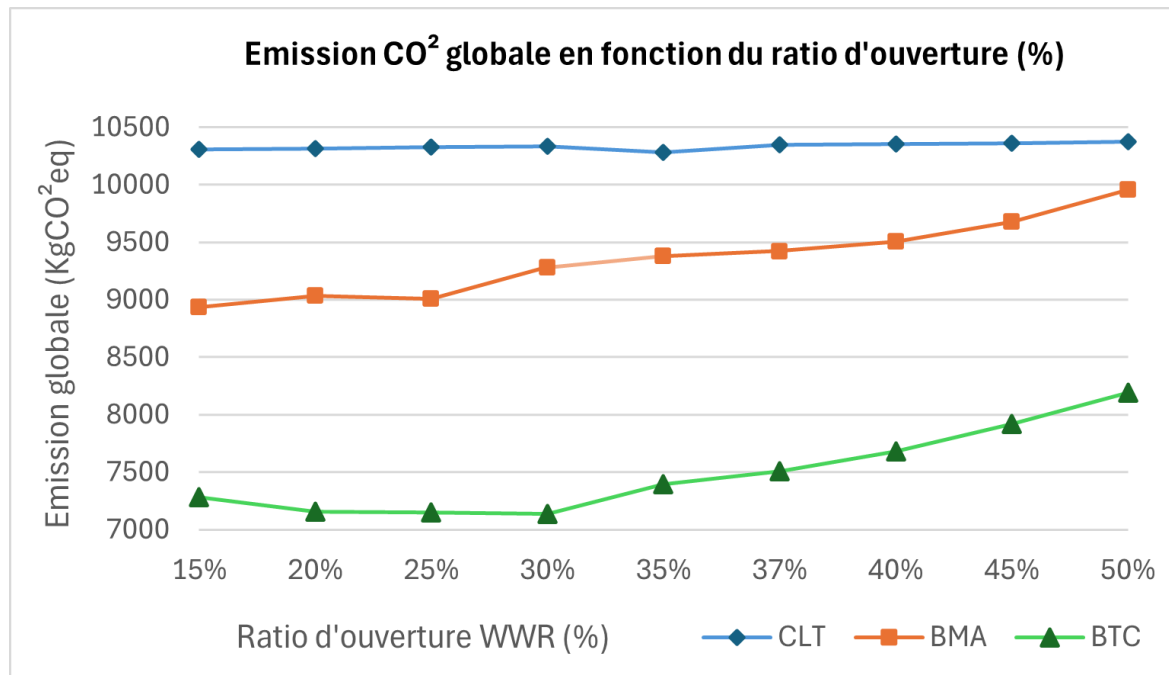


Fig 24. Graphique détaillant l'évolution des émissions carbone fossiles en fonction du ratio d'ouverture

Le ratio de vitrage permet d'étudier l'influence de la découpe monolithique et autostable du panneau CLT face aux murs en maçonnerie nécessitant un linteau en béton armé pour permettre des ouvertures rectangulaires. Le CLT présente une courbe stable (de 10 306,59 kgCO₂eq à 0,15 à 10 373,02 kgCO₂eq à 0,5), l'épaisseur ne change que peu sous l'influence des ouvertures. Les émissions de CO₂ des 2 autres matériaux augmentent proportionnellement au WWR à partir de 25-30%. La BMA passe de 8 933,93 kgCO₂eq (30%) à 9 955,06 kgCO₂eq (50%) et la BTC de 7 139,29 kgCO₂eq (30%) à 8 190,85 kgCO₂eq (50%). A ce point les émissions des linteaux prennent le dessus sur la réduction de maçonnerie. Cela rapproche la BMA du CLT d'environ 1400 kgCO₂eq (15%) à 400 kgCO₂eq (50%). Les émissions de la BTC malgré l'augmentation restent très inférieures à celle du CLT (2000 kgCO₂eq (50%)). Bien que le linteau pénalise le bilan carbone de la BMA et de la BTC, ils conservent leur supériorité environnementale sur l'ensemble de la plage d'ouverture.

4.3 Analyses de sensibilités

Après avoir comparé les trois variantes structurales face aux variations géométriques et dimensionnelles de l'ouvrage, cette troisième partie évalue la sensibilité et la robustesse du

modèle face aux modifications des constantes physiques, environnementales et logistiques de l'étude

4.2.1 Carbone biogénique

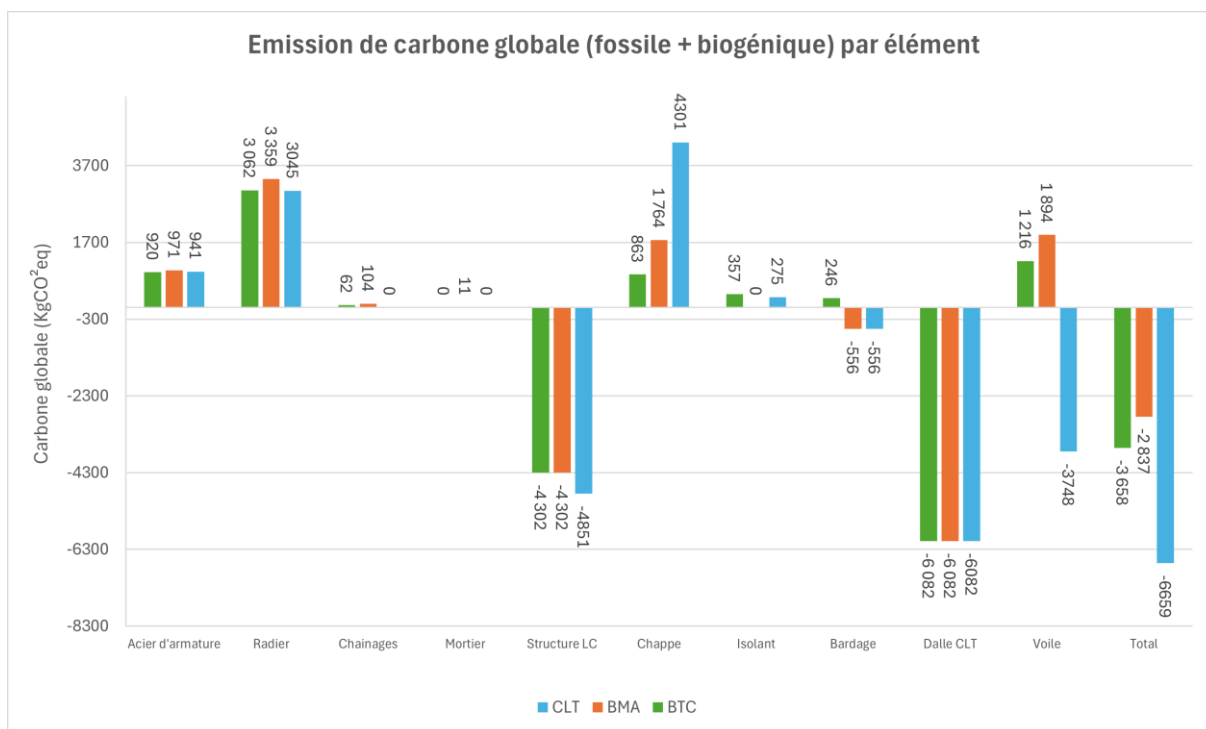


Fig 25. Graphique détaillant la répartition des émissions carbone globales par éléments

L'intégration du carbone biogénique bascule les trois variantes sous le seuil de neutralité carbone. La variante CLT passe de 10 348,35 kgCO₂eq en fossile à un bilan net de -6 659,09 kgCO₂eq avec biogénique, soit un crédit brut de -17 007,44 kgCO₂eq. La variante BMA passe de 9 422,52 kgCO₂eq en fossile à un bilan net de -2 836,99 kgCO₂eq, soit un crédit de -12 259,51 kgCO₂eq. La variante BTC passe de 7 505,87 kgCO₂eq en fossile à un bilan net de -3 657,98 kgCO₂eq, soit un crédit de -11 163,85 kgCO₂eq. Ces stockages massifs proviennent uniquement des éléments biosourcés en bois, donc de la structure intérieur bois, la dalle CLT affiche un bilan de -6 000 kgCO₂eq et les poteaux poutres en lamellés collés émettent environ -4400 kgCO₂eq. Les voiles en CLT émettent -3748 kgCO₂eq pour le scénario correspondant tandis que la BMA et la BTC, étant des matériaux géo-sourcés, n'assurent aucun stockage biogénique et émettent respectivement 1834 et 1216 kgCO₂eq. En réintégrant le biogénique, l'écart de 2 842,48 kgCO₂eq en faveur du CLT par rapport à la BTC inverse totalement la hiérarchie environnementale du cas de base (où la BTC émettait 2 842,48 kgCO₂eq de moins que le CLT). L'exclusion du carbone biogénique dans le cas de base est justifiée par les directives de la RICS (2023) et les fortes incertitudes liées au traitement du bois dans le module de fin de vie (C3/C4). En effet, le stockage carbone n'est effectif à l'échelle globale que si le bois évite l'incinération ou la décomposition rapide en fin de cycle (Andersen et al., 2021). Néanmoins, cette analyse de sensibilité montre le potentiel de décarbonation du bois si la réutilisation et le

recyclage sont intégrés dès la phase de conception, permettant de pérenniser ce stockage sur le long terme.

4.2.2 Inertie thermique ($75 \text{ kg/m}^2 \rightarrow 350 \text{ kg/m}^2$)

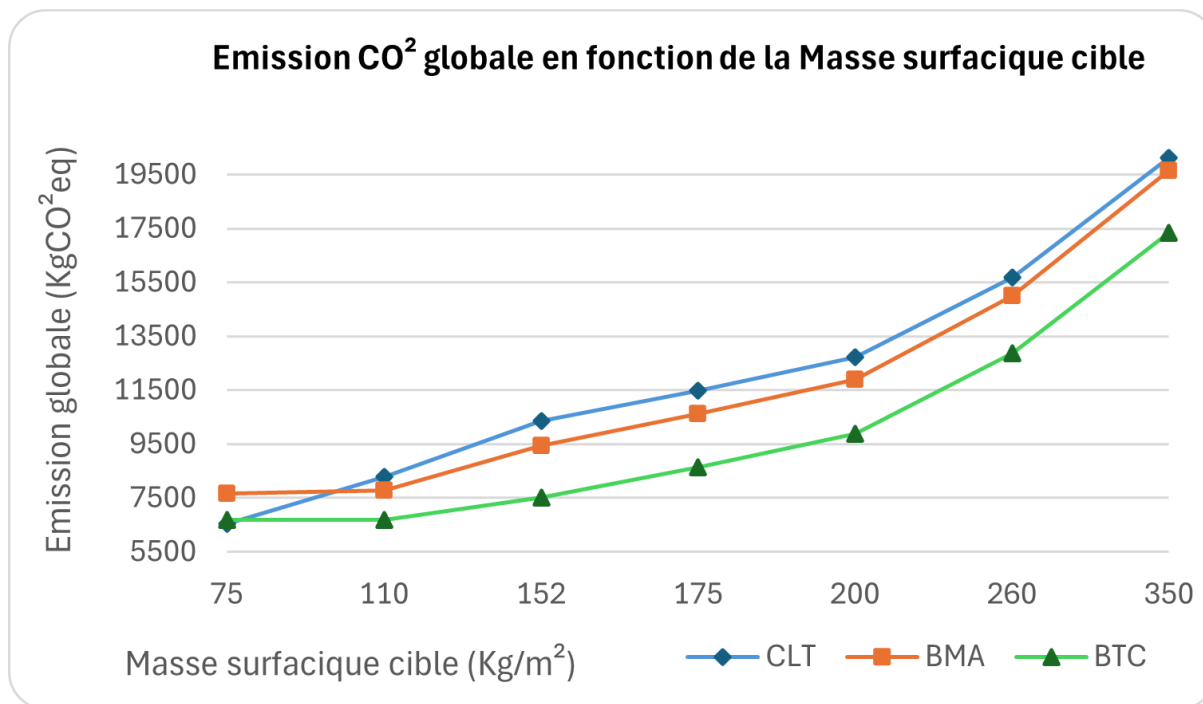


Fig 26. Graphique détaillant l'évolution des émissions carbone fossiles en fonction de la masse surfacique cible

Le bilan carbone est particulièrement sensible à la valeur cible d'inertie thermique, l'adjonction d'une chape en béton pour l'atteindre fait fortement varier de manière convexe les émissions carbonées globales. La variante CLT montre la sensibilité la plus critique. Dans un bâtiment léger elle est équivalente à la BTC à $6\,542,95$ mais ses émissions triple jusqu'à $20\,133,66 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ dans un bâtiment lourd (350 kg/m^2), soit une augmentation massive de $+207,7 \%$.

Les variantes maçonnées en BTC et en BMA présentent un palier d'inertie limité entre 75 et 110 kg/m^2 grâce à la masse thermique de leurs parois, bien que la BMA émette plus en valeur absolue (stabilité à $6\,671,88 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ pour la BTC ; $7\,774,17 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ pour la BMA). Au-delà du seuil de 110 kg/m^2 , les deux variantes maçonnées doivent également intégrer une chape en béton et suivent la même courbe convexe ascendante que le CLT, s'établissant pour le cas de base (152 kg/m^2) à $7\,505,87 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ (BTC) et $9\,422,52 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ (BMA), pour s'envoler à respectivement $17\,326,80 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ et $19\,639,67 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ à 350 kg/m^2 .

Ces résultats confirment le risque d'aberration écologique identifié par Cabeza et al. (2021) : si elle est trop épaisse, la chape en béton annihile le bénéfice environnemental initial des matériaux bas carbone. Cette solution pour augmenter le confort thermique des bâtiments légers reste donc limitée d'un point de vue des émissions carbonées.

4.2.3 Charge variable Q (2,0 → 7,5 kN/m²)

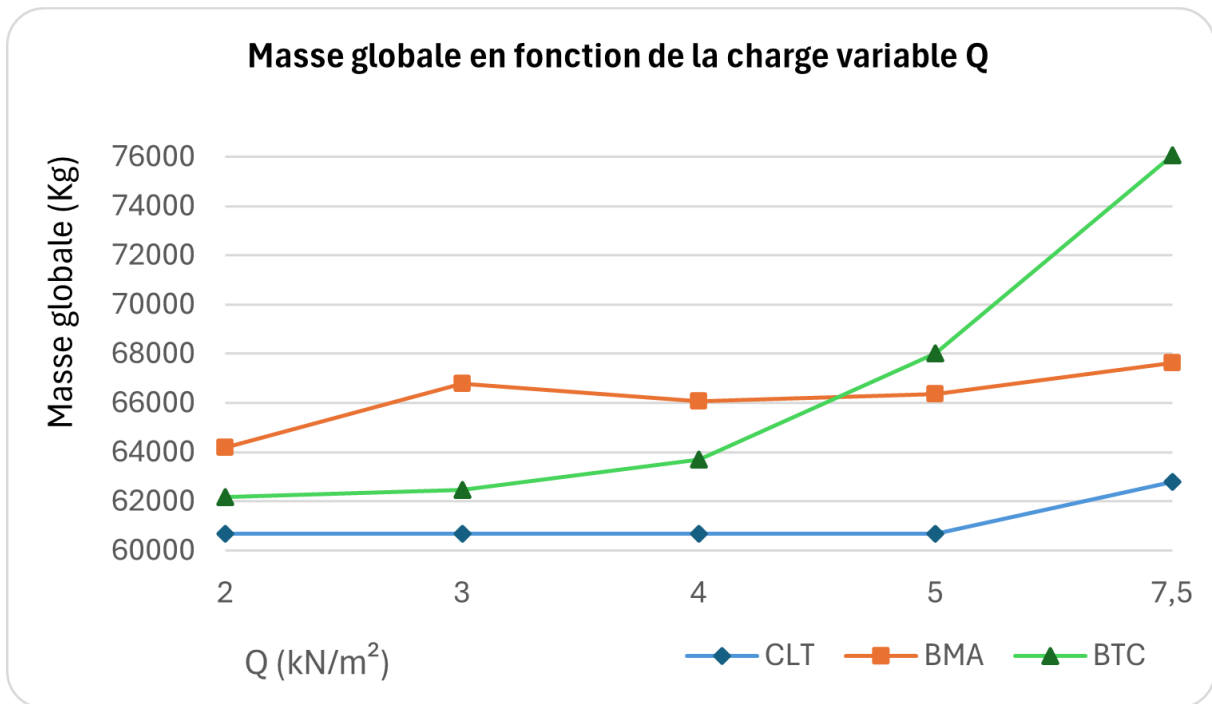


Fig 27. Graphique détaillant l'évolution de la masse en fonction de la charge Q

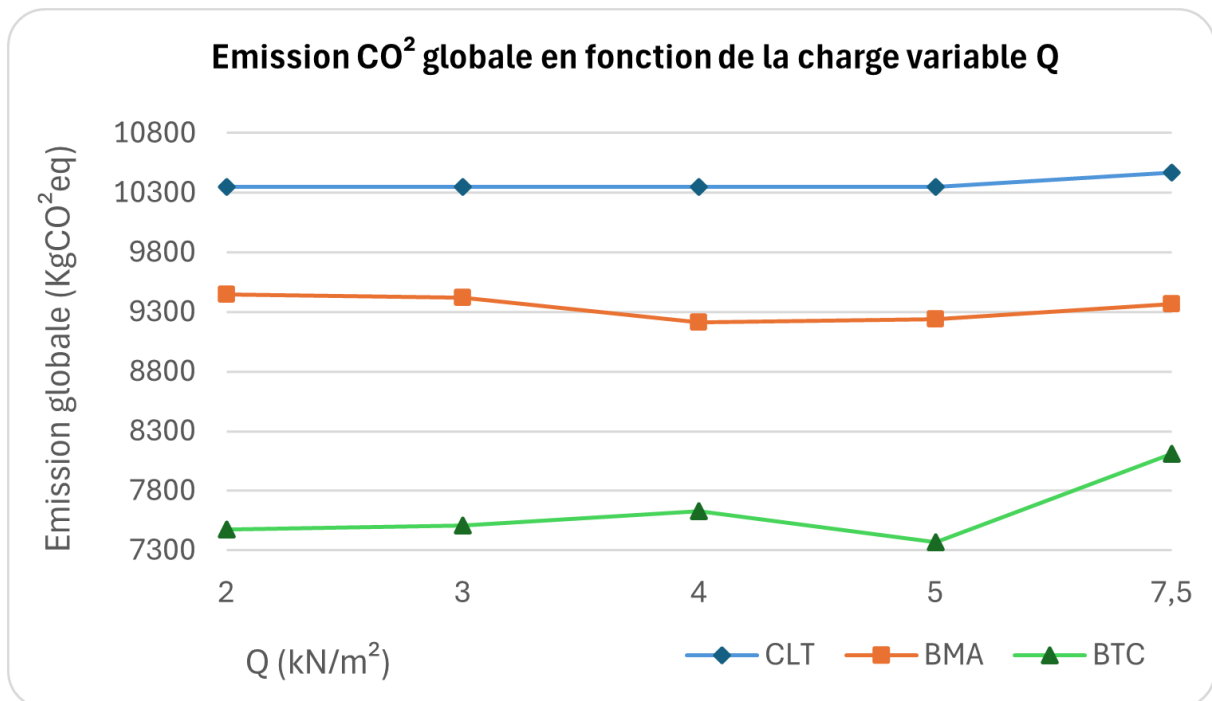


Fig 28. Graphique détaillant l'évolution des émissions carbone fossiles en fonction de la charge

Le CLT et la BMA s'avèrent insensibles à l'augmentation des charges d'exploitation.

- La masse globale du CLT reste rigoureusement stable à 60 664,29 kg de $Q=2,0$ à $Q=5,0$ kN/m², et ne progresse que de 3,49 % à $Q=7,5$ kN/m² (62 781,47 kg). Son bilan carbone fossile suit la même tendance, restant inchangé à 10 348,35 kgCO₂eq avant d'enregistrer une hausse mineure de 1,15 % à $Q=7,5$ kN/m² (10 468,09 kgCO₂eq).
- La maçonnerie de BMA présente un comportement similaire. Sa masse oscille faiblement dans une plage de 5,3 % (de 64 198,31 kg à $Q=2,0$ à 67 629,68 kg à $Q=7,5$) et ses émissions carbonées stagnent autour de 9 200 - 9 400 kgCO₂eq. L'épaisseur initiale importante de la BMA limite les risques de flambement élastique sous charges lourdes.
- La BTC montre une sensibilité aux charges variables, affichant un comportement analogue à celui observé lors de l'étude sur la hauteur du bâtiment. Au seuil de 4.0 kN/m² la masse totale de la variante BTC passe de 63 700 kg ($Q=4,0$) à 68 014,97 kg ($Q=5,0$) pour atteindre 76 056,52 kg à $Q=7,5$ kN/m², une augmentation de 22.3 %. La résistance au flambement devient dimensionnante à partir de 4.0 kN/m², les murs BTC augmentent ce qui impact fortement le volume et la masse dû à sa forte densité. Parallèlement, son bilan carbone suit une courbe en cuvette : il diminue de 7 626 kgCO₂eq (à 4,0 kN/m²) à 7 365 kgCO₂eq (à 5,0 kN/m²), l'augmentation d'épaisseur des voiles apporte l'inertie requise et permet de supprimer la chape en béton. Au-delà, n'ayant plus de gain de chape à réaliser, les émissions remontent sous l'effet de la quantité de matière verticale jusqu'à atteindre 8 109 kgCO₂eq à 7,5 kN/m². Cette plus faible résistance au flambement limite la compétitivité de la BTC sous forte charge malgré sa plus faible émission.

4.2.4 Distance d'approvisionnement (50km → 400km)

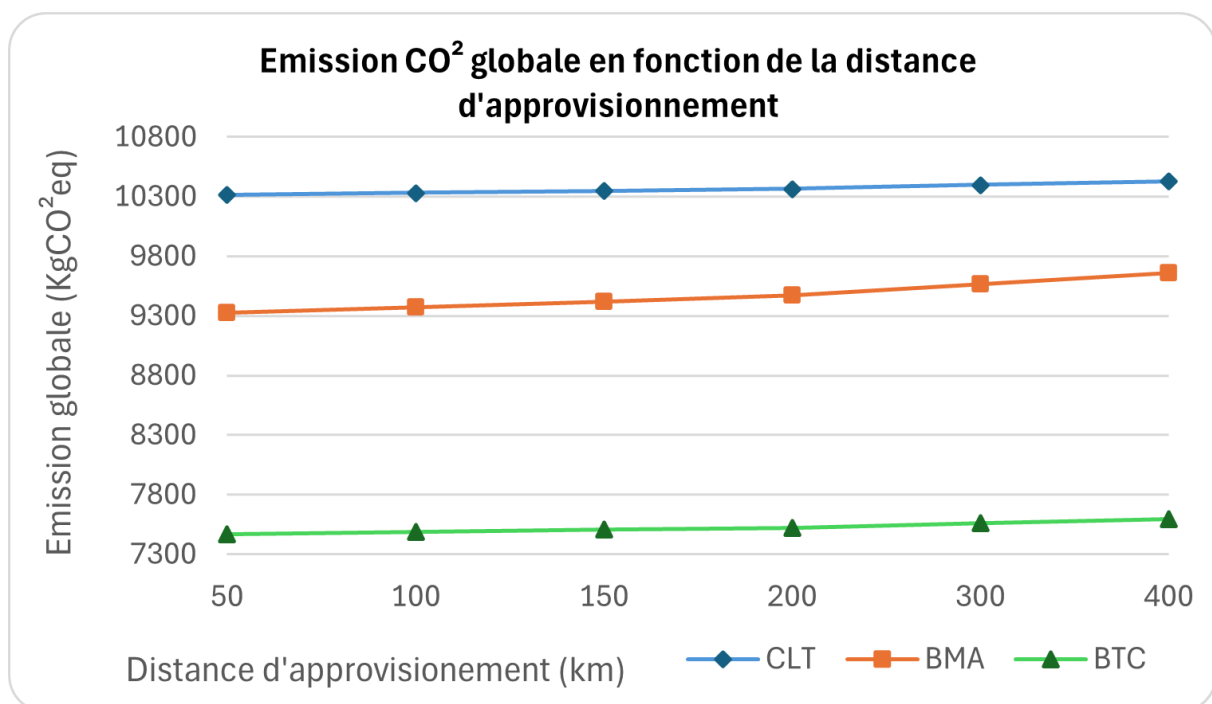


Fig 29. Graphique détaillant l'évolution des émissions carbone fossiles de la distance d'approvisionnement

Entre 50 km et 400 km, la croissance carbone est extrêmement amortie pour l'ensemble des modes constructifs :

- La variante BMA affiche la sensibilité la plus élevée, ses émissions globales passant de 9 327,60 kgCO₂eq (50 km) à 9 659,82 kgCO₂eq (400 km), soit une hausse de 3,56 %.
- La variante BTC augmente plus modérément de 7 469,21 kgCO₂eq (50 km) à 7 597,52 kgCO₂eq (400 km), soit une hausse de 1,72 %.
- La variante CLT progresse uniquement de 1,13 %, s'établissant à 10 431,85 kgCO₂eq à 400 km.

Bien que la BTC présente un facteur d'impact transport plus élevé lié à sa masse propre, ses parois restent fines dans le cas modélisé limitant le volume à déplacer. À l'inverse, le bloc BMA monomur exige une forte épaisseur, ce qui engendre un volume et des trajets de livraison supérieurs qui le rendent légèrement plus sensible au transport routier.

4.2.5 Transmittance Thermique U (Laine De Roche et Cellulose)

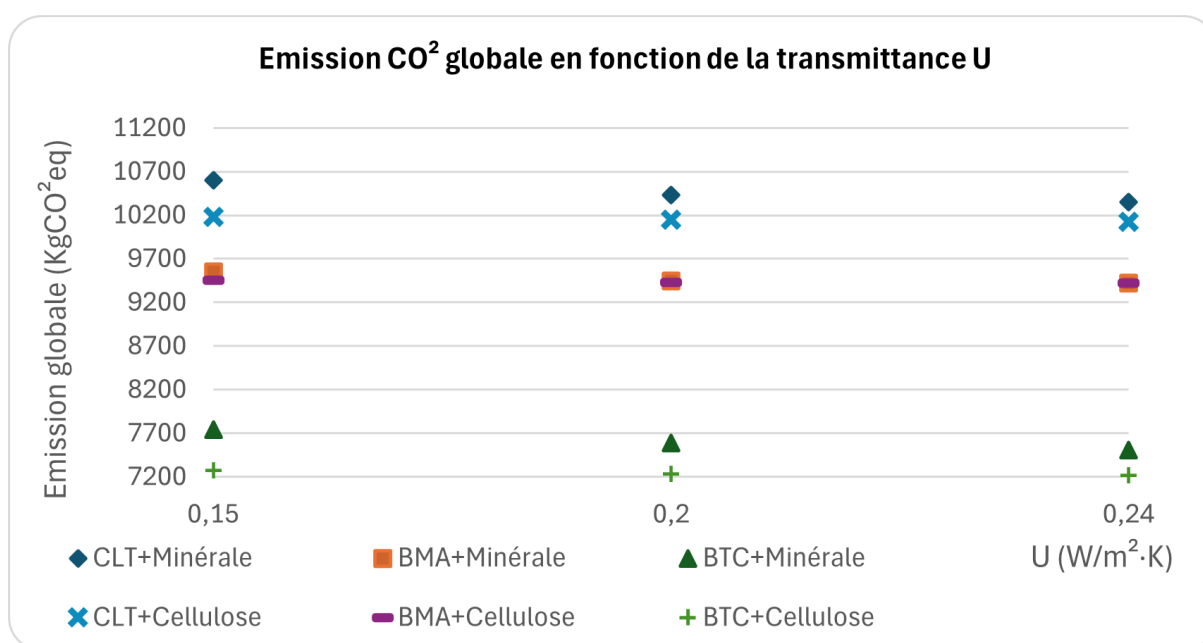


Fig 30. Graphique détaillant l'évolution des émissions carbone fossiles en fonction de la transmittance thermique

L'évaluation de la performance thermique statique s'effectue en faisant varier la transmittance thermique cible de U = 0,24 W/m²K (exigence réglementaire wallonne) à U = 0,15 W/m²K (standard de la maison passive). Cette sensibilité compare l'impact d'un isolant minéral conventionnel (laine de roche) avec un isolant biosourcé (ouate de cellulose). L'augmentation de la cible thermique statique n'engendre qu'une hausse carbone faible sur le bilan global de la structure. Pour l'isolant en laine de roche :

- Le CLT passe de 10 348,35 à 10 602,66 kgCO₂eq, soit +2,46 %.
- La BMA passe de 9 422,52 à 9 553,91 kgCO₂eq, soit +1,39 %.

- La BTC passe de 7 505,87 à 7 745,13 kgCO₂eq, soit +3,19 %.

Avec l'isolation cellulose qui est bas carbone, l'augmentation d'émissions avec la diminution du U cible devient négligeable. Cependant l'usage de la cellulose permet de réduire le bilan carbone global du CLT à 10 183,00 kgCO₂eq soit une économie de 3.96%. Pour la BTC l'émission passe à 7 271,00 kgCO₂eq avec la ouate de cellulose contre 7 745,13 kgCO₂eq pour la laine de roche, soit une réduction de 6,12%. La BMA ne nécessitant que très peu d'isolation n'a quasiment aucun changement. L'épaisseur d'isolant n'est pas le levier carbone le plus critique pour la trame étudiée. Ainsi, même avec un isolant biosourcé à faible impact, l'avantage thermique de la BMA reste marginal sur le bilan global en comparaison du CLT et de la BTC. Cet impact aurait été plus prononcé en cas de comparaison avec des isolants synthétiques d'origine pétrochimique plus émissif en carbone fossile (Mouton et al., 2023).

4.3 Analyse multicritère

La présente section expose les résultats de l'optimisation multi-objectif (MOO) menée sur l'ensemble de l'espace de recherche paramétrique. L'analyse est segmentée en trois échelles de surface habitable de trame : la petite échelle (85 à 115 m²), la moyenne échelle (180 à 220 m²) et la grande échelle (280 à 350 m²). Pour chaque tranche, l'évaluation s'articule autour de trois axes de lecture : une analyse intra-matériau, une analyse inter-matériaux et l'identification du front de Pareto. Enfin, chaque échelle compare systématiquement le scénario de pas d'étage minimal (3,3 m, noté Min, couleur claire) au scénario de pas d'étage maximal (4,5 m, noté Max, couleur foncé).

4.3.1 Trame de petite échelle (85 à 115 m²)

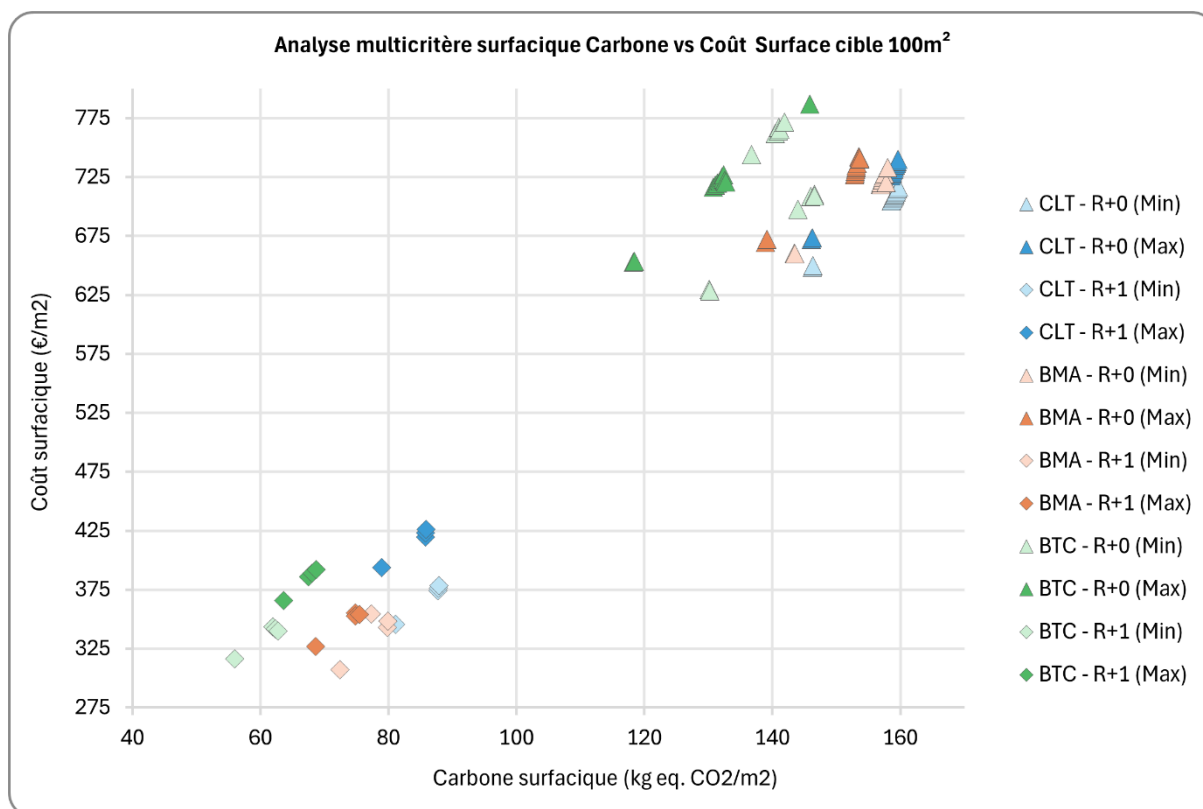


Fig 31. Graphique multicritère surfacique carbone vs coût Surface cible 100m²

4.3.1.2 Analyse Intra-Matériau

À l'échelle de la petite trame, deux configurations géométriques permettent d'atteindre la surface cible :

- Un bâtiment de plain-pied (R+0) caractérisé par de grandes portées de trame ($P=7,0$ à $8,0$ m).
- Un bâtiment à un étage (R+1) s'appuyant sur des portées réduites ($P=4,0$ à $4,3$ m).

L'analyse des gradients de performance met en évidence la supériorité de la verticalité (R+1) par rapport à l'étalement horizontal (R+0). Prenons l'exemple du CLT (bleu), la variante Min R+1 à $4,0$ m de portée s'établit à $81,09 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$ et $345,57 \text{ €/m}^2$, tandis que la variante R+0 Min à $7,0$ m grimpe à $146,23 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$ (+80 %) et $648,36 \text{ €/m}^2$ (+87 %). Cette tendance est identique pour la BMA (orange) et la BTC (vert). La domination des impacts des fondations explique ce phénomène, avec une grande portée en R+0, la surface de radier est plus importante. Alors qu'en configuration R+1, ces éléments horizontaux sont partagés et amortis sur deux niveaux, divisant par deux leur contribution surfacique.

4.3.1.2 Analyse Inter-Matériaux

À géométrie équivalente en configuration R+1 (Pas d'étage min = 3,3 m), la substitution matérielle démontre l'excellent comportement environnemental de la terre crue :

- BTC : 55,96 kgCO₂eq/m² & 316,46 €/m²
- BMA : 72,37 kgCO₂eq/m² & 307,04 €/m²
- CLT : 81,09 kgCO₂eq/m² & 345,57 €/m²

La BTC permet une réduction carbone de 22,6 % par rapport à la BMA et de 31,0 % par rapport au CLT. Même si ce n'est pas la solution économique, l'écart n'est que de 3% avec la BMA. Les alternatives CLT pour cette configuration sont dominées par les autres matériaux.

La configuration en R+0 (confort Min, HSP = 3,3 m), la hiérarchie reste dominée par la BTC à 130,21 kgCO₂eq/m² et 628,40 €/m², mais le CLT s'impose comme la deuxième alternative la moins chère à 648,36 €/m² (contre 659,90 €/m² pour la BMA) alors que la BMA constitue le deuxième scénario le moins carboné à 143,53 kgCO₂eq/m² (contre 146,23 kgCO₂eq/m² pour le CLT)

L'introduction du pas d'étage maximal de 4,5 m modifie ces équilibres (pour R+1) :

- BTC (vert, Max) : 63,61 kgCO₂eq/m² (+13,7 %) | 365,76 €/m² (+15,6 %)
- BMA (orange, Max) : 68,59 kgCO₂eq/m² (-5,2 %) | 326,76 €/m² (+6,4 %)
- CLT (bleu, Max) : 78,89 kgCO₂eq/m² (-2,7 %) | 393,57 €/m² (+13,9 %)

Alors que la hausse de hauteur d'étage pénalise la BTC en carbone et en coût en raison de l'élancement accru des voiles, on observe une baisse du carbone surfacique pour le CLT (-2,7 %) et la BMA (-5,2 %). Cela s'explique par l'augmentation de la surface des voiles et donc l'augmentation de la masse surfacique par m² ce qui réduit l'impact carbone de la chape béton.

4.3.1.3 Optimum et Front de Pareto

Sur la base du critère de dominance de Pareto, les solutions optimales se restreignent exclusivement aux configurations en hauteur (R+1), Les solutions en R+0 (grandes portées) se situent très loin du front optimal.

- En confort Min (3,3 m) : Le front de Pareto est constitué de d'une solution qui se détache. R+1, portée 4.0m en BTC avec 55,96 kgCO₂eq/m², et 316,46 €/m². Même si ce n'est pas l'optimum économique, elle ne se trouve qu'à 3% de la solution la plus économique pour 22.6% de réduction carbone.
- En confort Max (4,5 m) : 2 solutions non dominées se trouvent sur le front de Pareto. L'optimum environnemental demeure la BTC (R+1, 4,0 m) à 63,61 kgCO₂eq/m², et l'optimum économique est la BMA (R+1, 4,0 m) à 326,76 €/m².

4.3.2 Trame de moyenne échelle (180 à 220 m²)

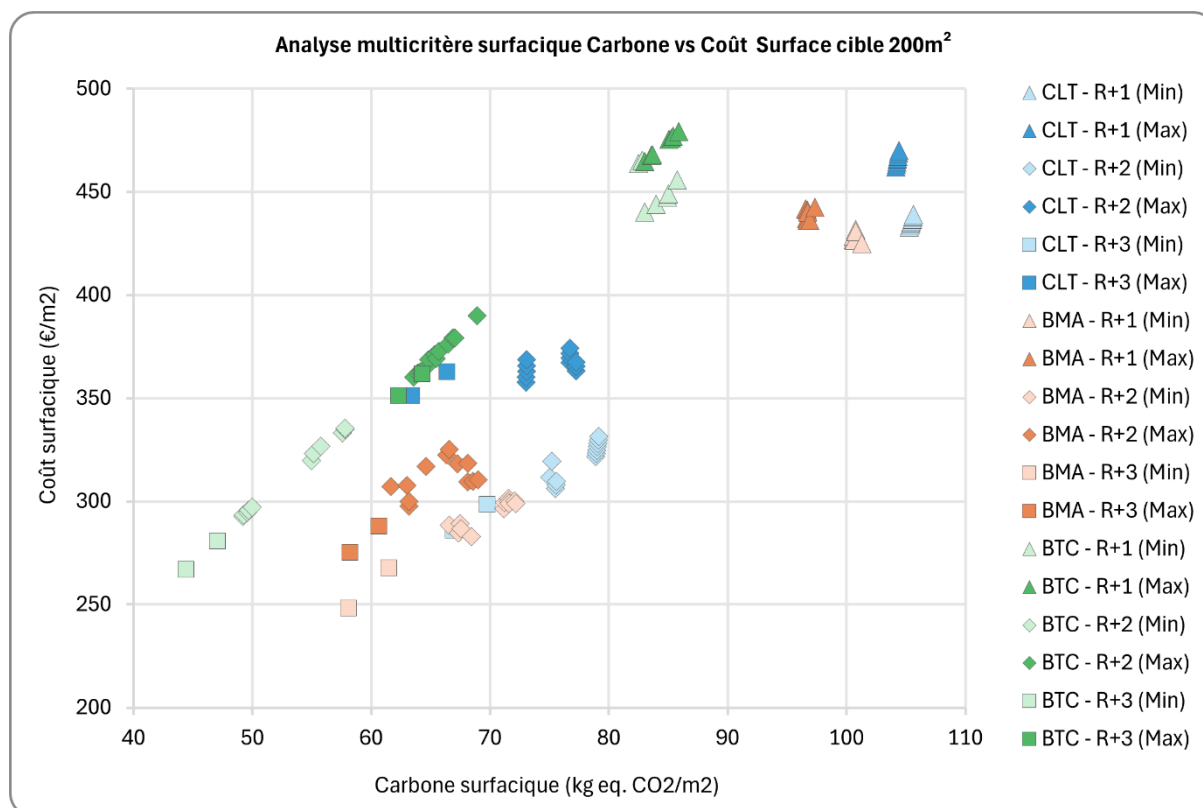


Fig 32. Graphique multicritère surfacique carbone vs coût Surface cible 200m²

4.3.2.1 Analyse Intra-Matériau

À l'échelle moyenne (180 à 220 m²), trois configurations géométriques sont mises en concurrence :

- Un bâtiment à deux étages (R+1) avec de grandes portées (P=7,8 à 8,0 m).
- Un bâtiment à trois niveaux (R+2) avec des portées moyennes (P=4,7 à 5,0 m).
- Un bâtiment à quatre niveaux (R+3) basé sur des portées courtes (P=4,0 m).

La tendance à la densification verticale s'accroît. Pour le CLT (pas d'étage 3.3m), le passage de la configuration R+1 (P=8,0 m) à la configuration R+3 (P=4,0 m) permet de réduire les émissions de 105,30 kgCO₂eq/m² à 66,92 kgCO₂eq/m² (-36,4 %) et le coût de 432,99 €/m² à 285,96 €/m² (-33,9 %). Toutefois, la transition intermédiaire vers le R+2 (P=5,0 m) s'établit déjà à 75,03 kgCO₂eq/m² et 311,77 €/m², ce qui montre que le passage entre R+1 et R+2 capte la majeure partie du gain structurel (-28,7 % de carbone et -28,0 % de coût), ce qui montre le fort impact des grandes portées vis-à-vis de l'augmentation en étage. On observe aussi une réduction des émissions carbone pour la variante 4.5m par rapport à la variante 3.3m pour la catégorie R+3, expliqué par l'augmentation des parois CLT et donc une réduction de chape.

La BTC affiche une trajectoire d'optimisation régulière et descendante avec le nombre de niveaux, passant de 82,50 kgCO₂eq/m² (3.3m, R+1, P=8,0 m) à 49,21 kgCO₂eq/m² (3.3m, R+2, P=4,7 m, -40,3 %) pour atteindre 44,42 kgCO₂eq/m² (3.3m, R+3, P=4,0 m, -9,7 % supplémentaires).

4.3.2.2 Analyse Inter-Matériaux

À géométrie équivalente en configuration R+3 et portée de 4,0 m (confort Min, HSP = 3,3 m), la hiérarchie s'établit comme suit :

- BTC (vert) : 44,42 kgCO₂eq/m² & 266,79 €/m²
- BMA (orange) : 58,12 kgCO₂eq/m² & 248,17 €/m²
- CLT (bleu) : 66,92 kgCO₂eq/m² & 285,96 €/m²

La BTC offre un gain carbone de 23,6 % sur la BMA et de 33,6 % sur le CLT. Le scénario BTC (R+3, 4,0 m) est l'optimum environnementale pour cette surface de trame cible. La BMA conserve son avantage économique avec un gain de 7 % sur la BTC et de 13,2 % sur le CLT, elle est l'optimum économique du front de Pareto.

Cependant, le passage en configuration de pas d'étage Max 4,5 m provoque une rupture de comportement physique pour la maçonnerie de terre crue :

- BTC (vert, Max) : 62,31 kgCO₂eq/m² (+40,3 %) & 351,21 €/m² (+31,6 %)
- BMA (orange, Max) : 58,25 kgCO₂eq/m² (+0,2 %) & 275,28 €/m² (+10,9 %)
- CLT (bleu, Max) : 63,43 kgCO₂eq/m² (-5,2 %) & 351,26 €/m² (+22,8 %)

La BTC atteint ses limites de résistance mécanique optimale, comme on a pu le voir dans les analyses comparatives, le volume de matière explose et donc ses indicateurs surfaciques. Ses émissions augmentent de 40,3 %, rejoignant le niveau du CLT (63,43 kgCO₂eq/m²) et dépassant largement la BMA. À l'inverse, la BMA démontre une robustesse structurelle à l'élancement, ses émissions carbone demeurant stables +0,2 %. La BMA (R+3, 4,0 m) subit une dominance totale. Elle s'impose à la fois comme l'optimum environnemental (58,25 kgCO₂eq/m²) et l'optimum économique (275,28 €/m²), excluant la BTC et le CLT du front de Pareto.

4.3.3 Trame de grande échelle (280 à 350 m²)

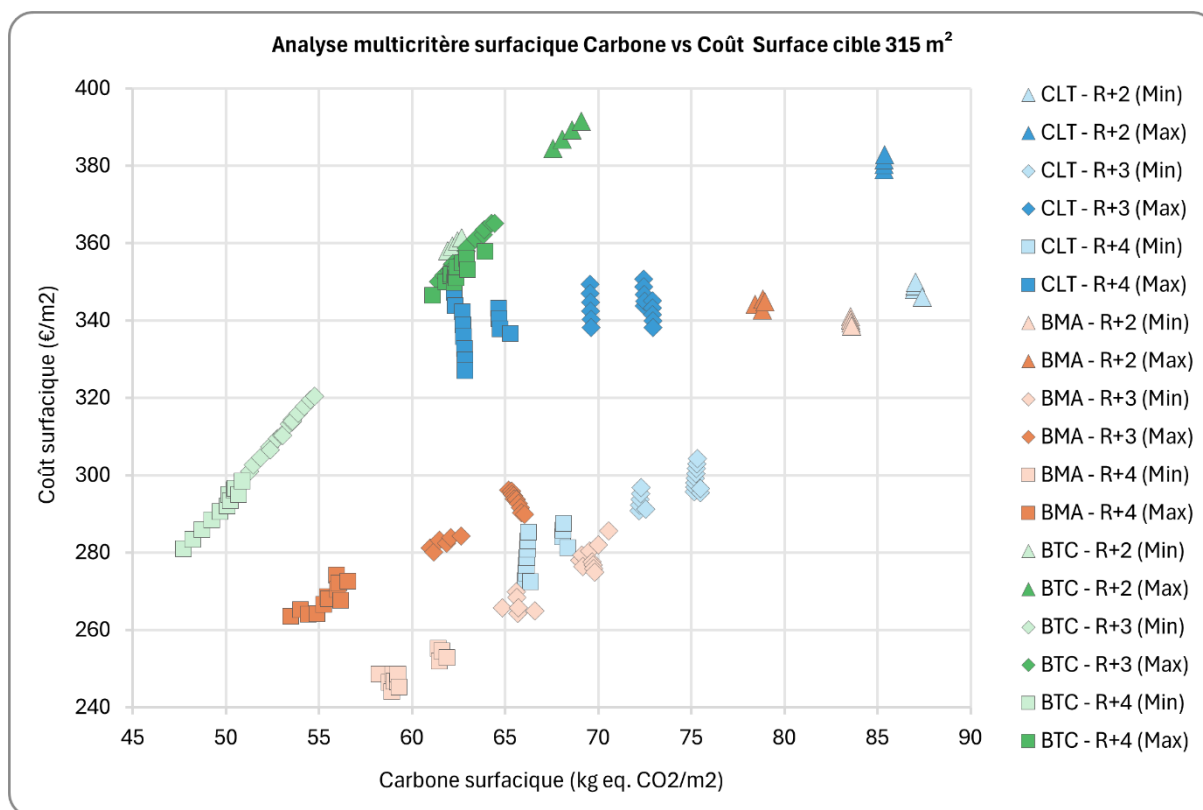


Fig 33. Graphique multicritère surfacique carbone vs coût Surface cible 315m²

4.3.3.1 Analyse Intra-Matériau

À l'échelle de la grande trame (280 à 350 m² habitable), les configurations géométriques comparées sont :

- Un bâtiment à trois niveaux (R+2) avec de grandes portées (P=7,7 à 8,0 m).
- Un bâtiment à quatre niveaux (R+3) avec des portées intermédiaires (P=5,5 à 6,0 m).
- Un bâtiment à cinq niveaux (R+4) basé sur des portées courtes (P=4,3 à 5,0 m).

L'analyse confirme la loi d'efficacité de la hauteur pour la BMA (3.3m), la variante R+2 présente des valeurs de 83,55 kgCO₂eq/m² et 340,98 €/m². La transition vers la variante R+4 (P=5,0 m) ramène ces indicateurs à 58,92 kgCO₂eq/m² (-29,5 %) et 244,06 €/m² (-28,4 %).

La diminution des portées de plancher de 7,7 m à 5,0 m permet de réduire l'épaisseur de la dalle CLT et le volume de fondation, générant une économie de matière considérable. BTC (4,5m) : On observe un regroupement très serré entre la configuration R+3 (61,42 kgCO₂ eq/m² et 350,00 €/m²) et la configuration R+4 (61,11 kgCO₂eq/m² et 346,41 €/m²). Le R+4 n'apporte plus de supériorité significative par rapport au R+3, montrant que pour un grand élanement vertical, l'efficacité théorique de la loi de la hauteur est annulée.

CLT (3,3 m) : À hauteur constante, le carbone surfacique du CLT varie extrêmement peu face à la portée (P=4,3 m : 66,28 kgCO₂eq/m², P=4,5 m : 66,22 kgCO₂eq/m², P=5,0 m : 66,38 kgCO₂eq/m²). Une explication possible est encore une fois l'épaissement des voiles CLT sous la portée, ce qui permettrait à l'algorithme de réduire la chape et compenserait l'augmentation du radier.

4.3.3.2 Analyse Inter-Matériaux et Front de Pareto

L'analyse combinée des substitutions matérielles et de la dominance de Pareto permet de dégager les fronts optimaux selon le pas d'étage.

Pour un pas d'étage de 3,3 m, le front de Pareto global à grande échelle est dominé par la BTC et la BMA. Il associe deux solutions optimales situées à leur niveau maximal de verticalité (R+4, P=5,0 m) :

- L'optimum environnemental est la BTC (R+4, 5,0 m) avec 47,74 kgCO₂eq/m² pour un coût de 280,99 €/m².
- L'optimum économique est la BMA (R+4, 5,0 m) à 244,06 €/m² pour une empreinte carbone de 58,92 kgCO₂eq/m².

La substitution par la BTC permet ainsi un bénéfice carbone de 19,0 % au prix d'un surcoût financier de 15,1 % par rapport à la BMA. Le CLT (R+4) est dominé, présente un surcoût financier de 11,6 % et un excédent d'émissions de carbone de 39,0 %

Pour un pas d'étage de 4,5 m, la BMA confirme sa domination sous grand élançement, et s'impose comme la solution unique et absolue du front de Pareto à 53,49 kgCO₂eq/m² et 263,44 €/m² pour son itération en R+4 et 5,0m de portée. De plus, tous les scénarios R+4 et R+3 de la BMA sont en moyenne dominant de 3,6% en carbone sur la BTC et de 17,9% en coût sur le CLT.

Dans un second temps, si l'on cherche une alternative à la BMA, le CLT (R+4, P=5,0 m) à 62,87 kgCO₂eq/m² et 327,00 €/m² s'avère économiquement plus intéressant que la BTC (R+4, 5,0 m) à 61,11 kgCO₂eq/m² et 346,41 €/m². Le CLT offre une économie de 5,6 % pour une pénalité carbone de seulement 2,8 % par rapport à la BTC, ce qui relègue cette dernière au rang d'option sous-optimale pour les programmes élançés pour cette dernière échelle de trame.

L'intégralité des résultats quantitatifs issus de ces trois analyses est consignée en annexe (annexe 18 à 22).

5. Discussion

5.1 Comparaison des performances et limites matérielles

5.1.1 Domaines de performance des matériaux étudiés

Les résultats de l'analyse multicritères réalisée précédemment nous permettent d'établir la matrice de pertinence matérielle suivante en fonction de la surface cible, de la hauteur d'étage et du nombre de niveau :

Surface cible / Pas d'étage	R+0	R+1	R+2	R+3	R+4
Petite (85-115 m ²) - 3,3 m	BTC	BTC			
Petite (85-115 m ²) - 4,5 m	BTC	BTC optimum carbone BMA optimum financier			
Moyenne (180- 220 m ²) - 3,3 m		BTC optimum carbone BMA optimum financier	BTC optimum carbone BMA optimum financier	BTC optimum carbone BMA optimum financier	
Moyenne (180- 220 m ²) - 4,5 m		BMA	BMA	BMA	

Grande (280-350 m ²) - 3,3 m			BTC optimum carbone BMA optimum financier	BTC optimum carbone BMA optimum financier	BTC optimum carbone BMA optimum financier
Grande (280-350 m ²) - 4,5 m			BTC optimum carbone BMA optimum financier	BMA	BMA

Fig 34. Tableau récapitulatif des solutions matérielles optimales en fonction de la typologie

Globalement on observe une domination des blocs de terre crue compressée sur l'indicateur carbone et une domination des briques monomur alvéolaire sur l'indicateur économique. Les configurations où la BTC est la plus optimale sur les deux indicateurs sont les typologies de petite surface en R+0 & R+1 avec une hauteur d'étage qui reste limitée. Dès la typologie R+1 & 4.5m, la BTC subit une pénalité structurelle. Comme constaté dans l'analyse comparative, l'augmentation des charges verticales et de l'élancement entraîne une augmentation des contraintes de flambement et provoque un fort épaississement des parois en terre crue et donc des surcoûts. Cette masse supplémentaire vient alourdir le dimensionnement des fondations qui sont les principaux facteurs d'émissions dans cette étude.

La BMA s'impose alors comme l'optimum économique pour les typologies moyenne et grande à partir du R+2. La brique alvéolaire s'avère même être le matériau optimal sur les deux indicateurs dès que l'on impose une grande hauteur d'étage. Ce matériau résiste mieux au flambement, cela se répercute d'ailleurs dans les préconisations techniques qui conseil un élancement maximum de 10 pour les éléments en terre crue (Confédération de la construction en terre crue, 2020) contre un élancement de 27 pour la maçonnerie terre cuite (NBN EN 1996-1-1).

Enfin, la variante CLT est complètement dominée par les deux autres matériaux, en moyenne elle présente un surcoût supérieur de 11.2% et des émissions supérieures de 26% par rapport à la variante minérale la plus optimale dans une typologie donnée. Cette domination montre le faible impact carbone des renforts structurels en béton présent dans la maçonnerie à l'échelle du bâtiment. L'écart d'émissions du bois provient de la chape représentant 41.5% des émissions totale de l'alternative en CLT. De plus la forte volatilité de son coût élevée (1000€/m³) le rend peu compétitif (Younis & Dodoo, 2022). Malgré tout le CLT reste plus intéressant pour des configurations à fort élancement et charge verticale vis-à-vis de la BTC.

5.1.2 Limites physiques et constructives des matériaux

L'introduction de l'inertie thermique dans l'équivalence fonctionnelle est la constante la plus impactante de l'étude. Avec une cible fixée à 75 kg/m² correspondant aux structures légères, la variante CLT émet autant que la variante BTC mais si l'on double cette cible d'inertie, la variante en bois émet 40% plus que celle en BTC. Ce transfert d'impact carbone, théorisé par Migoni Alejandro et al. (2025), démontre que la compensation de masse thermique dégrade fortement le bénéfice environnemental du bois massif.

Le choix de ne pas intégrer les modules de fin de vie en ACV conditionne l'exclusion du carbone biogénique ce qui s'avère décisif pour le CLT. En le comptabilisant les voiles bois stockent 3 750 kgCO₂eq ce qui rend cette variante la moins émissive pour le scénario référence. Younis & Doodoo (2022) identifie la dépendance du CLT à la comptabilisation du carbone biogénique afin d'obtenir les meilleures performances sur les indicateurs carbone.

L'équivalence fonctionnelle de l'étude continue de désavantager le bois avec l'imposition du mode constructif en voile continue. Dans la pratique plusieurs mode constructifs bois existent et les systèmes de type poteaux-poutres en bois lamellé-collé (LC) s'avèrent plus optimisés pour la portance verticale, minimisant le volume de bois par rapport aux dalles épaisses ou aux voiles continus (Frangi et al., 2008 ; Blaß, 2017).

La modélisation mécanique sous Karamba 3D adoptée dans cette étude présente plusieurs limites. À l'échelle des planchers, le dimensionnement réel du CLT sous grandes portées est limité par le cisaillement roulant dans les plis croisés (Frangi et al., 2008). Or, la modélisation simplifiée en coques ne capture pas ce glissement inter-plis, ce qui tend à sous-dimensionner l'épaisseur des dalles pour les portées supérieures à 6,5 m et à masquer les surcoûts et émissions associés.

De l'autre côté les hypothèses prises pour réussir à modéliser des murs en maçonneries grâce à une limite en traction fictive peuvent idéaliser le comportement réel du matériau. Cette hypothèse de continuité élastique masque les vulnérabilités de l'ouvrage face aux efforts latéraux et empêche la prédiction des fissures, idéalissant par conséquent la réponse structurelle (Angelui et al., 2023). L'étude reste dans le cadre d'un prédimensionnement et cette approche devient limitante pour une analyse structurelle avancée.

De plus les performances de la BTC restent en partie théoriques en Belgique, où l'absence de normes officielles s'ajoute au caractère récent de sa production et de son utilisation industrielle (Pelicaen et al., 2023). Dans le cadre de cette étude, le produit de chez BC Materials constitue l'unique référence de BTC possédant une B-EPD. Son introduction récente sur le marché empêche l'acquisition d'un retour d'expérience empirique. Cette immaturité de la filière locale introduit par conséquent une incertitude méthodologique lors de l'évaluation comparative des performances face à des filières structurelles matures.

Les écarts de performance observés entre les trois systèmes constructifs révèlent la sensibilité critique des choix méthodologiques sur les conclusions environnementales et financières. La performance environnementale du CLT dépend presque entièrement d'hypothèses méthodologique, telles que la comptabilisation du carbone biogénique ou la réduction de la cible d'inertie thermique. À l'opposé, la BTC démontre un potentiel environnemental

remarquable pour les faibles hauteurs, mais ses limites physiques (sensibilité à l'élancement et à l'humidité) combinées à l'immaturité réglementaire de la filière belge restreignent actuellement son applicabilité à grande échelle. Dans ce contexte, la brique monomur alvéolaire (BMA) émerge comme l'alternative la plus robuste et stable pour notre simulation. Grâce à sa maturité industrielle et à son optimisation entre performances mécaniques, massiques et thermiques, elle offre le meilleur compromis technico-économique.

5.2 Sensibilité physique et incertitudes méthodologiques

5.2.1 Sensibilités des paramètres physiques et méthodologiques

L'évaluation de la sensibilité relative des indicateurs physiques globaux face aux variations des paramètres de conception est résumée dans le tableau suivant :

Variation du paramètre de conception	GWP global (A1-A5)	Coût de construction global	Masse globale
Nombre d'étages	++	++	++
Portée structurelle	++	++	++
Hauteur d'étage	- (BTC : ++)	+ (BTC : ++)	O (BTC : ++)
Surcharge d'exploitation	O (BTC : +)	+ (BTC : ++)	+ (BTC : ++)
Distance de transport	O	O	O
Transmittance thermique cible	+	+	O
Masse surfacique cible (Inertie)	++	+	++

Légende : ++ forte hausse ; + hausse modérée ; O impact négligeable ; - baisse modérée

Fig 35. Tableau récapitulatif de la sensibilité des indicateurs globaux face aux paramètres de conception

L'analyse de comparaison révèle que la portée structurelle (P) et le nombre d'étages (N) constituent les deux paramètres géométriques exerçant l'influence la plus déterminante sur les indicateurs globaux du bâtiment. L'augmentation de ces variables est corrélée linéairement avec les indicateurs globaux (Navaro Auburtin et al., 2024).

Néanmoins, l'analyse multicritère menée à l'aide d'indicateurs surfaciques met en évidence une efficacité spatiale supérieure pour le paramètre du nombre d'étages. Pour une surface de plancher cumulée équivalente, un bâtiment conçu sur plusieurs niveaux (N) s'avère nettement

plus efficient qu'un bâtiment de plain-pied (R+0) requérant de plus grandes portées horizontales. Cela s'explique par la mutualisation des impacts de fondation. Le radier en béton armé représente un invariant structurel lourd, concentrant à lui seul entre 29,4 % et 40,8 % de l'impact carbone initial global et environ 50 % du budget financier de construction (Bowles, 1996 ; Paknahad et al., 2026). Dans une typologie multi-niveau, cet impact de fondation massif est réparti et amorti sur la surface habitable de plusieurs planchers, divisant sa contribution surfacique relative. De plus, l'épaisseur du radier est liée à la portée dans le modèle de prédimensionnement structurel retenu $h_{dalle} \geq L/20$ (Guerrin & Lavaur, 2016).

Les deux critères méthodologiques introduits pour garantir l'équivalence thermique pèsent de manière asymétrique. D'une part, le critère de transmittance thermique assure des besoins de chauffage comparables en phase d'exploitation. Toutefois, puisque le carbone opérationnel est exclu, ce paramètre d'isolation reste marginal. D'autre part, le critère de masse surfacique équivalente s'avère prépondérant, les émissions de gaz à effet de serre de la structure croissant proportionnellement avec la cible d'inertie. Intégré pour rétablir une équivalence fonctionnelle juste avec les maçonneries lourdes, ce critère pénalise lourdement le système léger en bois CLT. Cette exigence n'est pas réaliste pour tous les scénarios constructifs. S'il s'avère indispensable de garantir un confort minimal d'été, l'inertie thermique n'est pas l'unique moyen de régulation. Des solutions d'ingénierie et de conception alternatives (ventilation, protections solaires, ...) permettraient d'assurer le confort d'été (De Toldi et al., 2022 ; Rodrigues et al., 2015).

Enfin, la distance d'approvisionnement logistique (Module A4) influe très peu sur le carbone global de la trame. Alors que la littérature scientifique identifie généralement le transport comme l'un des critères d'impact dominants pour les matériaux géosourcés lourds comme la BTC (Bogas et al., 2019), ce paramètre s'avère secondaire dans la présente étude. Ce décalage peut s'expliquer par la typologie du cas d'étude de base modélisée ne nécessitant pas d'énorme volume de terre. De plus, le radier amortit et lisse fortement la sensibilité des émissions de transport A4 liées aux parois verticales (Paknahad et al., 2026).

5.2.2 Limites et incertitudes méthodologiques

En constant l'impact de l'équivalence thermique, l'approche adoptée constitue une limite majeure de l'étude. En régime stationnaire (valeur U statique), le modèle ignore la diffusivité et la capacité thermique dynamique réelle de la maçonnerie massive (Li & Xu, 2006). De plus, l'utilisation d'une masse surfacique cible s'inspire de la norme ISO 52016-1 (2017). Ce standard retient l'indicateur d'aire massique (kg/m^2) multiplié par la capacité thermique massique du matériau pour évaluer la capacité thermique surfacique comme approximation de l'inertie car il représente de manière simplifiée la masse utile interne participant activement aux cycles stockage et de déstockage thermique. L'absence de Simulation Thermique Dynamique (STD) empêche de mesurer précisément les surchauffes estivales de la structure légère en CLT, ce qui conduit à surdimensionner la chape béton et pénalise fortement l'indicateur carbone (Rodrigues et al., 2015). De plus, l'impact des revêtements intérieurs est omis, laisser la maçonnerie de BMA brute et apparente étant rare en résidentiel, la mise en œuvre de finitions limite en réalité son

apport inertiel actif en isolant la masse de l'air intérieur (Asdrubali et al., 2023). L'intégration d'une simulation thermique dynamique directement dans Grasshopper permettrait de lever ce biais méthodologique.

Enfin, la méthode ACV adoptée présente diverses limites. Bien que le carbone fossile soit l'indicateur majeur, l'absence de métriques environnementales complémentaires (utilisation des sols, eutrophisation, etc.) omet de potentiels transferts d'impact liés aux matériaux (Asdrubali et al., 2023). De plus, les résultats doivent être analysés à l'échelle des ordres de grandeur entre matériaux. L'utilisation d'EPD introduit une incertitude sur les coefficients d'environ 20 %, ce qui impose de considérer avec recul toute différence relative inférieure à ce seuil (RICS, 2023 ; Pomponi & Moncaster, 2018).

L'étude valide les leviers d'atténuation identifiés dans la littérature. La réduction d'échelle spatiale du projet, notamment par la limitation des portées libres horizontales, reste le levier d'optimisation majeur. La substitution matérielle de voile permet d'atteindre un bénéfice carbone initial moyen de 26.6 %, mais cette efficacité est plus sensible aux nombreuses hypothèses méthodologiques et à la part inégale des éléments de la structure qui lisse ces gains.

5.3 Evaluation du flux de travail computationnel

5.3.1 Intérêt du paramétrique en phase d'esquisse

Le flux de travail paramétrique développé valide la loi de MacLeamy (Helmrich et al., 2025) en démontrant que les choix géométriques initiaux (nombre de niveaux, trame de portée) pris en phase d'esquisse et modifiables sans surcoût constituent les leviers d'atténuation dominants. Cette méthodologie permet d'identifier ces leviers ; dans notre cas, le passage d'une configuration à plat ($R+0$, portées de 7 à 8 m) à une densification verticale ($R+1$, portées de 4 m) permet de diviser par deux les émissions carbonees et le coût de construction (le CLT chutant de 146,23 à 81,09 kgCO₂eq/m²). Le workflow permet d'anticiper dès l'esquisse des verrous physiques et financiers majeurs, tels que le flambement de la BTC sous élancement, en observant les points de bascule appliqués au contexte. Effectuer ces calculs sur des modèles 2D mènerait souvent à des hypothèses plus conservatrices ; pouvoir observer les comportements structurels tridimensionnels permet une meilleure compréhension et une optimisation accrue de la structure (Dunant et al., 2018).

De plus, l'exploration de l'espace de recherche (1230 solutions) à l'aide d'algorithmes exhaustifs (via Anemone) identifie le front de Pareto de manière exacte. L'absence de pondération arbitraire des critères assure une neutralité décisionnelle plus fiable (Wang et al., 2020). Ce retour d'information en temps réel (Shi et al., 2025) permet d'arbitrer et d'orienter directement la conception vers des variantes robustes, dans notre cas d'orienter vers la densification verticale et le matériau optimal.

5.3.2 Limite de la méthodologie paramétrique et des algorithmes exhaustifs

Le flux de travail développé présente plusieurs limites computationnelles et géométriques. L'algorithme itératif via Anemone garantit la découverte globale de l'espace de recherche mais s'avère extrêmement lourd en temps de calcul, restreignant l'espace paramétrique à seulement cinq variables dans notre cas (Belz & Kromoser, 2025). Cela peut s'avérer très limitant si plus de variables libres et d'indicateurs complexes avaient été intégrés, à l'instar d'une Simulation Thermique Dynamique (STD).

De plus, comme l'ont montré les sections précédentes, les nombreuses hypothèses simplificatrices adoptées pour permettre une modélisation et une simulation rapides introduisent de nombreux biais dans le modèle.

Nourrir le modèle de données et caractéristiques réalistes sur les éléments modélisés constitue l'enjeu le plus crucial du flux de travail afin de réduire les incertitudes liées aux résultats. Cependant, récolter ces données d'inventaire environnementales, mécaniques et financières s'est avérée être la tâche la plus fastidieuse de la modélisation. Établir des bases de données prêtes à l'emploi et mobilisables rapidement par les outils paramétriques est un enjeu majeur pour la démocratisation de ces méthodologies de travail (Shi et al., 2025). Enfin, cette méthodologie restant basée sur un prédimensionnement analytique, elle nécessite une analyse structurelle poussée ultérieure, c'est pourquoi ce type d'étude précoce s'avère principalement intéressant sur des projets précurseurs hors des pratiques constructives conventionnelles.

6. Conclusion

Face à l'urgence de réduire l'impact carbone initial du secteur de la construction, ce travail a développé un flux de travail computationnel paramétrique sous Grasshopper pour guider les choix structurels dès la phase d'esquisse. Le modèle conçu couple dynamiquement le prédimensionnement mécanique tridimensionnel aux Eurocodes (Karamba3D) à une évaluation environnementale (ACV) basée sur les B-EPD et à une évaluation financière. Par le biais d'un balayage systématique de 1230 configurations géométriques et matérielles, cette méthodologie offre un outil d'aide à la décision standardisé permettant de confronter, sous une stricte équivalence fonctionnelle mécanique et thermique, une structure de référence biosourcée en bois lamellé-croisé (CLT) à deux maçonneries géosourcées : la brique monomur de terre cuite alvéolaire (BMA) et le bloc de terre crue comprimée (BTC).

L'exploration de cet espace de conception démontre que la pertinence environnementale de la substitution matérielle est conditionnée par l'échelle géométrique du bâtiment. Si la BTC s'établit

comme l'optimum environnemental pour les configurations basses, ses limites de résistance mécanique rendent difficile son utilisation sur des typologies plus élancées, consacrant ainsi la BMA comme la plus adaptée pour ces configurations. L'évaluation met également en lumière des transferts d'impact et des limites physiques intrinsèques à la décarbonation structurelle. D'une part, le radier de fondation agit comme un invariant carbone et financier majeur qui tend à lisser les bénéfices de la substitution des parois verticales. D'autre part, la structure légère en CLT se voit fortement pénalisée par l'ajout obligatoire d'une chape lourde pour compenser leur déficit inertiel. Ce constat souligne l'intérêt de la modélisation tridimensionnelle pour identifier ces points de bascule physiques en phase conceptuelle.

Ainsi, ce travail contribue à l'ingénierie des structures écosourcées en proposant une lecture des domaines d'application et des limites des matériaux étudiés dans le cadre de cette étude. Ce couplage entre optimisation géométrique globale et substitution matérielle permet d'éviter les phénomènes de verrouillage carbone et s'inscrit ainsi dans des démarches de conception intégrée qui concilient exigences mécaniques, économiques et limites environnementales.

Bibliographie

Références Académiques

Abdou, Y., Kim, Y. K., Abdou, A., & Anabtawi, R. (2022). Energy Optimization for Fenestration Design : Evidence-Based Retrofitting Solution for Office Buildings in the UAE. *Buildings*, 12(10), 1541. <https://doi.org/10.3390/buildings12101541>

Ahmad, A., & Al-Hadhrami, L. (2009). Thermal performance and economic assessment of masonry bricks. *Thermal Science*, 13(4), 221-232. <https://doi.org/10.2298/TSCI0904221A>

Allan, K., & Phillips, A. R. (2021). Comparative Cradle-to-Grave Life Cycle Assessment of Low and Mid-Rise Mass Timber Buildings with Equivalent Structural Steel Alternatives. *Sustainability*, 13(6), 3401. <https://doi.org/10.3390/su13063401>

Andersen, J. H., Rasmussen, N. L., & Ryberg, M. W. (2022). Comparative life cycle assessment of cross laminated timber building and concrete building with special focus on biogenic carbon. *Energy and Buildings*, 254, 111604. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111604>

Arduin, D., Caldas, L. R., Paiva, R. D. L. M., & Rocha, F. (2022). Life Cycle Assessment (LCA) in Earth Construction : A Systematic Literature Review Considering Five Construction Techniques. *Sustainability*, 14(20), 13228. <https://doi.org/10.3390/su142013228>

Arehart, J. H., Hart, J., Pomponi, F., & D'Amico, B. (2021). Carbon sequestration and storage in the built environment. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1047-1063. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.028>

Asdrubali, F., Grazieschi, G., Roncone, M., Thiebat, F., & Carbonaro, C. (2023). Sustainability of Building Materials : Embodied Energy and Embodied Carbon of Masonry. *Energies*, 16(4), 1846. <https://doi.org/10.3390/en16041846>

Ávila, F., Puertas, E., & Gallego, R. (2021). Characterization of the mechanical and physical properties of unstabilized rammed earth : A review. *Construction and Building Materials*, 270, 121435. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121435>

Bacheva, T. S., & Raposo Grau, J. F. (2025). Embodied Impacts in Buildings : A Systematic Review of Life Cycle Gaps and Sectoral Integration Strategies. *Buildings*, 15(10), 1661. <https://doi.org/10.3390/buildings15101661>

Blaß, H. J., & Sandhaas, C. (2017). *Timber Engineering—Principles for Design*. KIT Scientific Publishing. <https://doi.org/10.5445/KSP/1000069616>

Belz, J., & Kromoser, B. (2025). Structural optimization of wooden building components : A systematic review of established practices. *Wood Material Science & Engineering*, 1-22. <https://doi.org/10.1080/17480272.2025.2525328>

Bowles, J.E. (1996) *Foundation Analysis and Design*. 5th Edition, The McGraw-Hill Companies, Inc., New York.

Bogas, J. A., Silva, M., & Glória Gomes, M. (2018). Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates. *International Journal of Architectural Heritage*, 13(4), 569-584. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1442891>

Brahma, S., Van De Moortel, E., Wurm, J., & Allacker, K. (2024). The risk of shifting environmental burdens in biobased construction—Life cycle assessment of a residential renovated building case study in Belgium. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1402(1), 012050. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1402/1/012050>

Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., & Thiel, A. (2016). Cross laminated timber (CLT): Overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(3), 331-351. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>

Cabeza, L. F., Boquera, L., Chàfer, M., & Vérez, D. (2021). Embodied energy and embodied carbon of structural building materials: Worldwide progress and barriers through literature map analysis. *Energy and Buildings*, 231, 110612. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110612>

Dabaieh, M., Heinonen, J., El-Mahdy, D., & Hassan, D. M. (2020). A comparative study of life cycle carbon emissions and embodied energy between sun-dried bricks and fired clay bricks. *Journal of Cleaner Production*, 275, 122998. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122998>

Dasse, M., Slavkovic, K., Stephan, A., & Gobbo, E. (2026). Towards a parametric early design approach for office buildings that integrates life cycle assessment and indoor environmental quality. *Building and Environment*, 289, 113998. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113998>

De Toldi, T., Craig, S., & Sushama, L. (2022). Internal thermal mass for passive cooling and ventilation: Adaptive comfort limits, ideal quantities, embodied carbon. *Buildings and Cities*, 3(1), 42. <https://doi.org/10.5334/bc.156>

Di Santo, N., Guante Henriquez, L., Dotelli, G., & Imperadori, M. (2023). Holistic Approach for Assessing Buildings' Environmental Impact and User Comfort from Early Design: A Method Combining Life Cycle Assessment, BIM, and Active House Protocol. *Buildings*, 13(5), 1315. <https://doi.org/10.3390/buildings13051315>

Duan, Z., Huang, Q., & Zhang, Q. (2022). Life cycle assessment of mass timber construction: A review. *Building and Environment*, 221, 109320. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109320>

Dunant, C. F., Drewniok, M. P., Eleftheriadis, S., Cullen, J. M., & Allwood, J. M. (2018). Regularity and optimisation practice in steel structural frames in real design cases. *Resources, Conservation and Recycling*, 134, 294-302. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.009>

Feickert, K., & Mueller, C. T. (2025). Policy and design levers for minimizing embodied carbon in United States buildings: A quantitative comparison of current and proposed strategies. *Building and Environment*, 270, 112485. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112485>

Fernandes, J., Peixoto, M., Mateus, R., & Gervásio, H. (2019). Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and

compressed earth blocks. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118286.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118286>

Fioretti, R., & Principi, P. (2014). Thermal Performance of Hollow Clay Brick with Low Emissivity Treatment in Surface Enclosures. *Coatings*, 4(4), 715-731.

<https://doi.org/10.3390/coatings4040715>

Frangi, A., Fontana, M., Knobloch, M., & Bochicchio, G. (2008). Fire behaviour of cross-laminated solid timber panels. *Fire Safety Science*, 9, 1279-1290.

<https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.9-1279>

Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., ... Zheng, B. (2023). Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data*, 15(12), 5301-5369.

<https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>

Füchsl, S., Rheude, F., & Röder, H. (2022). Life cycle assessment (LCA) of thermal insulation materials : A critical review. *Cleaner Materials*, 5, 100119.

<https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100119>

Fundi, S. I., Kaluli, J. W., & Kinuthia, J. (2021). Finite element modelling of interlocking stabilized laterite soil block walls. *SN Applied Sciences*, 3(2), 225.

<https://doi.org/10.1007/s42452-021-04211-5>

Galán-Marín, C., Rivera-Gómez, C., & García-Martínez, A. (2015). Embodied energy of conventional load-bearing walls versus natural stabilized earth blocks. *Energy and Buildings*, 97, 146-154. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.054>

Gerber, D. J., & Lin, S.-H. E. (2014). Designing in complexity : Simulation, integration, and multidisciplinary design optimization for architecture. *SIMULATION*, 90(8), 936-959.

<https://doi.org/10.1177/0037549713482027>

Gervásio, H., & Dimova, S. (avec Européische Gemeinschaften). (2018). *Model for life cycle assessment (LCA) of buildings : EFIResources: resource efficient construction towards sustainable design*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/10016>

Goia, F. (2016). Search for the optimal window-to-wall ratio in office buildings in different European climates and the implications on total energy saving potential. *Solar Energy*, 132, 467-492. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.031>

Guerrin, A., & Lavour, G. (2016). *Traité de béton armé - Tome IV : Fondations*. Dunod.

Helmrich, A., Gerber, B., Gall, M., Horton, P., El Asmar, M., Sailor, D., Neveu, M., El Kassis, R., Sanboskani, H., Vogel, A., Yu, Y., & White, D. (2025). Developing long-term risk & resilience management strategies for physical asset and critical infrastructure projects. *Frontiers in Built Environment*, 11, 1530343. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1530343>

Hemmati, M., Messadi, T., Gu, H., Seddelmeyer, J., & Hemmati, M. (2024). Comparison of Embodied Carbon Footprint of a Mass Timber Building Structure with a Steel Equivalent. *Buildings*, 14(5), 1276. <https://doi.org/10.3390/buildings14051276>

- Hollberg, A., & Ruth, J. (2016). LCA in architectural design—A parametric approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(7), 943-960. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1065-1>
- Maithel, S. (2023). Improved burnt clay brick masonry : Lowering upfront embodied carbon, improving thermal comfort and climate resilience of new housing in the Indo-Gangetic Plains. *Comfort at The Extremes 2023: The Book Of Proceedings*. Comfort at The Extremes 2023. <https://doi.org/10.62744/CATE.45273.1190-452-461>
- Kandhan, K. U. M., & Jeevanantham, S. (2022). Comparative Study About AAC Block with Porotherm Brick. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 10(12), 1839-1844. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.48316>
- Kayaçetin, N. C., Verdoodt, S., Lefevre, L., & Versele, A. (2023). Integrated decision support for embodied impact assessment of circular and bio-based building components. *Journal of Building Engineering*, 63, 105427. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105427>
- Lagioia, R., Panteghini, A., & Puzrin, A. M. (2014). The ‘ I_3 ’ generalization of the Galileo—Rankine tension criterion. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 470(2172), 20140568. <https://doi.org/10.1098/rspa.2014.0568>
- Li, C., Pradhan, P., Chen, G., Kropp, J. P., & Schellnhuber, H. J. (2025). Carbon footprint of the construction sector is projected to double by 2050 globally. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 831. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02840-x>
- Li, H., Wang, L., Wei, Y., Wang, B. J., & Jin, H. (2022). Bending and shear performance of cross-laminated timber and glued-laminated timber beams : A comparative investigation. *Journal of Building Engineering*, 45, 103477. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103477>
- Li, Y., & Xu, P. (2006). Thermal Mass Design in Buildings — Heavy or Light? *International Journal of Ventilation*, 5(1), 143-150. <https://doi.org/10.1080/14733315.2006.11683731>
- Liang, Y., Li, C., Liu, Z., Wang, X., Zeng, F., Yuan, X., & Pan, Y. (2023). Decarbonization potentials of the embodied energy use and operational process in buildings : A review from the life-cycle perspective. *Heliyon*, 9(10), e20190. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20190>
- Lourenço, P. J. B. B. (1996). *Computational strategies for masonry structures*. Delft Univ. Press.
- Martínez-Martínez, J. E., Alonso-Martínez, M., Rabanal, F. P. Á., & Díaz, J. J. D. C. (2018). Finite Element Analysis of Composite Laminated Timber (CLT). *The 2nd International Research Conference on Sustainable Energy, Engineering, Materials and Environment*, 1454. <https://doi.org/10.3390/proceedings2231454>
- Mena, Q. (2020). Towards a structural efficiency classification system. *Structures*, 26, 298-310. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.04.012>
- Migoni Alexandre, E., Koskamp, G., Van De Leur, M., Wandl, A., & Van Timmeren, A. (2024). Quantifying the life cycle emissions of hybrid structures with advanced bio- and conventional materialization for low-embodied carbon urban densification of the Amsterdam Metropolitan Area. *Journal of Cleaner Production*, 483, 144273. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144273>

- Moncaster, A. M., Pomponi, F., Symons, K. E., & Guthrie, P. M. (2018). Why method matters : Temporal, spatial and physical variations in LCA and their impact on choice of structural system. *Energy and Buildings*, 173, 389-398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.039>
- Mouton, L., Allacker, K., & Röck, M. (2023). Bio-based building material solutions for environmental benefits over conventional construction products — Life cycle assessment of regenerative design strategies (1/2). *Energy and Buildings*, 282, 112767. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112767>
- Mouton, L., Ramon, D., Trigaux, D., Allacker, K., & Crawford, R. H. (2024). Life cycle environmental benchmarks for Flemish dwellings. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 4(1), 015005. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ad1bb7>
- Mouton, L., Trigaux, D., Allacker, K., & Crawford, R. H. (2022). Development of environmental benchmarks for the Belgian residential building stock. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1078(1), 012077. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012077>
- Müller, P., Miccoli, L., Fontana, P., & Ziegert, C. (2016). Calibration of partial safety factors for Earth Block Masonry under compression loading. In C. Modena, F. Da Porto, & M. R. Valluzzi (Éds.), *Brick and Block Masonry* (0 éd., p. 857-864). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b21889-107>
- Navaro Auburtin, P., Saadé, M., Manthey, M., Louërat, M., Martin, J.-L., & Baverel, O. (2024). Going beyond carbon : Influence of structural parameters on the environmental impacts of typical building structures. *Journal of Building Engineering*, 97, 110879. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110879>
- Olsson, J. A., Hafez, H., Miller, S. A., & Scrivener, K. L. (2025). Greenhouse Gas Emissions and Decarbonization Potential of Global Fired Clay Brick Production. *Environmental Science & Technology*, 59(4), 1909-1920. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c08994>
- Paknahad, C., Tohidi, M., & Bahadori-Jahromi, A. (2026). Comparative Assessment of Beam Configurations on the Embodied Carbon and Cost of Reinforced Concrete Two-Way Joist Slab Systems. *Buildings*, 16(8), 1578. <https://doi.org/10.3390/buildings16081578>
- Pelicaen, E., Novais Passarelli, R., & Knapen, E. (2023). Challenges to upscale earth block masonry in Western Europe from a life cycle perspective. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1196(1), 012062. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1196/1/012062>
- Pomponi, F., & Moncaster, A. (2018). Scrutinising embodied carbon in buildings : The next performance gap made manifest. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2431-2442. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.049>
- Preisinger, C. (2013). Linking Structure and Parametric Geometry. *Architectural Design*, 83(2), 110-113. <https://doi.org/10.1002/ad.1564>
- Röck, M., Saade, M. R. M., Balouktsi, M., Rasmussen, F. N., Birgisdottir, H., Frischknecht, R., Habert, G., Lützkendorf, T., & Passer, A. (2020). Embodied GHG emissions of buildings — The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*, 258, 114107. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>

- Rodrigues, L., Sougkakis, V., & Gillott, M. (2016). Investigating the potential of adding thermal mass to mitigate overheating in a super-insulated low-energy timber house. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 11(3), 305–316. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctv003>
- Schneider, A., Friedel, E.-M., Holsten, A., Li, C., Exton-Smith, F., & Reck, B. K. (2025). Evaluating nature-based material choices for structural and envelope components of buildings. *Journal of Physics: Conference Series*, 3140(14), 142001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3140/14/142001>
- Sharma, A., Saxena, A., Sethi, M., Shree, V., & Varun. (2011). Life cycle assessment of buildings : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 871–875. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.008>
- Shi, Y., Yang, Z., Zheng, S., Gao, D., & Yang, X. (2025). Multi-objective optimization of embodied carbon emission, energy consumption, and daylighting performance of educational building in the schematic design stage. *Journal of Building Engineering*, 106, 112594. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112594>
- Shibib, K., Qatta, H., & Hamza, M. (2013). Enhancement in thermal and mechanical properties of bricks. *Thermal Science*, 17(4), 1119–1123. <https://doi.org/10.2298/TSCI110610043S>
- Trachte, S., & Stiernon, D. (2025). Energy and Sustainable Renovation of Building Stock in Europe : The Environmental Benefits of Biobased Insulation Materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1554(1), 012100. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1554/1/012100>
- Souaid, C., Ten Caat, P. N., Meijer, A., & Visscher, H. (2024). Downsizing and the use of timber as embodied carbon reduction strategies for new-build housing : A partial life cycle assessment. *Building and Environment*, 253, 111285. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111285>
- Tecchio, P., Gregory, J., Olivetti, E., Ghattas, R., & Kirchain, R. (2019). Streamlining the Life Cycle Assessment of Buildings by Structured Under-Specification and Probabilistic Triage. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 268–279. <https://doi.org/10.1111/jiec.12731>
- Teixeira, E. R., Machado, G., P. Junior, A. D., Guarnier, C., Fernandes, J., Silva, S. M., & Mateus, R. (2020). Mechanical and Thermal Performance Characterisation of Compressed Earth Blocks. *Energies*, 13(11), 2978. <https://doi.org/10.3390/en13112978>
- Tigani, D., Van Kan, D., Tennakoon, G., Geng, L., & Chan, M. (2024). Measuring Embodied Carbon of Buildings : A Review of Methodologies and Benchmarking Towards Net Zero. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1363(1), 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1363/1/012030>
- Wang, R., Lu, S., Feng, W., Zhai, X., & Li, X. (2020). Sustainable framework for buildings in cold regions of China considering life cycle cost and environmental impact as well as thermal comfort. *Energy Reports*, 6, 3036–3050. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.10.023>
- Weber, R. E., Mueller, C., & Reinhart, C. (2021). *Generative Structural Design for Embodied Carbon Estimation*.

Younis, A., & Dadoo, A. (2022). Cross-laminated timber for building construction : A life-cycle-assessment overview. *Journal of Building Engineering*, 52, 104482.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104482>

Zhang, Y., Jiang, S., Quan, D., Fang, K., Wang, B., & Ma, Z. (2024). Properties of Sustainable Earth Construction Materials : A State-of-the-Art Review. *Sustainability*, 16(2), 670.
<https://doi.org/10.3390/su16020670>

Normes, Rapports et Documents Techniques

Association des Experts de Belgique. (2023). *Bordereau officiel des prix unitaires de la construction*. ABEX. <https://www.abex.be>

Association des Experts de Belgique. (2024). *Bordereau officiel des prix unitaires de la construction - Tarifs et indices officiels (Février 2024)*. ABEX. <https://www.abex.be>

Association des Experts de Belgique. (2025). *Bordereau officiel des prix unitaires de la construction - Extrait de l'indice et des tarifs de l'année 2025*. ABEX. <https://www.abex.be>

BC Materials. (2023). *Déclaration Environnementale de Produit (B-EPD) : Blocs de terre comprimée Earth Block & Mortier Bastard* [Déclaration Environnementale de Produit] (B-EPD 025.0271.003-01.00.00). SPF Santé Publique, Sécurité de la Chaîne Alimentaire et Environnement. <https://www.bcmaterials.org>

BC Materials. (2023). *Fiche Technique : Blocs de Terre Comprimée (CEB 90, 140, 190 mm) - Caractéristiques physiques et mécaniques* [Fiche technique / Catalogue]. BC Materials. <https://www.bcmaterials.org>

BC Materials. (2023). *Fiche technique et mise en œuvre du mortier de terre (leem) et des enduits* [Fiche technique / Catalogue]. BC Materials. <https://www.bcmaterials.org>

Comité européen de normalisation. (2011). *Contribution des ouvrages de construction au développement durable — Évaluation de la performance environnementale des bâtiments — Méthode de calcul* (NF EN 15978:2011). CEN. <https://www.cen.eu>

CSTB. (2020). *Appréciation Technique d'Expérimentation (ATEx) : Système constructif de briques isolées Technic Concept*. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. <https://www.cstb.fr>

Diamur. (2023). *Déclaration Environnementale de Produit (B-EPD) : Chape traditionnelle Screed U400* [Déclaration Environnementale de Produit]. SPF Santé Publique, Sécurité de la Chaîne Alimentaire et Environnement. <https://www.diamur.be>

Diamur. (2023). *Déclaration Environnementale de Produit (B-EPD) : Mortier de joint mince Diamur (265N et 355N)* [Déclaration Environnementale de Produit]. SPF Santé Publique, Sécurité de la Chaîne Alimentaire et Environnement. <https://www.diamur.be>

Diamur. (2023). *Fiche Technique : Chape traditionnelle de ciment (Screed)* [Fiche technique / Catalogue]. Diamur. <https://www.diamur.be>

JUWO Poroton. (2016). *Liste des produits Poroton pour la Belgique - Version française* [Fiche technique / Catalogue]. JUWO Poroton. <https://www.juwo.de>

JUWO Poroton. (2021). *Temps de mise en œuvre et directives de pose pour briques JUWO Poroton (Verwerkingstijden)* [Fiche technique / Catalogue]. JUWO Poroton. <https://www.juwo.de>

JUWO Poroton. (2022). *Gamme de produits et caractéristiques techniques des briques de terre cuite isolées ThermoPlan* [Fiche technique / Catalogue]. JUWO Poroton. <https://www.juwo.de>

JUWO Poroton. (2022). *Gamme de produits ThermoPlan - Fiche technique complémentaire* [Fiche technique / Catalogue]. JUWO Poroton. <https://www.juwo.de>

JUWO Poroton. (2022). *Offre commerciale et spécifications techniques pour briques ThermoPlan S7.5 (janvier 2022)* [Communication commerciale / Offre technique]. Courrier électronique commercial.

Organisation internationale de normalisation. (2006). *Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre* (ISO 14040:2006). ISO. <https://www.iso.org>

Organisation internationale de normalisation. (2017). *Performance énergétique des bâtiments — Besoins d'énergie pour le chauffage et le refroidissement, les températures intérieures et les chaleurs sensible et latente — Partie 1 : Procédures de calcul* (ISO 52016-1:2017). ISO. <https://www.iso.org>

Organisation internationale de normalisation. (2017). *Performance énergétique des bâtiments — Charges thermiques sensible et latente et températures intérieures — Partie 1 : Procédures générales de calcul* (ISO 52017-1:2017). ISO. <https://www.iso.org>

Organisation internationale de normalisation. (2017). *Performance énergétique des bâtiments — Partie 2 : Explications et justification de l'ISO 52016-1 et de l'ISO 52017-1* (ISO/TR 52016-2:2017). ISO. <https://www.iso.org>

Rockwool. (2023). *Déclaration Environnementale de Produit (B-EPD) : Laine de roche Rockfit Mono* [Déclaration Environnementale de Produit]. SPF Santé Publique, Sécurité de la Chaîne Alimentaire et Environnement. <https://www.rockwool.be>

Rockwool. (2023). *Fiche Technique : Panneaux d'isolation en laine de roche semi-rigides Rockfit Mono* [Fiche technique / Catalogue]. Rockwool. <https://www.rockwool.be>

Royal Institution of Chartered Surveyors. (2023). *Whole life carbon assessment for the built environment*. RICS. <https://www.rics.org/>

Stabilame. (2023). *Déclaration Environnementale de Produit (B-EPD) : Panneaux structuraux en bois lamellé-croisé (CLT Stabilame)* [Déclaration Environnementale de Produit]. SPF Santé Publique, Sécurité de la Chaîne Alimentaire et Environnement. <https://www.stabilame.be>

Stabilame. (2023). *Fiche technique structurelle : Bois Lamellé-Collé (LC Stabilame)* [Fiche technique / Catalogue]. Stabilame. <https://www.stabilame.be>

Stabilame. (2023). *Fiche technique structurelle : Bois Lamellé-Croisé (CLT Stabilame)* [Fiche technique / Catalogue]. Stabilame. <https://www.stabilame.be>

Wittstock, B., Gantner, J., Lenz, K., Schlanbusch, R. D., Weber, G., Sundqvist, M., Soust-Verdaguer, B., & Lützkendorf, T. (2012). *EeBGuide Guidance Document — Part B: Buildings — Operational Guidance for Life Cycle Assessment Studies of the Energy-Efficient Buildings Initiative*. EeBGuide. <https://www.eebguide.eu>

AFNOR. (2008). *Eurocode 5 : Conception et calcul des structures en bois — Partie 1-1 : Généralités — Règles communes et règles pour les bâtiments* (NF EN 1995-1-1). AFNOR.

Association Française de Normalisation. (2022). Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons — Définitions, spécifications et méthodes d'essais (Norme expérimentale XP P13-901). AFNOR.

Bureau de Normalisation. (2011). Spécifications pour éléments de maçonnerie — Partie 1 : Briques de terre cuite (Norme belge NBN EN 771-1:2011). NBN.

Bureau de Normalisation. (2012). Eurocode 5 — Conception et calcul des structures en bois — Partie 1-1 : Règles communes et règles pour les bâtiments — Annexe Nationale Belge (Norme belge NBN EN 1995-1-1/ANB:2012). NBN.

Bureau de Normalisation. (2012). Eurocode 6 — Calcul des ouvrages en maçonnerie — Partie 1-1 : Règles communes pour la maçonnerie armée et non armée (Norme belge NBN EN 1996-1-1+A1:2012). NBN.

Bureau de Normalisation. (2016). Eurocode 6 — Calcul des ouvrages en maçonnerie — Partie 1-1 : Règles communes pour la maçonnerie armée et non armée — Annexe Nationale Belge (Norme belge NBN EN 1996-1-1/ANB:2016). NBN.

Bureau de Normalisation. (2021). Eurocode — Bases de calcul des structures — Annexe Nationale Belge (Norme belge NBN EN 1990/ANB:2021). NBN.

Bureau de Normalisation. (2023). Eurocode — Bases de calcul des structures (Norme belge NBN EN 1990:2023). NBN.

Bureau de Normalisation. (2024). Eurocode 6 — Calcul des ouvrages en maçonnerie — Partie 2 : Conception, choix des matériaux et mise en œuvre des maçonneries (Norme belge NBN EN 1996-2:2024). NBN.

Bureau de Normalisation. (2025). Eurocode 5 — Conception et calcul des structures en bois — Partie 1-1 : Généralités — Règles communes et règles pour les bâtiments (Norme belge NBN EN 1995-1-1:2025). NBN.

Centre Technique du Bois et de l'Ameublement. (2018). Article technique sur l'ATex n° 2343 — Procédés de construction en bois. CTBA.

Comité Européen de Normalisation. (2011). Évaluation de la performance environnementale des bâtiments — Calcul de la performance environnementale des bâtiments — Méthode de calcul (Norme européenne EN 15978:2011). CEN.

Gouvernement Wallon. (2024). Décret PEB (Performance Énergétique des Bâtiments) du 16 juillet 2024. Moniteur Belge.

Gouvernement Wallon. (2026). Arrêté du Gouvernement wallon déterminant la méthode de calcul de la PEB pour les bâtiments neufs à partir du 1er janvier 2026. Moniteur Belge.

Gouvernement Wallon. (2026). Méthode PEN — Annexe A3 de l'Arrêté du Gouvernement wallon. Moniteur Belge.

Organisation internationale de normalisation. (2006). Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre (Norme internationale ISO 14040:2006). ISO.

Organisation internationale de normalisation. (2017). Performance énergétique des bâtiments — Besoins d'énergie pour le chauffage et le refroidissement, les températures intérieures et les

chaleurs sensibles et latentes — Partie 1 : Méthodes de calcul (Norme internationale ISO 52016-1:2017). ISO.

Organisation internationale de normalisation. (2017). Performance énergétique des bâtiments — Charges thermiques sensibles et latentes et températures intérieures — Partie 1 : Méthodes de calcul génériques (Norme internationale ISO 52017-1:2017). ISO.

Organisation internationale de normalisation. (2017). Performance énergétique des bâtiments — Indicateurs pour les exigences partielles de performance énergétique des bâtiments liées à l'énergie thermique — Partie 1 : Aperçu du cadre général (Norme internationale ISO 52018-1:2017). ISO.

Organisation internationale de normalisation. (2017). Performance thermique des composants de bâtiment — Caractéristiques thermiques dynamiques — Méthodes de calcul (Norme internationale ISO 13786:2017). ISO.

Organisation internationale de normalisation. (2023). Gaz à effet de serre — Quantification et déclaration des émissions de gaz à effet de serre résultant des opérations des chaînes de transport (Norme internationale ISO 14083:2023). ISO.

Royal Institution of Chartered Surveyors. (2023). Whole life carbon assessment for the built environment (2nd ed., RICS Professional Standard). RICS.

SNAAM. (2023). Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire : Armatures en acier soudées pour béton armé (FDES). INIES.

Union Européenne. (2018). Directive 2010/31/UE sur la performance énergétique des bâtiments (version consolidée). CELEX.