

---

## Mémoire de fin d'études : "Gratte-ciel en CLT, une alternative économique et écologique à l'acier et au béton"

**Auteur :** Dor, Youri

**Promoteur(s) :** Henz, Olivier

**Faculté :** Faculté d'Architecture

**Diplôme :** Master en architecture, à finalité spécialisée en art de bâtir et urbanisme

**Année académique :** 2019-2020

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/9108>

---

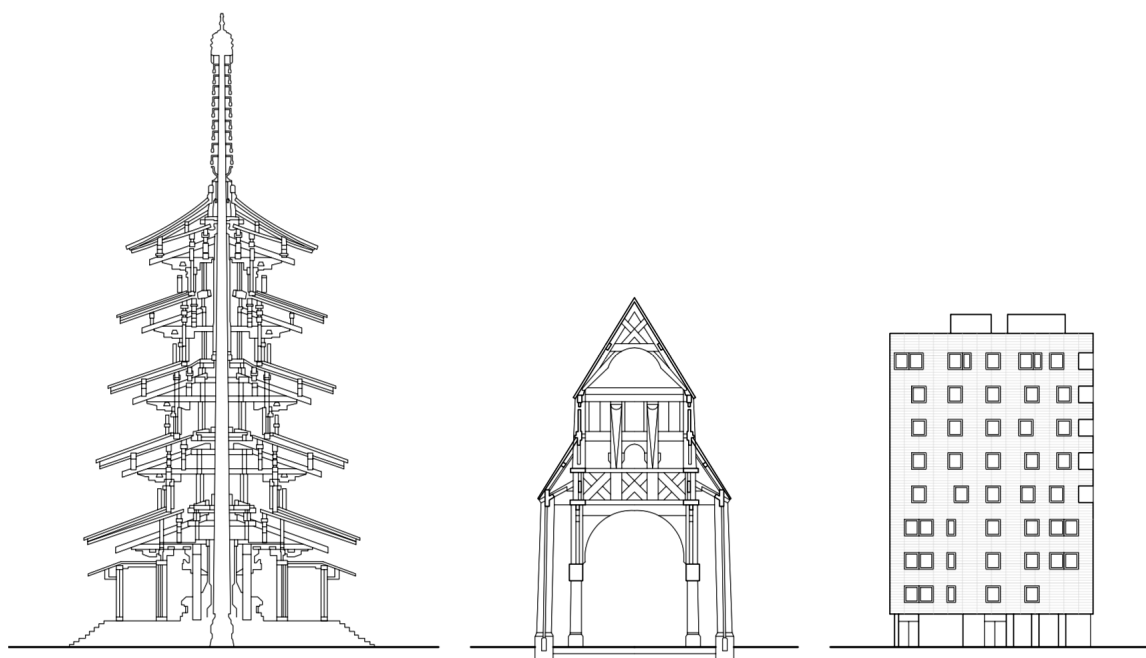
### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*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.*

---

S140446



GRATTE-CIEL EN CLT, une alternative écologique à l'acier et au béton

Image de couverture: © Green Michael. « *The case for tall wood buildings* ». 2<sup>e</sup> éd., 2011 p.24



Université de Liège - Faculté d'Architecture

# GRATTE-CIEL EN CLT, UNE ALTERNATIVE ÉCOLOGIQUE À L'ACIER ET AU BÉTON

Travail de fin d'études présenté par Youri DOR en vue de l'obtention du grade de  
Master en Architecture

Sous la direction de : Olivier Henz  
Année académique : 2019-2020  
Axe de Recherche : Haute Qualité Constructive



## Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier Olivier Henz pour m'avoir fait découvrir le CLT dans le cadre de l'option « empreinte environnementale ». Toute ma gratitude va droit à l'équipe d'enseignants du cours de projet « Ruralité » — Luc Mabile, Norbert Nelles, Sibrine Durnez et Virginie Pigeon — qui m'ont laissé carte blanche pour le projet de fin d'études dans lequel j'ai pu exploiter la verticalité avec ce matériau. Enfin je ne saurais comment remercier ma compagne Sarah Legrand de m'avoir soutenu, encouragé, et supporté pendant ces longs moments de recherche qui n'ont pas toujours été évidents, toutes mes pensées vont pour toi.



## À l'attention des lecteurs

Le document comporte des doubles pages, il est suggéré de consulter le PDF dans un affichage de pages opposées, comme si vous lisiez la version imprimée.

Pour une lecture optimale assurez que les pages numérotées avec un chiffre impaire se trouvent à droite sans quoi les doubles pages ne s'afficheront pas correctement. Cette page est la n°7 et doit se trouver à droite.



<b>PARTIE 1 : Préface</b> .....	<b>11</b>
1. Introduction.....	13
1.1. État de la question.....	15
1.2. Proposition d'étude.....	18
1.3. Méthodologie et programme d'étude.....	18
1.4. Résultats attendus.....	19
2. Introspection.....	20
2.1. Projet de fin d'études.....	20
2.1.1. Contexte.....	20
2.1.2. Concept.....	21
2.1.3. Fonction.....	25
2.1.4. Matériaux.....	25
2.1.5. Conclusion.....	26
<b>PARTIE 2 : Systèmes</b> .....	<b>31</b>
1. Contexte historique.....	35
1.1. Origine.....	35
1.2. VIII e siècle ACN.....	38
1.3. I er siècle PCN.....	38
1.4. XII e siècle.....	39
1.5. XIV e siècle.....	40
1.6. XV e siècle.....	42
1.7. XVIII e siècle.....	43
1.8. XIX e Siècle.....	43
1.9. XX e siècle.....	46
1.10. XXI e Siècle.....	52
2. Approche théorique.....	55
2.1. Matières premières.....	56
2.1.1. Acier.....	56
2.1.1.1. Minerais.....	56
2.1.1.2. Coke.....	56
2.1.1.3. Eau.....	58
2.1.2. Béton.....	59
2.1.2.1. Ciment.....	59
2.1.2.2. Agrégats.....	60
2.1.2.3. Eau.....	62
2.1.3. CLT.....	65
2.1.3.1. Bois.....	65
2.1.3.2. Adhésif.....	66
2.2. Production.....	69
2.2.1. Acier.....	69
2.2.1.1. Four à coke.....	70
2.2.1.2. Four électrique.....	71
2.2.2. Béton.....	72
2.2.3. CLT.....	75
2.2.3.1. Cross Laminated Timber.....	75
2.2.3.2. Laminated Veneer Lumber.....	77
2.2.3.3. Laminated Strand Lumber.....	78
2.3. Fin de vie.....	80
2.3.1. Acier.....	80
2.3.2. Béton.....	81
2.3.3. CLT.....	82
2.4. Propriété thermique.....	84
2.4.1. Isolation.....	84
2.4.1.1. Acier.....	84
2.4.1.2. béton.....	84
2.4.1.3. CLT.....	85
2.4.2. Comportement au feu.....	85
2.4.2.1. Acier.....	85
2.4.2.2. Béton.....	86
2.4.2.3. CLT.....	87

2.5. Aspect structurel .....	88
2.5.1. Caractéristique propre.....	88
2.5.1.1. Acier .....	88
2.5.1.2. Béton.....	88
2.5.1.3. CLT.....	89
2.5.2. Esthétique .....	89
2.5.2.1. Acier .....	89
2.5.2.2. Béton.....	89
2.5.2.3. CLT.....	90

## **PARTIE 3 : Analyse du Cycle de Vie.....95**

1. TOTEM.....	97
1.1. Qu'est ce que c'est ? .....	97
1.2. Enjeux .....	97
1.3. Base de données.....	98
1.4. Indicateurs d'impact .....	98
1.5. Étapes du cycle de vie.....	100
1.6. Résultats.....	101
1.7. Questionnements.....	101
2. Cas d'étude : Murray Grove.....	103
2.1. Présentation.....	103
2.2. Plans types .....	106
2.3. Composition de parois .....	108
2.3.1. Façades .....	108
2.3.2. Parois circulations verticales .....	110
2.3.3. Parois intérieures.....	112
2.3.4. Plancher .....	114
3. Comparaison des trois systèmes.....	116
3.1. Façades.....	118
3.2. Parois circulations verticales.....	119
3.3. Parois intérieures.....	120
3.4. Planchers.....	121

## **Conclusion .....125**

## **PARTIE 4 : Annexe.....131**

1. Facteurs de proportion .....	133
2. Comparaison brute des systèmes .....	135
2.1. Structures verticales.....	135
2.1.1. Acier .....	135
2.1.2. Béton.....	135
2.1.3. CLT .....	135
2.1.4. Coût pour toutes les étapes du cycle de vie .....	136
2.1.5. Coût pour tous les indicateurs d'impact .....	137
2.1.6. Précision du coût par indicateur d'impact .....	138
2.1.7. Proportions d'impact en fonction du système .....	139
2.2. Structures horizontales.....	141
2.2.1. Acier .....	141
2.2.2. Béton.....	141
2.2.3. CLT .....	141
2.2.4. Coût pour toutes les étapes du cycle de vie .....	142
2.2.5. Coût pour tous les indicateurs d'impact .....	143
2.2.6. Précision du coût par indicateur d'impact .....	144
2.2.7. Proportion d'impact en fonction du système .....	145
3. Cas exemplatifs.....	149
Bibliographie : .....	191
Sitographie : .....	199



## PARTIE 1 : Préface

*« Ce n'est sans doute pas la concentration verticale des habitants qui produit ces problèmes, mais la concentration verticale des problèmes. Accorder une telle importance à l'influence de l'architecture suppose qu'en agissant uniquement sur celle-ci on pourrait résoudre toutes les difficultés. Ce déterminisme architectural n'est-il pas un leurre ? Dans les représentations, l'architecture du quartier demeure surculpabilisée ».*

Bourdieu,

La misère du monde,

Seuil, Paris, 1993



## **1. Introduction**

L'essence même d'un projet d'architecture passe par ses matériaux de construction, d'un point de vue formel, théorique, social, philosophique, économique et écologique.

Depuis la nuit des temps, l'être humain construit son habitat à la force de ses bras et avec les matériaux dont il dispose autour de lui. Avant d'en inventer des nouveaux, il connaît uniquement ceux que lui prodigue la nature ; la terre, la pierre et le bois. Pendant tout un temps, la question d'impact écologique n'avait pas beaucoup de sens puisque la notion de réchauffement climatique n'existait pas. L'accroissement de la population et les « avancées » techniques ont permis d'entrevoir un « Nouveau Monde », des avancées qui ont poussé notre société dans une nouvelle ère induite par la révolution industrielle.

La prolifération du métal dans les années 1840 en Angleterre a donné naissance à une grande ère architecturale : elle a permis de concevoir de nouveaux objets, d'autres visions des espaces, d'audacieuses structures et des méthodes de production qui par la suite donneront naissance à la standardisation et aux éléments préfabriqués en série. La densité croissante et le besoin d'innovation pousseront les architectes à construire grand et haut ce qui était impossible jusqu'alors.

Ces nouveaux objets verticaux ont perturbé le paysage des mégapoles et la façon d'habiter les villes. Ce modèle a donné naissance à tout un éventail de projets de très grande hauteur ainsi qu'à une course effrénée vers le haut.

Ce dogme n'est pas le seul renouveau dans l'architecture ; à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, on voit apparaître un autre système constructif, l'ancêtre du béton armé.

Une aubaine pour les architectes, qui l'ont également utilisé pour des projets de grande envergure plus particulièrement dans la période moderniste (citons Le Corbusier qui en fait « bon » usage pour ses projets de

densification). Cela dit l'acier reste plus utilisé dans les constructions de gratte-ciel puisque plus léger et plus facile à mettre en œuvre en très grande hauteur.

À la fin du XX<sup>e</sup> siècle la question d'impact environnemental rentre en jeu, conséquence inévitable du réchauffement climatique. Aujourd'hui, retourner vers un matériau naturel et renouvelable offre de nouvelles perspectives aux villes, à l'architecture et plus globalement au monde.

Les hauts bâtiments en bois ne sont pas un nouveau concept, il y a plus de 1400 ans, les Japonais expérimentaient déjà ce type de constructions avec leurs pagodes. Ces bâtiments religieux pouvaient atteindre jusqu'à dix-neuf étages, ils ont résisté au temps, aux séismes et à l'humidité pendant des siècles. De nombreuses villes dans le monde attestent de ces projets de grande hauteur, citons par exemple les églises en Norvège, ou nos églises européennes faites de bois avant de passer à la pierre à cause des grands incendies. Ce concept n'est pas nouveau, néanmoins la technologie du CLT est contemporaine.

Les innovations récentes ont démontré qu'il est possible de construire très haut avec du bois. Le premier exemple qui l'a démontré est Murray Grove à Londres, un bâtiment de neuf étages entièrement conçu en CLT. Ce projet montre à quel point ce matériau peut être compétitif dans le monde de la construction d'immeubles. Les propositions récentes suggèrent des projets de dix à douze étages à Melbourne en Australie, un bâtiment de dix-sept étages est déjà construit en Norvège (actuellement le bâtiment fini le plus haut du monde en CLT) et un autre projet est en cours de construction en Autriche, avec une structure hybride alliant le béton au bois. Deux autres projets, dont la Oakwood Timber Tower à l'étude via l'université d'Oxford culminerait à plus de 300 m ou encore Tokyo, W350, un gratte-ciel dans la capitale japonaise qui dépasserait les 350 m.

Ces derniers exemples dépassent de loin les projets actuels, le développement de ces structures vertigineuses évolue de la même manière que les structures métalliques que nous avons pu connaître. Il est difficile de dire quel fut le premier gratte-ciel, mais nous pouvons citer le Tribune Building construit à New York en 1875 qui culmine à 79 m. Seulement un demi-siècle plus tard, l'Empire State Building et le Chrysler Building font leur apparition pour atteindre plus de 300 m.

### **1.1. État de la question**

Depuis la fin du modernisme, construire haut et dense est devenu un sujet tabou en architecture. Le mot tour évoque soit les gratte-ciel de verre pour l'élite, soit une image négative des HLM. Qui dit tour dit insécurité, insalubrité, entassement... Quoi qu'il en soit, le débat est ouvert depuis un certain temps et les avis divergent.

Néanmoins que l'on soit pour ou contre, il est une réalité qui montre que la construction dense et verticale est une réponse inévitable contre l'étalement urbain dû à la demande croissante en logements. D'ici 2050, nous vivrons un accroissement de près de 15 % de la population dans les villes ce qui engendrera une augmentation de la densité pour une demande en gratte-ciel plus élevée.

D'ici 10 ans nous serons amenés à construire un-milliard de logements à travers le monde dont la plupart se trouveront dans les centres. La densification urbaine ne peut donc pas être la seule réponse à une demande aussi grande. En 2030 la planète comptera quarante-trois villes géantes avec plus de dix-millions d'habitants chacune, selon les Nations Unies.



*« Today 50% of the world's population lives in urban environments. UN Habitat estimates that by 2050 roughly 70% of the world will live in urban environments. These environments will continue to demand large building solutions, as urban density becomes an increasingly important part of addressing Climate Change. UN Habitat also estimates that 3 billion people will need a new affordable home in the next 20 years. In today's building tradition this means that mostly concrete buildings will be built to meet this demand. Concrete's large carbon footprint will continue to be a challenge without alternative structural solutions for the world's major urban environments. »*

*Michael Green,*

*The case for tall wood buildings,*

*p. 22*

La question ici n'est pas de débattre du pour ou du contre, nous partons du principe que les gratte-ciel constituent une part importante de nouvelles constructions qui va aller en s'accroissant. Il est vrai que les projets de densification urbaine sont en cours sans pour autant projeter des tours, cela dit la demande mondiale en gratte-ciel augmente depuis quelques années et ces projets continueront à être construits que ce soit pour du logement ou pour d'autres fonctions...

En 2018 on recensait 1478 bâtiments de plus de 200 m dans le monde et ce nombre est en accroissement de 148 % depuis 2010. En 2019, dans le monde, cent-cinquante nouvelles livraisons de gratte-ciel, dont trente, dépassent les 300 m <sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Allix Grégoire, « Il existe exactement 1478 gratte-ciel de plus de 200m dans le monde »

La question qui se pose est donc plutôt d'ordre éthique, comment allons-nous faire ? Continuerons-nous à employer des anciens moyens de construction symboles d'éloge aux énergies fossiles ? N'y a-t-il pas là une alternative à explorer pour permettre le développement inévitable de nos villes en hauteur tout en respectant ou limitant notre impact sur la santé de la planète ?

Il existe énormément d'ouvrages qui traitent du CLT, comme une solution facile à des formes difficiles, des ouvrages qui parlent de la construction bois en général offrant ça et là des chapitres dédiés au CLT. Ensuite on a énormément de fiches « produits » venant des industries nous promettant monts et merveilles. Actuellement on a des ouvrages individuels traitant du même sujet, mais abordé selon des principes différents.

Aucun ouvrage n'est explicite en ce qui concerne la grande hauteur. L'exception qui confirme la règle est « *The case for tall wood buildings* » un des rares livres pionnier dans le domaine. Son auteur Michael Green tente une approche structurelle du CLT dans les gratte-ciel pour démontrer leur faisabilité.

Pour le cas des tours, les documents disponibles sur le CLT sont majoritairement en Anglais, le manque de ressources en français est indéniable. En ce qui concerne l'acier et le béton, on a beaucoup plus de documentation puisqu'on les a déjà étudiés. Cela dit il n'existe pas d'ouvrage présentant ces matériaux sous la même forme avec un comparatif des enjeux écologiques.

## 1.2. Proposition d'étude

Le maître mot dans cette étude sera le CLT, expliquer et comprendre l'engouement que suscite ce matériau chez les professionnels de la construction. Doit-il remplacer les modes de construction actuels ? Si oui, comment et pourquoi ?

Pour répondre à cette question, il faut bien comprendre les enjeux des différents matériaux utilisés dans les bâtiments de grande hauteur, l'étude se basera principalement sur leur analyse et leur comparaison, à savoir, l'acier le béton et le CLT.

Cette comparaison objective permettra de mieux comprendre les tenants et aboutissants de chaque matériau ainsi que leurs implications plus ou moins grandes dans la crise liée au réchauffement climatique.

## 1.3. Méthodologie et programme d'étude

L'étude sera composée de quatre parties distinctes :

Cette première partie est dédiée à l'introduction, une brève introspection dans le sujet suivi du projet de fin d'études qui a été réalisé préalablement au travail. Ce projet illustre mes implications personnelles ainsi que mon intérêt pour ledit matériau.

La deuxième partie est consacrée aux systèmes mis en comparaison dans cette étude. Chacun d'eux est défini suivant différentes approches — *contexte historique, matières premières, production, fin de vie, aspect thermique et structurel* — au sein desquelles ils sont mis en comparaison directe. Finalement cette évaluation nous permet de dresser un tableau comparatif objectif entre les différents aspects de chaque système.

La troisième concerne l'Analyse du Cycle de Vie, elle est composée de deux séquences ; la première aborde l'outil TOTEM utilisé pour quantifier les impacts environnementaux et aborder de manière précise l'Analyse du

Cycle de Vie tandis que la deuxième applique cet outil à un projet précis. Cette étude permet d'obtenir des chiffres relatifs aux coûts environnementaux liés aux trois systèmes dans le cadre du projet étudié. Ces coûts nous donnent une vision plus claire de l'impact sur l'ensemble du cycle de vie lié aux trois systèmes. Ils seront ensuite extrapolés aux surfaces du projet afin d'estimer un coût environnemental pour un niveau, et ce pour chaque système.

Une annexe en fin du travail est divisée en deux: premièrement un complément à la partie trois, on y trouve des précisions concernant les facteurs de proportions de volume structurel équivalent ainsi que les proportions des coûts environnementaux liés à chaque système. En répertoriant tous les cas qui correspondent aux critères de choix prédéfinis, la deuxième partie développe une liste de projets qui permet de se rendre compte de l'évolution des hautes structures bois à travers le monde.

#### **1.4. Résultats attendus**

J'espère que ce travail permettra aux jeunes architectes de mieux appréhender le potentiel du CLT ou autre type de panneau de bois, dans toutes constructions, peu importe l'échelle. Ce travail cherche à expliquer l'impact positif de l'obsolescence de l'acier et du béton par le CLT tout en étudiant ses limites à long terme. On ne peut présenter ce matériau comme solution pour sauver la planète, mais plutôt d'expliquer en quoi, comment et pourquoi il est un élément de réponse à la crise environnementale que connaît le monde contemporain.

Que les résultats liés à la **partie 3** « *Analyse du Cycle de Vie* » donne raison au bois, ce qui conforterait mes attentes quant à la grande hauteur. Pourquoi continuer à construire uniquement en béton et en acier ? Ne faut-il pas plutôt croire à une collaboration entre ces matériaux ?

## **2. Introspection**

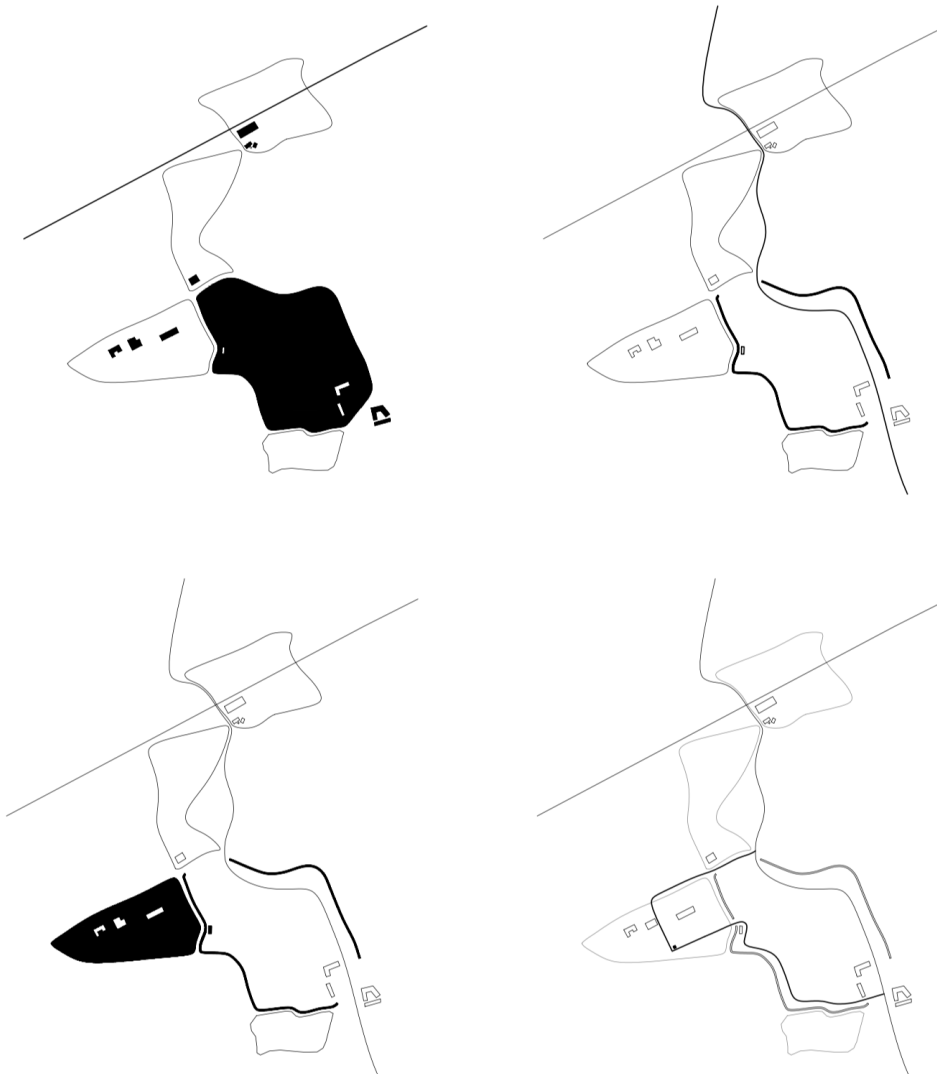
J'ai toujours été attiré par l'architecture verticale, non pas parce qu'elle joue un rôle presque sculptural, plutôt par son aspect conceptuel. Une architecture qui répond à la densité par la verticalité, une manière de libérer l'espace au sol. J'ai passé ma première année de Master dans l'atelier « *pour et contre l'architecture* » avec en parallèle l'option « *empreinte environnemental* », c'est là que j'ai découvert le CLT, qui m'a poursuivi depuis lors.

J'ai donc réalisé une reconversion de cité moderniste avec des interventions ponctuelles en CLT, des exhaussements de maisons unifamiliales. Enfin, en deuxième Master j'ai suivi l'atelier « *ruralité* » pour lequel j'ai dessiné une tour observatoire qui constitue le projet de fin d'études, origine de la question de recherche.

### **2.1. Projet de fin d'études**

#### **2.1.1. Contexte**

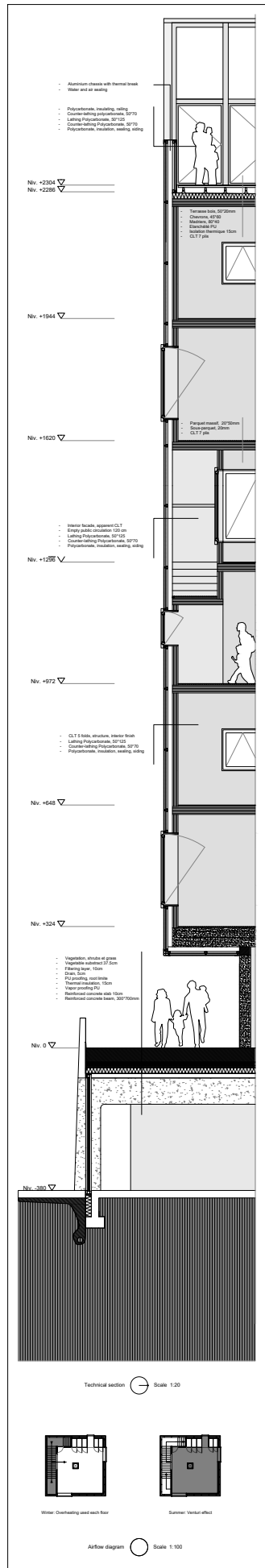
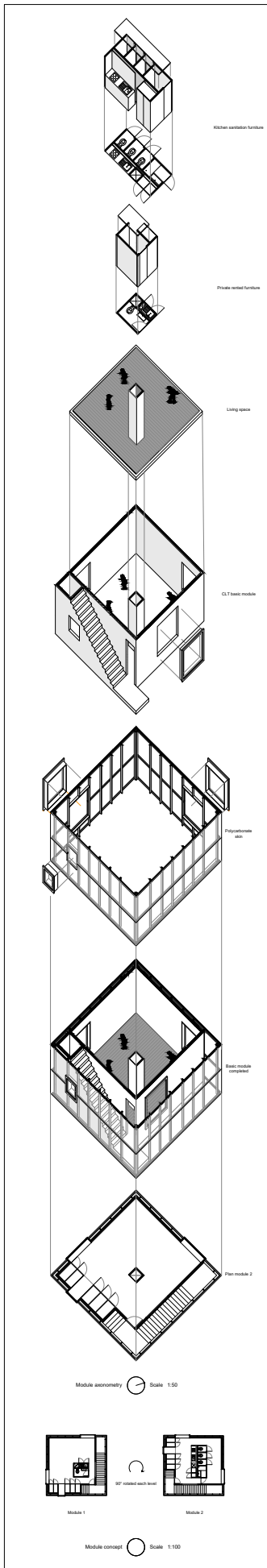
Le projet d'observatoire se développe sur tout le territoire du village de Gesves. Central à un Master plan développé en groupe, il est le point névralgique des liens qui tentent de relier les ilots actuellement isolés. Par la mobilité de voies douces, il développe une connexion entre le Ravel et l'église du village, passant par tous les points importants du développement territorial.

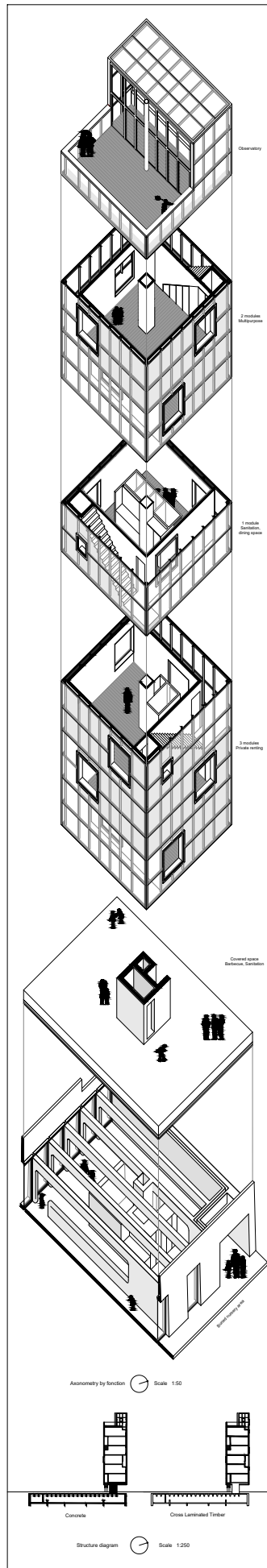
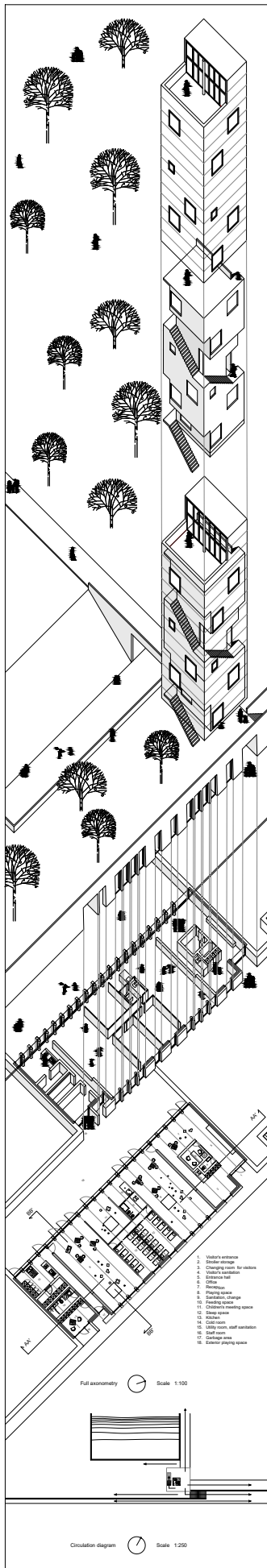


### 2.1.2. Concept

L'observatoire a pour objectif de voir, mais aussi d'être vu, il prend de la hauteur pour créer des liens visuels à travers les grandes échelles territoriales et apparait dans le paysage comme un signal miroitant. Il est élaboré selon un module identique répété et pivoté à chaque niveau.

Ce module préfabriqué confère au projet une rapidité et une efficacité constructive incontestable. Le schéma de superposition/rotation génère d'une part une circulation périphérique et d'autre part les façades. La transparence du bardage dévoile aux promeneurs l'ascension qui se fait dans un espace diaphane. Les murs de soutènement permettent d'ancrer la verticalité dans le paysage tout en induisant une direction vers le château.









### 2.1.3. Fonction

Le projet se compose en cinq parties : derrière les murs de soutènement se cache une crèche, le premier niveau fait office d'espace couvert, trois niveaux en location privative rentabilisent l'édifice, un niveau de service autonomise les deux niveaux sans fonction (classe verte, randonneur, exposition, refuge...) enfin, le dernier s'ouvre sur le paysage et dégage des vues directes sur le château, l'église et le Batit-Pire<sup>2</sup>.

L'observatoire apparaît alors comme un point de convergence, de rencontre et d'arrêt pour tous les habitants. Le projet se veut le plus polyvalent afin d'anticiper les changements et sa possible reconversion possible.

### 2.1.4. Matériaux

La partie émergée du projet est entièrement composée par des modules préfabriqués. ils sont livrés sur chantier déjà équipés et construits par empilement, seule cette partie est en bois.

La tour est entourée par une circulation périphérique développée par les modules eux-mêmes. Cette circulation est coincée entre la paroi de CLT et la peau en polycarbonate. Ce matériau permet à l'édifice de miroiter et dans un autre temps générer une surchauffe dans l'espace de circulation. Elle est théoriquement gérée par des extracteurs qui, soit la réemploient dans les espaces de vie en hiver soit l'évacuent par effet Venturi induit par la forme hélicoïdale de la circulation.

---

<sup>2</sup> Bâtiment désaffecté dont la démolition est planifiée, le Master Plan cherche à remettre en valeur ce projet comme convergence des flux de mobilité douce.

### 2.1.5. Conclusion

Le projet a suscité en moi un grand intérêt pour une architecture simple et épurée au concept pouvant être exploité de l'usinage à la mise en œuvre. J'ai essayé de concevoir un module pouvant être exploité, peu importe la fonctionnalité imposée. Le projet essaye de tendre vers une architecture éco-responsable, pour ce que j'en savais alors.

Il va sans dire que certains matériaux séduisent les architectes d'un point de vue purement esthétique et conceptuel, mais il ne faut pas oublier que chaque matériau a une implication et des conséquences sur notre environnement. On ne peut plus fermer les yeux avec seuls l'esthétique ou le concept comme « excuse ».

Afin d'affirmer ou d'infirmer le choix des matériaux, la défense du Travail de Fin d'Études sera basée sur l'analyse de ce projet en extrapolant la démarche et en appliquant les résultats obtenus de la **Partie 3**. Aurait-il été possible de faire d'autres choix plus intéressants dans une démarche écologique ?









## PARTIE 2 : Systèmes

*« Nous sommes entrés dans une ère où les nouveaux édifices nous font bien plus peur que les ruines. À l'heure où j'écris, de nouvelles formes de vie à base de silicone se glissent dans tous les interstices sans éveiller la moindre inquiétude, alors que s'opère ici une transformation du monde — promesse de richesse qui balayera les ruines — plus insidieuse qu'une guerre nucléaire. Dans les années 1980, nous nous attendions à une apocalypse, plus facile à concevoir que le scénario complexe à l'issue incertaine qui nous est imposé par l'argent, le pouvoir et la technologie réunis. »*

*– Rebecca Solni*





Le bois est le plus ancien matériau utilisé par l'homme il l'a très rapidement employé pour construire les premiers abris peu de temps après avoir découvert le feu



100 : le Panthéon est couronné d'un dôme en béton de 43 m de diamètre, le plus ancien ouvrage en béton



1300: La pagode Horiyu-ji culmine à plus de 32 m

1300: Les outils pour travailler le bois se perfectionnent, facilitent la mise en oeuvre des éléments structurels.

I<sup>er</sup> Siècle

XIV<sup>e</sup> Siècle

VIII<sup>e</sup> Siècle ACN

-700 : L'usage du fer était très répandu sur le globe, les anciens Chinois, Egyptiens, Chaldéens, Grecs et Romains de l'antiquité formaient, fondaient et soudaient le fer.



XII<sup>e</sup> Siècle

1100: Norvège, l'église en bois Urnes Stavkirke Stave Church culmine à 17 m.

1100: Près de Liège en Belgique, on voit apparaître un nouveau moyen de production du fer.





XVIII e Siècle

1709: Abraham Darby réalise la première coulée d'acier en utilisant un nouveau combustible, le coke

1779: Premier pont en fer forgé en Angleterre, Iron Bridge

XX e Siècle

1900: Le béton est abondamment utilisé pour les projets de l'exposition universelle de Paris de 1900.

1947: Le premier panneau de CLT voit le jour grâce à l'ingénieur français Pierre Gauthier

1902: Le Flat Iron Building sort de terre avec une structure en acier et culmine à 87 m

XVI e Siècle

1436: Le dôme de Sainte-Marie de la fleur avec 45,5m de diamètre intérieur, surpasse celui du Panthéon



XIX e Siècle

1800: La « Balloon Frame House », Etats-Unis, première maison construite en ossature bois légère clouée

1824 : premier brevet de ciment dit « artificiel » déposé par Joseph Aspin sous le nom de « ciment portland »

1848 : La barque de Lambot est le premier ouvrage réalisé en béton armé

1851: Crystal palace de Paxton

1889: Tour de Gustave Eiffel



XXI e Siècle

2008: Tour Burj Khalifa majoritairement construite en béton culmine à 828 mètres.

2014: Premier bâtiment de grande hauteur résidentiel en CLT, Murray Grove à Londres culmine à 26m

2018: La Mjøstårnet, plus haute tour en bois du monde culmine à 85,4 m





# 1. Contexte historique

## 1.1. Origine

Le bois est le plus ancien matériau utilisé par l'homme de par son abondance et sa disponibilité. Les premiers hommes l'ont très rapidement employé pour construire leurs abris peu de temps après avoir découvert le feu. Des ouvrages scientifiques parlent d'une civilisation du bois antérieure à celle de la pierre qu'on nomme l'Alithium<sup>3</sup>, mais l'architecture en bois n'a pas laissé beaucoup de traces puisqu'il s'agit d'un matériau vivant périssable, qui se décompose, on peut parler d'un système biodégradable.

*« Ils (les premiers hommes) commencèrent par dresser des pieux fourchus, y entrelacèrent des branchages et recouvrirent de boue ces parois ».*

Vitruve,

De Architectura

II, 1, 3

De manière continue, ces premières structures sont améliorées et développées malgré les outils rudimentaires dont les hommes disposent. Les ouvrages en bois sont très simples de par leur forme, en tunnel ou en dôme, qui permet de gérer la stabilité de l'édifice.

L'origine des premiers abris en Laponie après l'âge de glace a été découverte dans la région d'Enontekio<sup>4</sup>, il s'agit de cabanes construites par les chasseurs de rennes qui les utilisent pour se déplacer avec leur troupeau lors des grandes migrations. Ces abris se développent autour d'un épicéa qui fait office de structure principale.

---

<sup>3</sup> Kolb Joseph, « Bois, systèmes constructifs »

<sup>4</sup> Mathieu Sudres, « Caractères des structures bois dans l'histoire de l'architecture. Architecture, aménagement de l'espace », p.15

Plus tard, les cabanes s'émancipent du besoin de l'arbre au profit d'une plus grande autonomie de mouvement en fonction des ressources recherchées. Comme dans les structures développées autour du tronc, les perches de bouleau sont disposées tout autour de l'axe central et reposent en son sommet pour définir une ouverture nécessaire à l'évacuation des fumées.

Sur la structure primaire, ils placent des végétaux et de la boue entre les perches pour colmater les orifices, qui permettent une certaine étanchéité à l'extérieur. Cette technique évolue, peu à peu elle est remplacée par de la peau de bête qui renforce l'étanchéité, permet d'être réutilisée et facilite le transport et la construction.

Les systèmes vont progressivement évoluer vers des techniques qui mettent en œuvre des éléments plus légers. Ils disposent des branchages assez souples joints entre eux par des tressages à la manière du silex sur leurs outils.

*« Lorsqu'il s'agit de bâtir des huttes, les assemblages sont autant que possible remplacés par des ligatures, plus ou moins aucun outil ne doit avoir précédé la charpente ; et la charpente par ligature devance nécessairement la charpente d'assemblage ».*

Auguste Choisy,

Histoire de l'architecture

L'apparition des méthodes de ligature fait de ces nouvelles structures des charpentes<sup>5</sup> à part entière. Ces systèmes sont progressivement améliorés pour laisser place aux assemblages mécaniques, des pièces en bois s'encastrent les unes avec les autres pour bloquer les mouvements de la structure.

---

<sup>5</sup> déf : N.F. la combinaison et l'assemblage d'éléments linéaires formant une ossature permanente dans un bâtiment.

Quand l'homme décide de se sédentariser il y a environ douze-mille ans, il possède des troupeaux et des champs qu'il cultive, il n'a donc plus besoin de se déplacer pour trouver les ressources nécessaires à sa survie, il vient d'inventer l'élevage et l'agriculture.

L'apparition des villages et du regroupement des populations apportent une grande avancée dans le domaine de la construction, les renforçant dans un souci de pérennité pour les habitants. Deux méthodes sont mises au point ; l'appui des bâtisses sur des blocs de pierre et l'encastrement du bois dans le sol<sup>6</sup> qui permet une meilleure stabilité.

Les sols très durs on Finlande ont supplanté la deuxième méthode pour favoriser le développement des maisons sur un socle. Les premières traces de ces maisons datent de 2500 ACN, elles sont confectionnées par empilement de troncs s'emboitant entre eux sur de la pierre, les interstices comblés de mousse et de boue. Bien que très rudimentaires, ces ouvrages permettent d'exploiter les propriétés mécaniques du bois par empilement assurant une extrême solidité à la structure. Le toit composé de chevrons reposant sur cette même structure est ensuite recouvert de boue, d'écorce et planté de gazon. L'usage de chevrons atteste d'une bonne connaissance du bois dans la construction. En outre, la microstructure du bois permet d'emprisonner beaucoup d'air ce qui lui confère une merveilleuse isolation thermique naturelle.

---

<sup>6</sup> Mathieu Sudres, «*Caractères des structures bois dans l'histoire de l'architecture. Architecture, aménagement de l'espace* », p.17

## 1.2. VIII<sup>e</sup> siècle ACN

Depuis que l'homme sait faire du feu, il ne faut pas attendre longtemps avant qu'il forge. C'est après l'âge du bronze que naît l'âge du fer qui devient le symbole de cette nouvelle ère. L'archéologie moderne a montré que son usage était très répandu sur le globe, les anciens Chinois, Egyptiens, Chaldéens, Grecs et Romains de l'antiquité formaient, fondaient et soudaient le fer. Pendant longtemps, il est produit dans des fours à bas foyer et à basse température, 900 °C.

## 1.3. I<sup>er</sup> siècle PCN

Il y a un peu moins de deux-mille ans, à l'époque du règne de l'empereur Hadrien (117-138 pcn), le Panthéon d'Agrippa était couronné d'un dôme en béton non armé (alvéolé) de 43 m de diamètre intérieur. Il s'agit là de la mise en œuvre la plus ancienne que nous connaissons du matériau qui s'apparente le plus à notre béton contemporain.



Dôme du Panthéon de l'intérieur, photographe : © Martin Nicholas Kunz

Nous pouvons souligner le fait que ces techniques de construction diffèrent de celles utilisées aujourd'hui, mais présentent néanmoins des similitudes. Les constructions sont faites via des moules qui une fois enlevés, donne la forme finale à l'édifice. Comme aujourd'hui ils servaient également de soutien jusqu'à ce que la matière acquiert la résistance suffisante pour s'auto-porter.

Après de multiples tentatives de mélanges et de liants différents, on va continuer à produire un « béton » à base de ciment romain, un liant naturel. Par ces mélanges, ils avaient déjà mis au point des liants hydrauliques (qui durcissent en présence d'eau).

#### **1.4. XII<sup>e</sup> siècle**

Les ouvrages en bois les plus conséquents sont sans hésiter les édifices religieux, c'est ainsi qu'en 1130 en Norvège on bâtit des églises en bois, dont la célèbre Urnes Stavkirke Stave Church dont le point culminant se situe à plus de 17 m.



Urnes Stavkirke Stave Church, photographe : © Micha L. Rieser



En parallèle, près de Liège en Belgique, on voit apparaître un nouveau moyen de production du fer. Cette méthode qui consiste à l'affinage d'une première fonte se répand dans certaines villes d'Autriche. C'est aussi à cette époque que se développe une large industrie du fer en Savoie, Suisse, Allemagne et Italie ce qui permet le développement de la fonte et du fer à travers toute l'Europe. Au Moyen-âge, les meilleures fontes se font en Espagne et en Syrie et sont surtout recherchées pour les armes<sup>7</sup>.

### **1.5. XIV<sup>e</sup> siècle**

Vers 1300, on observe en Finlande, une évolution de la typologie des maisons, l'équarrissage des troncs va permettre de donner un autre aspect aux bâtisses, mais également d'augmenter la surface de contact entre les troncs ce qui renforce la qualité thermique du bâtiment. L'évolution de cette technique va de pair avec celle des outils employés, de plus en plus perfectionnés ils vont donner une finesse et une qualité grandissante à la mise en œuvre et aux jonctions des différentes pièces structurales.

Si les cabanes finlandaises sont l'origine du développement des structures en bois, il reste un matériau bien ancré dans une autre culture, le Japon. Parmi ces constructions, on recense beaucoup de pagodes dont la plus ancienne date du XIV<sup>e</sup> siècle, il s'agit de la pagode du temple bouddhiste Horiyuji qui culmine à plus de 32 m. Les charpentes japonaises sont très efficaces et ces constructions témoignent d'une maîtrise incroyable des principes structuraux du bois.

---

<sup>7</sup> Hartmann Gérard, « *L'acier historique* », p.2



Pagode d'Horiyūji, photographe : © Jean-Pierre Dalbéra

## 1.6. XV<sup>e</sup> siècle

En 1436 un nouveau dôme en béton est construit et surpasse celui des Romains, il s'agit du dôme de Sainte-Marie de la fleur de Brunelleschi (1377 - 1446) avec 45,5 m de diamètre intérieur. Le béton utilisé est ce qu'on appelle alors un béton de puzzle, utilisant les cendres du Vésuve comme liant.



Dôme intérieur de Sainte-Marie de la fleur, image : © e-venise.com

À la même époque, on continue de construire des maisons de petite taille en bois, comme en attestent les colombages au Moyen-Ages, dans lesquels les vides sont comblés de torchis. Ces structures permettent au bois de s'élever parfois jusqu'à quatre ou cinq niveaux au-dessus du sol.

En parallèle le fer se démocratise et on le coule toujours à basse température pour le forger principalement dans l'armement, la monnaie et les outils. Nous ne connaissons alors aucune application architecturale et il ne s'agit toujours pas d'acier.

## 1.7. XVIII<sup>e</sup> siècle

En 1709, Abraham Darby réalise la première coulée d'acier en utilisant un nouveau combustible, la coke qui joue un double rôle dans le procédé, il est combustible et permet la réduction du minerai par la diminution de carbone dans l'alliage. En effet, la consommation de combustible pour la fabrication de l'acier est considérable ce qui favorise la recherche d'un substitut plus abondant.

*« Il lui vint à l'esprit qu'il était envisageable de fondre le fer dans le haut fourneau avec du charbon de terre, et, de là, il tenta premièrement d'utiliser du charbon brut, mais cela ne marcha pas. Il ne se découragea pas, transforma le charbon en cendre, comme cela est fait avec le touraillage du malt, et obtint enfin satisfaction. Mais il découvrit qu'une seule sorte de charbon de terre était la mieux adaptée à la fabrication de fer de bonne qualité... »<sup>8</sup>*

## 1.8. XIX<sup>e</sup> Siècle

Des procédés industriels de fabrication de l'acier voient le jour, l'ingénieur anglais Henry Bessemer (1813 - 1898) met au point un affinage pneumatique (par air pulsé) et Wilhelm von Siemens (1823 - 1883) invente l'affinage au four à air pulsé et à gaz. C'est grâce aux convertisseurs Thomas et Martin que la fabrication d'acier accroît quantitativement dans toute l'Europe et que sa production industrielle est rendue possible.

---

<sup>8</sup> T. S. Ashton, « *Iron and Steel in the industrial revolution* », p.252

L'utilisation du fer et de l'acier reste jusque-là majoritairement militaire, mais on voit apparaître des applications architecturales à partir de la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle. Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, le fer forgé est utilisé pour la première fois comme élément structurel et donne naissance à un pont en fer forgé en Angleterre, Iron bridge (1776 - 1779). Matthew Boulton (1728 - 1809) et James Watt (1736 - 1819) l'utilisent pour la première fois dans la construction de bâtiment au début du XIX<sup>e</sup> siècle et par la suite des projets plus connus voient le jour comme le Crystal Palace (1851) de Paxton ou encore la tour de Gustave Eiffel (1889).



Premier pont en fer forgé, Iron Bridge, image : © Pixabay

À la moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, les économistes constatent que les pays les plus riches sont également ceux qui produisent le plus d'acier. Utilisé dans de nombreux domaines liés au développement économique d'un pays, il apparaît comme un matériau stratégique. Grâce aux exploits faits dans les méthodes d'extraction du minerai, la production mondiale passe de vingt-huit-millions de tonnes en 1870 à cent-trente-neuf millions en 1913<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup> Hartmann Gérard, « *L'acier historique* », p.2

Il faut attendre jusqu'en 1824 pour voir le premier brevet de ciment dit « artificiel » déposé par Joseph Aspin (1779-1855), un briquetier de Leeds qui obtient du clinker, il le baptise « ciment portland ». Les premières cimenteries du « portland » apparaissent rapidement sur le continent vers 1850 et ce n'est qu'en 1872 qu'elles parviennent jusqu'en Belgique.

Le premier ouvrage en béton armé ou « ciment armé » est la barque de Lambot en 1848. Joseph Louis Lambot (1814 - 1887) un agriculteur imagine une barque faite d'un treillis métallique recouvert de mortier. Cette barque qui existe toujours a été montrée à la seconde exposition universelle à Paris, mais n'a pas attiré beaucoup de regards.



Barque de Lambot, photographe : © Yves Philippe

À la fin des années 1870, la construction en béton armé n'existe toujours pas, pour cause, l'industrie cherche avant tout à exploiter au maximum le béton de type monolithique, plus populaire à cette époque. Pour la Belgique et la France, Francois Hennebique (1842 - 1921) va jouer un rôle important dans le développement du béton armé.

Alors que la question de préfabrication entre en jeu pour des procédés de plus en plus efficaces dans le domaine du bois et de l'acier, elle n'existe toujours pas pour le béton. L'évolution des systèmes préfabriqués bois est permis par l'amélioration des outils et notamment la machine à fabriquer les clous en acier et les outils d'équarrissage. En 1800, La « Balloon Frame House », États-Unis, est la première maison construite sur le principe d'ossature en bois légère clouée<sup>10</sup>.

## 1.9. XX<sup>e</sup> siècle

À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, on vit alors la révolution du béton armé et c'est en 1899 que l'ingénieur belge Paul Christophe (1870-1957) rédige un véritable ouvrage où il y définit des règles, des essais, des méthodes de calcul et publie des brevets. C'est ainsi qu'il est abondamment utilisé pour les projets de l'exposition universelle de Paris de 1900. C'est comme ça que naît le matériau de construction du XX<sup>e</sup> Siècle qui va universaliser le monde du bâtiment et de l'architecture.

La demande toujours croissante de construction a poussé celle-ci à se structurer pour y faire face au cours du XX<sup>e</sup> siècle. Nous avons connu deux vagues d'industrialisation pour la reconstruction des villes après les deux guerres mondiales. La première reprend l'utilisation de « béton maigre » dans les logements sociaux des années 20 et la seconde donne naissance à la préfabrication que nous connaissons aujourd'hui.

---

<sup>10</sup> Mathieu Sudres, «*Caractères des structures bois dans l'histoire de l'architecture* », p.24

Le développement du béton est rendu possible grâce à l'implication de trois acteurs principaux ; les architectes, les maitres d'ouvrages et les entrepreneurs. La nécessité de reconstructions d'après-guerre a laissé carte blanche aux architectes pour construire leurs idées modernistes comme solution simple à un manque de logements et des conditions de vie difficiles pour les habitants.

Grâce à l'adaptation du monde de la construction, les systèmes préfabriqués ont pu répondre à une demande toujours croissante, nous sommes passés de systèmes presque « artisanaux » à l'industrie de la construction dynamique. Au départ, les industries fabriquaient des éléments afin de construire un bâtiment préalablement dessiné. Nous avons ensuite fait évoluer ces systèmes pour définir des éléments préfabriqués « ouverts » qui rendent les composants industriels compatibles entre eux.

La construction de grande ampleur en béton préfabriqué a eu beaucoup de succès dans les barres de logements, les hangars, les ouvrages militaires, ponts et chaussées...



Unité d'habitation de Le Corbusier à Marseille, Image : © ADEUPa Brest



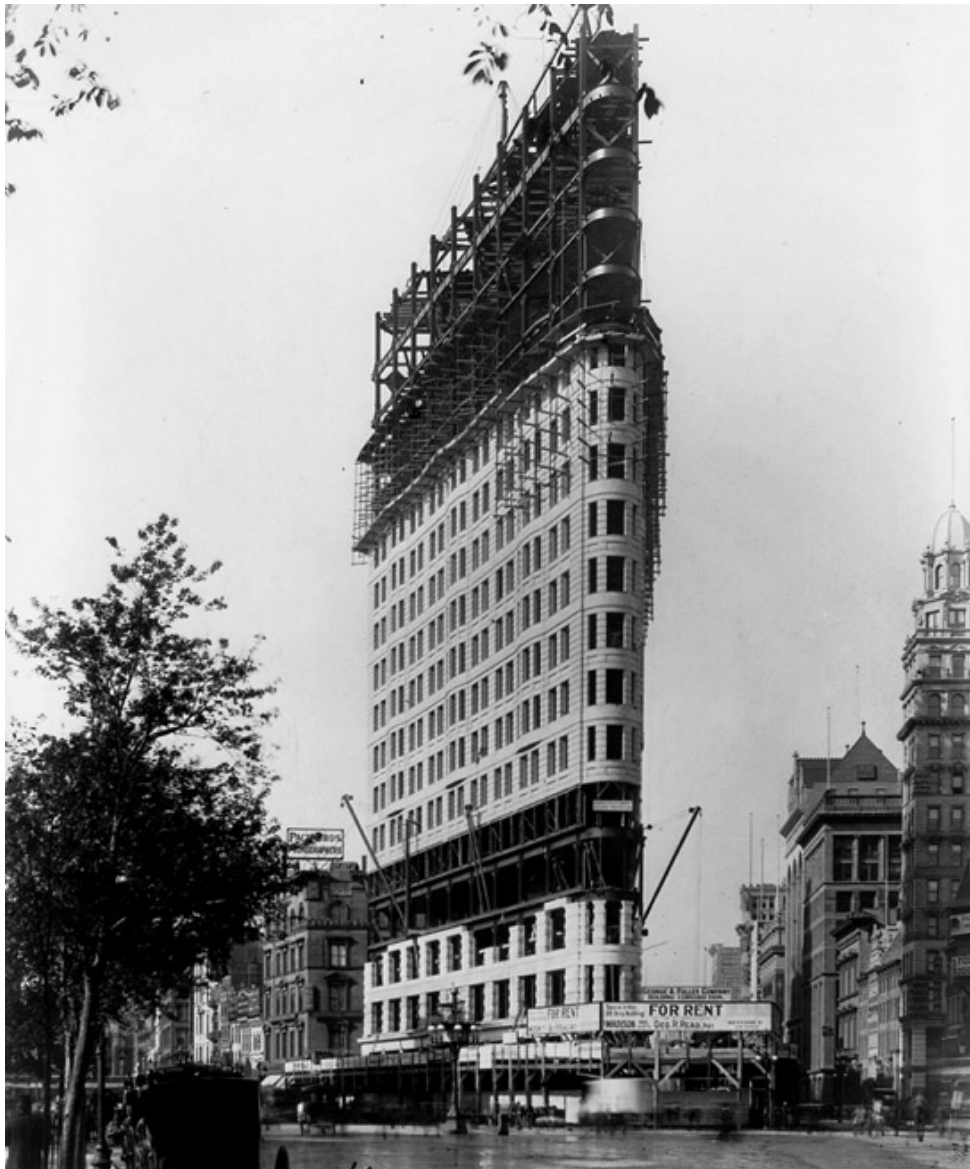
Pour des raisons culturelles, l'usage du métal en façade est relativement restreint, le premier exercice en façade est en fonte. C'est par le biais de l'art nouveau que l'essor du fer voit le jour comme matériau d'ornement et non plus strictement structurel.



Intérieur de la maison Tassel de Horta, photographe : © Henry Townsend

Ces tentatives seront interrompues par l'essor du béton armé en Europe. Son développement au détriment de l'acier est avant tout une conséquence dramatique des incendies qui ont démonté les convictions que les Européens donnaient en ce matériau.

Cela dit l'exercice continue aux États-Unis où les constructions métalliques se sont imposées face au béton prenant de plus en plus d'ampleur, elles domineront le paysage de gratte-ciel faits d'acier et de verre, naissance du style international après l'arrivée des architectes du Bauhaus. En 1902, on voit le Flatiron Building sortir de terre avec une structure révolutionnaire en acier qui se cache derrière des façades en pierre taillée pour répondre à un style esthétique imposé.



Construction du Flatiron Building 1902, image : © U.S. Library of Congress

Dans les années 1970, les architectes se réapproprient le matériau dans le style « high-tech » citons par exemple Jean Nouvel, Renzo Piano, Norman Foster... Les applications du métal dans l'architecture donnent progressivement naissance à de nouveaux styles l'utilisant pour donner vie à des formes complexes, l'architecture déconstructiviste ou encore l'architecture molle dans laquelle le beau est organique, reniant les angles droits aussi bien de l'extérieur que de l'intérieur. Une nouvelle idée du « beau » s'installe rappelant certaines formes organiques comme la feuille d'acanthé des colonnes corinthiennes ou des applications végétales de l'art nouveau.

L'utilisation de l'acier dans les tours mis au point un siècle plus tôt continue dans ce sens en proposant des projets de plus en plus titanesques. Les aciers se perfectionnent avec les technologies et la majorité des gratte-ciel utilisent les qualités du matériau comme ressource principale au profit de la hauteur.



Seagram Building de Mies Van der Rohe, photographie : © Jürg Machirus et Scott Murphy

L'architecture en bois va lentement être supplantée, d'abord par la pierre pour répondre à des demandes de résistance au feu puis chronologiquement par l'acier et le béton. Le bois est alors utilisé essentiellement dans des petits projets d'habitation et les grands ouvrages réservés aux matériaux jugés plus aptes.

Les recherches continuent et en 1947, le premier panneau de CLT voit le jour grâce à l'ingénieur français Pierre Gauthier<sup>11</sup>. Il propose de fabriquer des panneaux dont les dimensions ne sont pas limitées par la taille des arbres, mais composées de lames de bois croisées et coller l'une à l'autre ce qui offre des dimensions sans limites<sup>12</sup>. Jean Prouvé est un des premiers à utiliser ce nouveau matériau en exploitant les propriétés naturelles de souplesse et de résistance du bois. Ses exemples les plus connus sont sans doute la maison de Nancy (1954) et la buvette d'Evian (1956-1957).



Intérieur de la Buvette d'Evian aujourd'hui, photographe : © Claudio Merlini

---

<sup>11</sup> Woodeum, « *Innovation bois massif* »

<sup>12</sup> A l'heure actuelle les dimensions les plus courantes correspondent à 3m par 20m pour des raisons de poids et de transport.

Dans la foulée, d'autres panneaux voient le jour ; le panneau LVL<sup>13</sup> et LSL<sup>14</sup>. Ils apportent eux aussi de nouvelles possibilités en architecture, en termes de mobilier, de finition, mais aussi de structure. Aujourd'hui les deux types sont majoritairement utilisés dans le mobilier, mais le LVL peut comme le CLT devenir structure à part entière.

Malheureusement le panneau de bois en temps que structure est oublié peu à peu, pour cause tous les regards restent tournés vers le béton armé et l'acier. C'est pourquoi il faudra attendre les années 90 pour que le système retrouve un nouvel essor, les premières grosses industries lui étant destinées s'installent d'abord en Autriche et en Allemagne.

## **1.10. XXI<sup>e</sup> Siècle**

Aujourd'hui l'acier est plus que jamais utilisé que ce soit dans l'architecture, l'automobile, l'aviation, l'informatique... Le développement d'autres types de métaux est important, mais il garde une place omniprésente dans notre civilisation contemporaine au même titre que le béton. Même si il possède des caractéristiques très intéressantes, il n'en reste pas moins un facteur non négligeable de pollution. Ces facteurs négatifs ont été et sont de plus en plus présents dans l'esprit des architectes pour qui la question écologique a une importance grandissante.

Durant la dernière décennie on remarque une évolution significative dans la construction de gratte-ciel, l'acier qui était le système de prédilection est remplacé ou mixé, comme le montrent des projets de tours en béton armé préfabriqué et précontraint.

---

<sup>13</sup> LSL est l'abréviation de l'anglais Laminated Strand Lumber, panneau de particules

<sup>14</sup> LVL est l'abréviation de l'anglais Laminated Veneer Lumber, panneau stratifié

Pour ce faire, de nouveaux types très résistants ont été mis au point afin de répondre aux contraintes des plus grandes tours du monde. Pour exemple, la tour Burj Khalifa est essentiellement construite en béton armé à raison de 330 000 m<sup>3</sup><sup>15</sup>.

Aux prémices du XXI<sup>e</sup> siècle, des programmes de recherche ambitieux destinés à l'harmonisation européenne des règles de calcul des structures permettent au CLT de s'émanciper en tant que nouveau moyen constructif stable, et de rejoindre la classe des matériaux de construction « traditionnels ». À une époque où l'enjeu environnemental est ancré dans nos mœurs, ce système crée un engouement fou dans la communauté qui le met en avant face à ses concurrents directs.

Après de nombreuses applications du CLT dans divers projets de petite à moyenne hauteur, les architectes s'y intéressent pour la très grande hauteur. C'est ainsi qu'en 2009, le premier bâtiment résidentiel de plus de 25 m sort de terre à Londres, Murray Grove. Ce projet a suscité un intérêt international et des débats autour du CLT comme solution innovante aux moyens de constructions mis en oeuvre aujourd'hui. Le bois prend alors une toute nouvelle tournure et entre en compétition avec l'acier et le béton.

---

<sup>15</sup> Lycée Pierre-Adrien, « *Burj Khalifa: La plus haute tour du monde, et de loin...* »

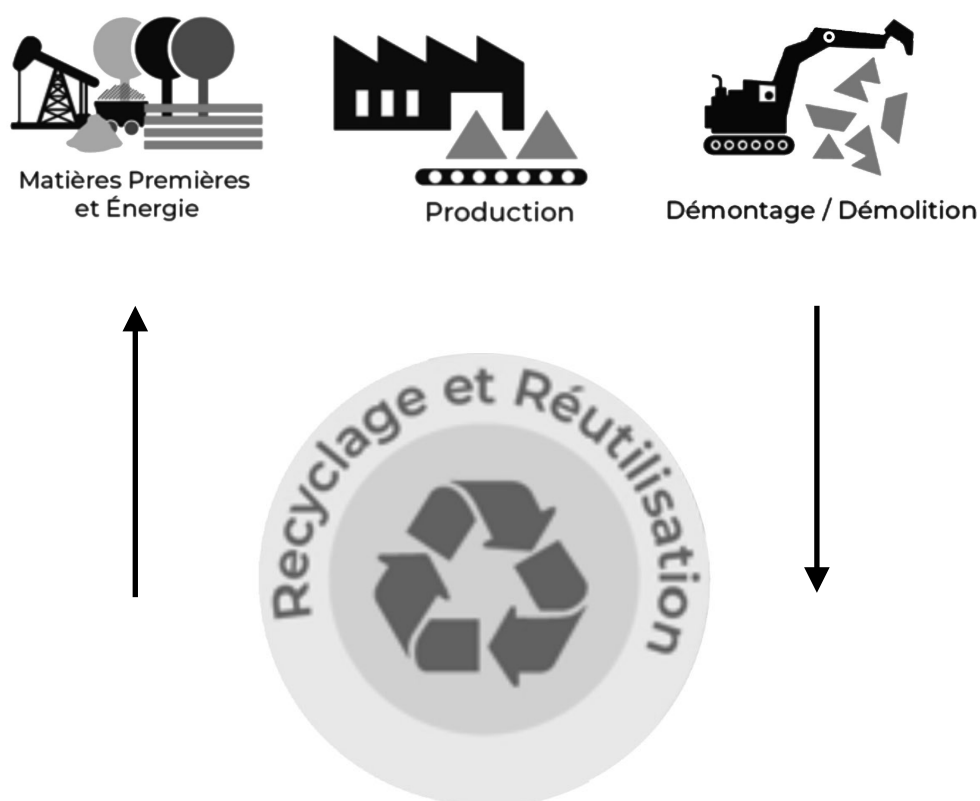


## 2. Approche théorique

Cette partie cherche à expliquer et comprendre de manière assez large l'impact des trois systèmes par le biais de plusieurs constats liés *aux matières premières, la production et le traitement en fin de vie*. Il s'agit d'une approche succincte de l'analyse du cycle de vie.

Cette démarche « simpliste » est théorique et n'a pas pour vocation de quantifier précisément l'effet des divers matériaux sur l'environnement, mais plutôt d'apporter une observation, une vision d'ensemble sur ce qu'ils représentent aujourd'hui. Elle permet en outre de se familiariser avec les divers systèmes et de mieux comprendre leurs *caractéristiques thermiques, structurelles et massiques*.

**Schéma** : Représentation de l'approche simplifiée du cycle de vie mise en avant dans cette partie<sup>16</sup>



<sup>16</sup> Demesmaecker P., Vannerom A., « *TOTEM le guide: Une méthodologie belge pour évaluer les impacts environnementaux des bâtiments* » Infographie: © Olivier Gilgean et Thierry Marcelis p.18



## 2.1. Matières premières

### 2.1.1. Acier

#### 2.1.1.1. Minerais

Son constituant premier est le fer qui est très rarement trouvé à l'état pur, il fait généralement partie de nombreux autres minéraux naturels comme l'hématite, la magnétite, la sidérite, la pyrite... Le fer peut également être obtenu à partir d'oxydes, car il y en a beaucoup dans la nature et ceux qui ne le sont pas peuvent s'oxyder. Les principales mines de fer se trouvent en Australie et au Brésil d'où les minerais sont exportés vers l'Europe ou l'Asie afin d'être transformés en acier. Pour en produire une tonne, il faut utiliser 1,6 tonne de minerais de fer.

#### 2.1.1.2. Coke

Sans le coke, le minerai de fer ne peut devenir de l'acier c'est pourquoi il est considéré ici comme une matière première à part entière. Il s'agit d'un combustible créé par l'homme à partir de charbon de bois naturel aussi appelé la houille. Obtenir du coke n'est pas chose aisée bien que facilité par nos infrastructures actuelles. Pour une tonne d'acier, il faut utiliser plus ou moins 450 kg de coke.

La durée de cuisson pour la transformation varie de 16 à 20 heures en fonction de la qualité recherchée<sup>17</sup>. Pendant la cuisson, le mélange de houille est progressivement transformé par élimination des matières volatiles et ensuite par transformation physique.

---

<sup>17</sup> 16 à 20 heures dans le cas de coke à destination métallurgique, sinon ça peut varier de 16 à 40 heures.

La température maximale atteinte à près de 1000 °C, il faut passer à l'étape de refroidissement à l'aide d'une grande quantité d'eau (2 m<sup>3</sup> pour éteindre une tonne de coke à 1000 °C). L'utilisation de l'eau permet aussi d'enlever les traces de soufre dans le mélange qui peuvent être particulièrement néfastes à une destination métallurgique.

Si le secteur de la construction joue un rôle important dans le réchauffement climatique c'est en partie à cause d'une grande consommation d'énergie pour transformer, transporter et construire. C'est pourquoi la combustion de charbon, énergie fossile, doit être abandonnée à raison de 99 % en 2050 pour rester sous la barre des 2 °C de réchauffement climatique<sup>18</sup>.

On remarque d'ailleurs une chute de son utilisation et de nombreuses fermetures de mines comme en Allemagne en pleine transition énergétique qui vient de fermer sa dernière mine de charbon dans la région de la Ruhr. Si le pays n'en produit plus, il continue à l'exploiter, près de 40 % de l'énergie électrique est produite avec de la houille importée ainsi que du lignite beaucoup plus polluant, mais moins onéreux. Si les mines sont obsolètes en Allemagne, on en remarque d'immenses de lignite toujours en activités dans le pays et les centrales électriques au charbon venues d'Australie ou de Chine produisent à plein régime en Allemagne<sup>19</sup>.

---

<sup>18</sup> « *Energie-Climat: 100% d'énergie renouvelable d'ici 2050* ». WWF, 2011, p. 10

<sup>19</sup> France 24, « *L'Allemagne ferme sa dernière mine de charbon, fin d'une époque dans la Ruhr* »

### 2.1.1.3. Eau

L'industrie métallurgique est très gourmande en eau, en 2012, plus de 28 % de la consommation d'eau de l'industrie wallonne est destinée à la métallurgie (hors potabilisation, production et industrie de l'équipement). Elle se chiffrait alors à 68 millions de mètres cubes. Ce secteur est le premier consommateur industriel d'eau, utilisée en partie pour le refroidissement, mais majoritairement dans le rinçage des installations et pour le traitement des gaz<sup>20</sup>.

**Tableau 1** : Récapitulatif et quantification des matières premières nécessaires à la fabrication d'acier

Matières premières	Masse %
Fer	160
Coke	45
Eau	1000
Acier	100

<sup>20</sup> Service Public de Wallonie, « *La sidérurgie: la production et la transformation de l'acier* »

### 2.1.2. Béton

Le béton quant à lui a besoin de trois ressources essentielles ; le ciment, de l'eau et des agrégats. On se rend compte qu'il s'agit du matériau qui a besoin de la plus grande diversité de matières premières toutes provenant d'une multitude d'endroits.

#### 2.1.2.1. Ciment

En fonction de l'usage du béton (fondation, dalle, colonne...), la dose de ciment couramment utilisée varie entre 300 et 400 kg/m<sup>3</sup>.

Le ciment est un liant hydraulique artificielle, qui nécessite deux ressources ; le calcaire et l'argile. Sa fabrication se décompose en plusieurs étapes. Il faut tout d'abord extraire le calcaire et l'argile de la carrière. Ces deux éléments qui le composent respectivement à 80 % et 20 % ne sont pas extraits de la même manière, on a d'une part des explosifs pour le calcaire et d'autre part des pelleteuses pour ramasser l'argile. La majorité des carrières se trouvent à proximité des cimenteries. En effet, ils sont des matériaux communs faciles à trouver, il est donc moins cher d'exploiter des carrières locales plutôt que de les importer depuis l'étranger.

Extraite, la roche est amenée jusqu'au concasseur qui va la transformer en poudre fine pour directement l'acheminer jusqu'à l'usine où elle va subir un séchage et un broyage afin d'obtenir une poudre encore plus fine qu'on pourrait qualifier de farine. Celle-ci va alors être préchauffée à 800 °C pour finir dans un four à une température de 2000 °C.

Cette chauffe permet d'obtenir des granulats de clinker qui vont être refroidis artificiellement par un système de soufflerie pour ensuite être à nouveau broyés et coupés avec du gypse, mélange qui en fait le produit final : le « ciment portland ».

Le clinker est à lui seul responsable de 5 % des émissions de GES anthropiques responsables du réchauffement climatique. Les chiffres nous montrent qu'une tonne de clinker produit approximativement une tonne de CO<sup>2</sup> : 55 % est lié la décarbonatation du calcaire, 35 % pour l'usage de combustible nécessaire à la cuisson et les 10 % restant pour l'électricité<sup>21</sup>.

#### 2.1.2.2. Agrégats

La quantité d'agrégats nécessaire pour la fabrication de béton varie entre 950 et 1100 kg/m<sup>3</sup>. Il s'agit de l'ensemble des matériaux inertes solidarisés par le ciment. Naturels ou artificiels, ils occupent trois quarts du volume fini du béton pour former son squelette inerte. La qualité technique et visuelle dépend énormément de celle des granulats, c'est ainsi que nous en distinguons trois types ; le sable, le gravillon et le grave.

Les minerais non-métaux représentent la majorité des extractions de matière première en termes de poids : le sable, le gravier et la pierre concassée représentent 24 % des extractions pour le bâtiment<sup>22</sup>. On comprend alors que ces matériaux presque inexploités auparavant obtiennent une importance de plus en plus grande dans le monde de la construction et pour les industriels qui y contribuent.

Il est vrai que les agrégats de tailles moyennes (gravier, gravillon) ont des provenances diverses et variées ce qui n'est pas le cas du sable utilisé pour le béton. Juste après l'eau il est la ressource minérale la plus exploitée par l'homme<sup>23</sup>, on en retrouve partout, dans les verres, les téléphones, les ordinateurs... Néanmoins, le béton est son premier consommateur et de loin, mais l'exploitation et l'utilisation de cette ressource n'est pas sans conséquence sur le plan environnemental, économique ou encore social.

---

<sup>21</sup> Souchu Philippe, « *Durabilité et recyclage du béton ou le cycle bouclé de la vie du béton* »

<sup>22</sup> OECD Publishing. « *OECD (2018), Global Material Resources Outlook to 2060: Economic driver and environmental consequences* » p120

<sup>23</sup> Herart Pascal, « *Pénurie de sable, un enjeu planétaire environnemental et économique* »

Le sable ne se produit pas aisément, c'est un travail de dizaines voir de centaines de milliers d'années pour que la nature le produise en grande quantité. Il est une ressource abondante sur terre, mais tous les types ne sont pas propices pour le béton, par exemple, les grains du désert sont trop petits et trop ronds. Voilà pourquoi les sables continentaux, des rivières et des plages sont si convoités.

Il est sorti de terre dans des carrières, aspiré par des dragues en bordure de plage, ou raclé à la pelle mécanique dans les rivières. Toutes ces techniques affectent la qualité de l'eau en remuant les fonds, dévastant la plupart du temps les paysages et les écosystèmes, une altération directe de la biodiversité.

Son extraction affecte également la stabilité des fonds marins, ce qui accentue une érosion des sols au risque d'exposer les populations à des risques. En Indonésie, plus de sept petites îles ont disparu sous l'effet de l'érosion provoquée par la drague du sable périphérique<sup>24</sup>.

Outre l'aspect environnemental, un réel problème d'ordre économique s'installe. La demande au Maroc a généré la création de filières illégales d'extraction, on assiste à de vraies mafias emplies de corruption.

Nous avons exploité jusqu'à présent plus de 75 % des plages du monde et ça continue. Une étude des Nations-Unies publiée en 2019 fait état de cette exploitation à l'échelle mondiale, elle en conclut que les granulats utilisés dans le béton constituent les matériaux les plus exploités sur la planète. Leur consommation annuelle tous usages confondus est de 40 Gigas tonnes et en 2017, la production de béton en a nécessité 30. Selon les rapports, cette quantité pourrait croître pour atteindre les 50 Gigas tonnes en 2030<sup>25</sup>. Ces chiffres en croissance exponentielle apparaissent insoutenables dans un monde où le sable est déjà une ressource qui se fait rare.

---

<sup>24</sup> Courrier International, « *Les îles englouties de l'Indonésie* »

<sup>25</sup> UN Environment, « *Rising demand for sand calls for resource governance* »

L'apport des fleuves ne peut en aucun cas suivre une telle croissance. L'ONU insiste sur la réduction de sa consommation, une des solutions serait d'homogénéiser les pratiques et réglementations concernant l'exploitation du sol et plus particulièrement du sable. Mais les groupes illégaux dans certains pays restent inévitables, c'est pourquoi il préconise l'utilisation de matériaux issue d'anciennes constructions plutôt que l'extraction de nouveaux agrégats.

### 2.1.2.3. Eau

L'eau dite « de gâchage » est un élément essentiel dans la fabrication du béton, elle correspond à la quantité totale d'eau active (eau ajoutée, eau se trouvant sur la surface des agrégats et l'eau contenue dans les adjuvants).

L'humidité contenue dans les agrégats varie énormément en fonction du type, entre 30 et 150 litres par mètre cube. Pendant le calcul du rapport eau/ciment, il faut utiliser cette quantité d'eau qui varie aussi fortement en fonction du béton désiré, entre 120 et 200 litres par mètre cube.

Ainsi l'eau ajoutée doit être calculée en tenant compte de l'humidité des agrégats et des indications pour obtenir le mélange souhaité. Ajoutée pendant le mélange, elle permet d'hydrater le ciment et donc de lier les composants les uns aux autres.

Au-delà de ça, elle permet d'obtenir quelque chose d'homogène pour répartir correctement tous les éléments entre eux. La texture du mélange est en grande partie due à son incorporation qui permet de le rendre plus maniable, ce qui facilite sa mise en œuvre.

L'eau ajoutée pour la fabrication du béton doit respecter certaines normes (SIA 162, 162/1). Selon elles, l'eau de gâchage doit être exempte de toute substance nocive, au mieux elle doit provenir du réseau de distribution potable. Le cas échéant elle doit être soumise à des tests afin de vérifier sa bonne conformité aux prescriptions.

Ainsi la majorité de l'eau ajoutée au béton est la plupart du temps de l'eau potable. Dans les pays occidentaux, la question ne se pose pas puisque nous y avons accès facilement.

Sans entrer dans un long débat, nous pouvons déjà admettre que ce n'est pas le cas partout. Alors qu'une grande partie du monde meurt de soif ou s'intoxique avec des sources d'eaux polluées<sup>26</sup>, nous en surconsommons dans la construction.

L'eau est un élément important dans la fabrication puisqu'il faut en moyenne ajouter au mélange 150 à 300 litres par mètre cube. Si nous faisons un bref calcul, six milliards de mètres cubes de béton par an à raison de 200 litres en moyenne par mètre cube correspondent à 1200 milliards de litres (1,2 milliard de mètres cubes) d'eau possiblement potable consommée par le béton uniquement pour sa fabrication, ces chiffres nous montrent à quel point il est un matériau gourmand.

**Tableau 2 :** Récapitulatif et quantification des matières premières nécessaires à la fabrication de béton

Matières premières	Masse %
Ciment	15
Agrégats	44
Sable	34
Eau	7
Béton	100

<sup>26</sup> Solidarités Internationales. « Baromètre de l'eau, de l'hygiène et de l'assainissement »





### 2.1.3. CLT

#### 2.1.3.1. Bois

Pour les panneaux, il provient d'une exploitation durable ce qui favorise son renouvellement, car soulignons le, il est la seule ressource renouvelable utilisée dans la construction, produit issu de la photosynthèse.

Elle consiste en la capture de CO<sup>2</sup> pour rejeter de l'oxygène. On sait que 75 % des GES ne sont autres que le CO<sup>2</sup>, ce qui signifie que les plantes, y compris les arbres absorbent ce gaz pendant leur croissance. Le bois a la capacité de le stocker à raison de 700 kg/m<sup>3</sup> <sup>27</sup>. Voilà un avantage certain qu'on ne retrouve que dans ce matériau.

Si on prend en compte la coupe, le transport, la taille ainsi que les autres transformations, on arrive à la conclusion qu'un mètre cube émet 150 kg de CO<sup>2</sup>, si il en stocke 700 kg/m<sup>3</sup> pendant sa croissance, il a la magnifique capacité d'offrir un bilan carbone négatif de plus ou moins 500 kg/m<sup>3</sup>.

Le temps de croissance d'un arbre est inférieur au cycle de vie du bois dans la construction ce qui permet un renouvellement du matériau plus important que sa durée d'utilisation. Sa production ne contribue en rien en la déforestation puisqu'il est certifié par des normes qui tracent sa provenance à des forêts utilisant des jeunes arbres, entre 15 et 20 ans <sup>28</sup>. Elle peut être vérifiée par deux certifications distinctes ; labels FSC et PEFC. Elles garantissent que le bois provient d'une exploitation durable et sont très largement populaires à travers le monde.

---

<sup>27</sup> Carbone4, « *Le CLT: Un système de construction innovant permettant de réduire l'empreinte carbone de la construction* »

<sup>28</sup> Green Michael, « *Why we should build wooden skyscrapers* »

Malheureusement les forêts possèdent des types d'essences liés à leur position géographique. C'est donc dommage d'observer des transports à l'échelle de la planète pour des types de bois particuliers qui donnent un gros coup à l'énergie grise du produit mis en œuvre sur chantier. Le tout est de favoriser les industries qui sont en partenariat avec des producteurs locaux.

La polyvalence des panneaux rend possible une confection avec différentes essences pour offrir par exemple un aspect plus noble sur la face visible afin d'exploiter un bois de qualité pour l'esthétique. Le système est donc adaptable à un maximum de situations pour permettre un développement accru des filières, peu importe la position géographique.

*« Ce gage de responsabilité écologique, économique et sociale est un marqueur du rapport entretenu entre les industriels de la filière et les exploitants forestiers. »<sup>29</sup>*

Les essences peuvent varier en fonction de la zone géographique de l'industrie, les plus utilisées sont sans doute l'épicéa, mais d'autres, résineux peuvent également être exploités, citons le douglas, le mélèze, le sapin, ou le pin ainsi que certains feuillus comme le chêne, le hêtre ou encore le bouleau.

#### 2.1.3.2. Adhésif

Pour pouvoir confectionner les couches de bois qui vont se superposer pour donner le produit fini, il faut un adhésif, qu'il soit chimique ou mécanique, naturel ou artificiel. Cet adhésif est en quelque sorte le liant qui va permettre le maintien homogène du panneau. Cet aspect est important puisqu'il s'agit du seul autre composant des panneaux.

---

<sup>29</sup> Woodeum, « Innovation bois massif »

Il a pour but de répartir et transmettre les charges d'une surface à une autre de manière homogène. Il existe deux grands types de résines synthétiques, celles avec et celles sans libération de formaldéhyde. Les colles à base d'urée-formol sont susceptibles de favoriser cette libération, un polluant volatil possiblement cancérigène.

*« 5 ans après la précédente Monographie sur le formaldéhyde, des études mécanistiques ont réfuté les précédentes affirmations selon lesquels le formaldéhyde était vraisemblablement inoffensif sur le plan biologique, en apportant de nouvelles preuves qu'il pouvait provoquer des anomalies érythrocytaires compatibles avec le développement de leucémies. »<sup>30</sup>*

Il faut bien différencier les usages des adhésifs, les panneaux de CLT, LVL et LSL utilisent tous trois le phénol formaldéhyde (PF) et le phénol-résorcinol formaldéhyde (PRF). Les panneaux de CLT et le LSL peuvent utiliser des colles à base de polymères artificiels. Seuls les panneaux de CLT peuvent avoir recours au soudage par friction, clouage ou tourillonnage.

Toutes les résines synthétiques sont basées sur le principe de pétrochimie, transformation du pétrole en résine. Après avoir été extrait de nos sols, le pétrole est envoyé dans une raffinerie, où on va trier ses constituants, le fioul pour le chauffage, le gazole, le kérosène, l'essence et le naphta pour les colles.

Les résines synthétiques permettent d'avoir une adhésion non sujette aux dégradations physiques, les panneaux bénéficient ainsi d'une tenue mécanique sans faille, la force du panneau réside dans l'adhésion du bois. À l'heure actuelle, seuls les panneaux encollés avec des résines synthétiques sont utilisés dans la construction de grande hauteur.

Les adhésifs mécaniques consistent au blocage des planches entre elles par le biais d'un moyen mécanique, ainsi on retrouve trois grands principes pour le CLT ; les tourillons, les clous et le soudage par friction.

---

<sup>30</sup> Organisation Mondiale de la Santé, « Rapport biennal du Centre international de Recherche sur le Cancer », p.36

Les tourillons sont des éléments cylindriques en bois qui une fois insérés dans un orifice de taille souhaitée, bloquent les différentes strates entre elles. On a connu une évolution de ce système pour une optimisation du procédé, aujourd'hui les tourillons deviennent des tiges filetées en bois, réparties de manière calculée sur la surface du panneau pour garantir la meilleure résistance possible, ces tiges sont au nombre de 15/m<sup>2</sup> <sup>31</sup>.

Le clouage est similaire aux tourillons qui vont être remplacés par des clous ce qui ajoute au bois un autre matériau, le métal, on peut parler d'un échange entre les matériaux, une hybridation.

Le soudage par friction propose de frotter les couches entre elles sous pression ce qui va augmenter la température de surface de chaque couche pour faire fusionner les polymères naturels présents sur le bois.

Malheureusement cette méthode très sensible à l'humidité et aux effets de la nature ne permet pas de l'exploiter dans des hautes structures même si la polymérisation naturelle offre une très bonne tenue mécanique. Les études pour son amélioration offriraient une magnifique alternative aux résines synthétiques pour le panneau de CLT afin de réduire son impact environnemental.

**Tableau 3** : Récapitulatif et quantification des matières premières nécessaires à la fabrication de CLT.

Matières premières	Masse %
Bois	98
Adhésif	2
CLT	100

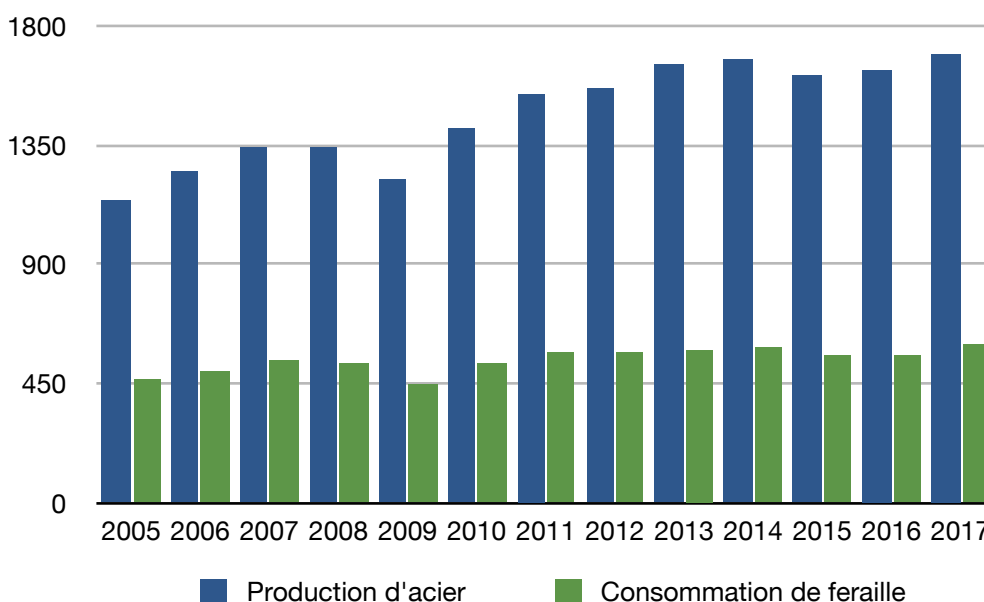
<sup>31</sup> Doaré Gwenola, « Dossier: Le bois lamellé-croisé CLT »

## 2.2. Production

### 2.2.1. Acier

En 2018, on produit globalement 1,7 milliard de tonnes d'acier en utilisant 2 milliards de tonnes de minerais de fer, 1 milliard de tonnes de coke et 575 millions de tonnes de produits recyclés. L'industrie sidérurgique est responsable de 7 % des émissions de gaz à effet de serre<sup>32</sup>. Les chiffres sont alarmants et laissent l'acier dans une position précaire face aux engagements pris par l'Union européenne pour une neutralité carbone en 2050.

**Graphique 1** : Production d'acier et consommation de ferraille de ce matériau au monde en million de tonnes<sup>33</sup>



Les technologies sont au centre des débats comme plusieurs projets de captage du CO<sup>2</sup> du côté d'Arcelor Mittal, mais elles ne sont pas encore aux points et les entreprises doivent continuer les investissements pour suivre la cadence des pays asiatiques qui s'imposent massivement contre la sidérurgie européenne<sup>34</sup>.

<sup>32</sup> World Steel Association, « *Raw materials, steel recycling* »

<sup>33</sup> Statista, « *Production d'acier et consommation de ferraille de ce matériau au monde 2005-2017* »

<sup>34</sup> « les importations d'acier chinois ont augmenté de 40% au troisième trimestre en Europe », explique dans Challenges le directeur général d'Arcelor Mittal, Aditya Mittal

L'acier tel que nous le connaissons doit répondre à une caractéristique précise, sa teneur en carbone. Ainsi un acier qui dépasse les 2 % de carbone n'est rien d'autre que de la fonte<sup>35</sup>.

Pour permettre de changer la fonte en acier, les procédés actuels utilisent du coke comme agent de réduction et comme combustible. Le procédé d'affinage et de laminage est possible grâce à l'utilisation de fours, il en existe de nombreux qui fonctionnent essentiellement différemment.

Les plus répandus aujourd'hui sont les fours à coke, les fours à arc électrique et les fours à induction, chacun n'utilisant pas le même type d'énergie pour atteindre les températures de fusion, utilisant des procédés différents de fabrication ou de transformation de l'acier.

#### 2.2.1.1. Four à coke

Procédé le plus utilisé aujourd'hui, il permet de partir du minerai pour en faire de la fonte puis de l'acier. Ainsi on passe par différentes étapes de traitement et d'acheminement des minerais après extraction jusqu'à une usine d'agglomération. Le mélange aggloméré est alors cuit à 1300 °C pour ensuite être refroidi, concasser à nouveau pour finalement être envoyé en haut fourneau.

Le résidu du traitement se caractérise par une couche qui flotte sur le métal en fusion, il s'agit du laitier, qui est récupéré et principalement utilisé dans la fabrication du ciment. Le bon mélange obtenu, on coule l'acier en continu ou en lingots.

---

<sup>35</sup> Kottas D. « *Le Métal* », p. 8

### 2.2.1.2. Four électrique

Les fours électriques n'utilisent pas de combustible afin d'atteindre les températures recherchées. Néanmoins ils ne peuvent suffire au travail complet de fabrication de l'acier, ils sont majoritairement utilisés pour la refonte de ferrailles, mais leurs implications restent importantes puisqu'ils fonctionnent à l'énergie électrique. Le four à induction apporte de vraies perspectives de par sa faible demande en énergie, on parle d'une réduction de 75 % des émissions par rapport à un four traditionnel<sup>36</sup>.

**Tableau 4** : Quantification des éléments liés à la production d'acier. <sup>37</sup>

<b>Production</b>	<b>Séquestration CO<sub>2</sub> kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Emission CO<sub>2</sub> kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Energie grise kWh/m<sup>3</sup></b>
Sidérurgie	0	6950	
Coke	0	1116	
Fonderie	0	257	
Non ferreux	0	257	
Acier	0	8580	74500-94500

<sup>36</sup> Le Moniteur, « *Réhabilitation et cycle de vie: l'acier indéfiniment* »

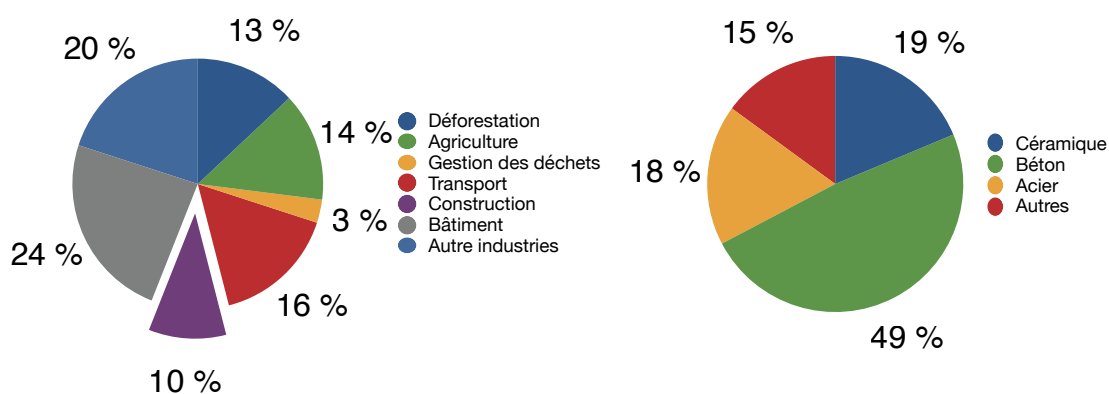
<sup>37</sup> Service Public de Wallonie, « *La sidérurgie: la production et la transformation de l'acier* » & Ecoconso, « *L'énergie grise des matériaux de construction n°155* »



## 2.2.2. Béton

Au XXI<sup>e</sup> siècle, les projets de gratte-ciel en béton se développent peu à peu au détriment de l'acier. Comme nous le savons, le béton est le matériau manufacturé le plus utilisé au monde<sup>38</sup>, un mètre cube par an et par habitant en moyenne. Ce chiffre varie d'un pays à l'autre avec en tête la Chine qui est le premier demandeur mondial. En Belgique, on consomme en moyenne 547 kg de ciment par an par habitant, ce qui nous place en tête des pays limitrophes<sup>39</sup>.

**Graphique 2 :** Émission de gaz à effet de serre des différentes industries (à gauche) et zoom sur l'industrie de la construction (à droite)<sup>40</sup>



Un rapport de l'OCDE de février 2019 indique que la production de béton actuelle provoque directement 9 % de la totalité de GES et ce chiffre est en hausse de 3 % pour 2060<sup>41</sup>. Pour réduire cet impact insoutenable dans la crise du réchauffement actuel, l'ONU invite à l'utilisation de matériaux alternatifs, la densification urbaine, ou encore l'investissement dans la rénovation et l'entretien du bâti existant sans démolir pour reconstruire.

<sup>38</sup> Planétoscope, « Production mondiale de béton »

<sup>39</sup> Febelcem, « Présentation du secteur »

<sup>40</sup> Nunes Philippe, « Béton bas carbone : de quoi parle-t-on ? »

<sup>41</sup> OECD Publishing. « OECD (2018), Global Material Resources Outlook to 2060: Economic driver and environmental consequences » p198

La plupart du temps le béton est soit mélangé sur chantier soit en usine et transporté avec des véhicules qui continuent le mélange en l'acheminant. Il existe une multitude de bétons qui diffèrent suivant le pourcentage des éléments dans son mélange. Il varie essentiellement en fonction de ses agrégats qui le composent à 70 %. Le liant (plus souvent le ciment) peut être remplacé par d'autres éléments comme le faisaient les Romains avec des liants naturels, mais ne donne pas la même résistance.

Pour le couler, il faut préalablement créer un coffrage, qui lui donne son aspect fini, sa forme et sa texture. On peut faire un coffrage avec des lattes de bois, on parlera alors de décoffrage brut, ou encore avec des panneaux réutilisables. Le béton peut aussi être préfabriqué ; mélangé et coulé en usine sous forme de pièce standardisée à assembler sur chantier.

Quand on le coule sur place, il faudra attendre vingt-et-un jours avant qu'il acquière une résistance suffisante pour être praticable, le temps de séchage est une étape importante dans le chantier d'un point de vue économique et statique.

**Tableau 5 :** Quantification des éléments liés à la production de béton <sup>42</sup>

<b>Production</b>			
	<b>Séquestration CO<sup>2</sup> kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Emission CO<sup>2</sup> kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Energie grise kWh/m<sup>3</sup></b>
Ciment	0	1207,8	
Granulat	0	13,5	
Sable	0	10,7	
Eau	0	0	
<b>Béton</b>	<b>0</b>	<b>1232</b>	<b>3500-6500</b>

<sup>42</sup> Ecoconso, « L'énergie grise des matériaux de construction n°155 »



### 2.2.3. CLT

De manière générale, la fabrication de panneaux de bois consiste en la même pratique suivant les différents types. On récolte du bois, que ce soit de forêt pour le CLT et le LVL, ou de filière de recyclage pour le LSL composé de particules plus ou moins fines.

Le bois est alors placé de manière précise sous forme de couches d'épaisseurs variables. Le tout est comprimé et mis sous haute température pour le compacter et le transformer.

Ils peuvent par la suite subir des découpes et autres usinages pour faciliter la mise en œuvre suivant les différentes fonctions qu'ils occupent.

#### 2.2.3.1. Cross Laminated Timber

La première étape est donc la coupe d'arbres ce qui va permettre de les transformer en planches identiques d'une largeur de 15 cm pour une épaisseur de 3 cm<sup>43</sup>. Cette étape de modification du bois utilise des machines mécaniques, il n'y a pas de transformations physiques ou chimiques du matériau.

L'énergie utilisée est destinée à la coupe, la taille et le transport du bois jusqu'à l'usine de fabrication. En outre, son séchage nécessite une température de 62 à 65 °C pendant six heures minimum pour avoir une hygrométrie de 12 % dans le futur panneau<sup>44</sup>.

---

<sup>43</sup> Ces dimensions sont données à titre indicatif pour la majeure partie des ouvrages réalisés en CLT aujourd'hui. Elles peuvent varier selon le projet et la demande surtout dans le cas des bâtiments de très grandes hauteurs qui traitent l'aspect structurel de manière indépendante les uns des autres.

<sup>44</sup> Doaré Gwenola, « Dossier: Le bois lamellé-croisé CLT »

Le CLT est basé sur une addition de planches, chacune d'entre elles mise bout à bout ce qui permet de concevoir des surfaces de très grandes dimensions.

Chaque couche ainsi conçue est superposée perpendiculairement à la précédente pour une très grande résistance dans les deux directions, on obtient un produit qu'on peut qualifier structurellement de voile.

Dans le cas de construction de grande hauteur, on peut trouver des panneaux utilisés comme colonnes d'une épaisseur de plus de 2 m <sup>45</sup> . Chaque panneau peut être étudié et fabriqué au cas par cas ce qui lui confère une adaptabilité incontestable.

Les couches sont liées entre elles à l'aide d'un adhésif, qui varie selon les fabricants, généralement des résines synthétiques. Une fois encollé on le met dans une presse le temps que l'adhésif polymérise pour former un voile homogène.

Quand on aborde le CLT, on parle surtout d'usinage, les panneaux vont être acheminés jusqu'aux machines de découpe pour être dimensionnés aux besoins. L'étude préalable du projet va permettre d'usiner tout type de demande, la seule limite sera la réflexion et l'usage que l'on veut en faire. Ainsi, on peut rainurer, percer, chanfreiner, isoler, voir même moduler des espaces entiers...

La chaîne de production du matériau peut aboutir à l'assemblage de modules dans certains cas. Sachant que l'usine qui produit le panneau est également celle qui le modifie, on assiste à un cycle complet de production qui permet d'avoir un produit offrant un nombre de déplacement limité.

---

<sup>45</sup> Cas d'étude pour la W350 Tower prévue pour 2041 au Japon

Les usines de production de CLT ne sont cependant pas en grand nombre, même si en pleine évolution. Principalement installées en France, Norvège, Allemagne et Autriche, elles induisent parfois des longs transports pour l'acheminement sur chantier. Le nombre de forêts exploitables est donc limité, idem pour les essences disponibles actuellement. Le développement en plein essor de l'industrie du CLT va changer ces critères de distances pour populariser le système et le rendre plus accessible.

#### 2.2.3.2. Laminated Veneer Lumber

Les panneaux de contreplaqué sont constitués de couche en bois d'une épaisseur variant de 1 mm à 3 mm, il est toujours constitué d'un nombre impair de plis<sup>46</sup>. Les plaquages de meilleure qualité sont réservés aux « face » qui donnent le plus bel aspect au panneau alors que ceux de moins bonne qualité sont pour le corps et sont appelés « intérieures ».

Après récupération du bois, l'écorce des troncs est enlevée pour ne garder que le bois. Ces troncs mis à nu sont placés dans une étuve qui par la chaleur et l'humidité va rendre le bois plus tendre. On passe ensuite à l'étape de déroulage. À la manière d'une taille crayon, une lame entame le billon qui va subir une rotation tout en étant taillé pour le transformer en une longue et fine feuille dont l'épaisseur peut varier selon la demande. Elle va ensuite être coupée aux mêmes dimensions pour constituer les plis.

---

<sup>46</sup> Synonyme de couches

Dans un premier temps, les panneaux sont recouverts de résine pour être collés à froid. Il est important de souligner que les fibres du bois sont placées de manière perpendiculaire d'une couche à l'autre à la manière du CLT. Il est ensuite collé à chaud ce qui favorise la polymérisation de l'adhésif. Les panneaux subissent donc dans le même temps une exposition à une température de 145 °C sous une pression de 12 kg/cm<sup>2</sup> dans une presse/four.

En les sortant du four, ils sont presque prêts à la vente, ils vont subir un délignage, c'est-à-dire couper les tranches pour les rendre plus propres et par la même occasion les mettre aux formats standards.

#### 2.2.3.3. Laminated Strand Lumber

Les panneaux LSL sont des panneaux de particules regroupant tout un panel de sous-catégorie comme l'OSB, l'aggloméré, le MDF... Ils sont majoritairement composés de particules de bois plus ou moins grandes 95 % et d'un liant, une colle 5 %.

Les particules sont obtenues par recyclage d'anciens panneaux, par ordre de grandeur, panneau de CLT, contreplaqué ou encore OSB et MDF... Une fois regroupées, elles sont positionnées sous forme d'un matelas, dont l'épaisseur varie en fonction des demandes. Dans le cas des particules de grandes dimensions, elles sont orientées volontairement dans le matelas pour lui donner la résistance escomptée, c'est le cas de l'OSB par exemple.

Le matelas est pressé et chauffé à 200 °C pour neutraliser les insectes, accentuer les capacités hydrofuges du bois et polymériser la colle. Le panneau est ensuite traité suivant sa destination, contre l'eau, les termites, les champignons... Il est finalement coupé à des dimensions standards.

Les panneaux de LSL sont d'une grande polyvalence dans la construction, ils peuvent être utilisés pour le mobilier, mais également pour des revêtements de murs, de sols, de plafond. Leur incroyable résistance mécanique leur donne la possibilité de faire office de contreventement dans la construction à ossature bois ou comme âme dans certaines poutres et sont aussi très utilisés pour les coffrages du béton.

**Tableau 6** : Quantification des éléments liés à la production de CLT<sup>47</sup>

<b>Production</b>			
	<b>Séquestration CO<sup>2</sup> kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Emission CO<sup>2</sup> kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Energie grise kWh/m<sup>3</sup></b>
Bois	700	176,4	
Adhésif	0	3,6	
CLT	700	180	750-1750

<sup>47</sup> Ecoconso, « L'énergie grise des matériaux de construction n°155 » & Carbone4, « Le CLT: Un système de construction innovant permettant de réduire l'empreinte carbone de la construction »



## 2.3. Fin de vie

### 2.3.1. Acier

Les métaux sont de manière générale tous recyclables et ré-employables, certains plus facilement que d'autres. L'aspect magnétique de l'acier facilite sa récupération contrairement à l'aluminium qui nécessite des installations plus complexes.

La particularité avec son recyclage est qu'il conserve ses propriétés mécaniques indéfiniment. Cet aspect est un élément fort en termes d'impact environnemental du produit qui peut alors être entièrement conçu avec des fours électriques, faisant de lui le seul matériau recyclable *ad vitam aeternam*. Il est un matériau permanent, 80 à 90 % de l'acier produit est toujours utilisé aujourd'hui. Recycler l'acier offre un impact environnemental moindre que d'en créer du nouveau, il permet entre autres d'économiser 70 % de son poids en énergie et jusqu'à une fois et demie son poids en CO<sup>2</sup> <sup>48</sup>.

Il faut remarquer néanmoins qu'il perd énormément en taille lors de son recyclage, en effet il ne conserve que 10 % de sa masse. Il faut donc recycler dix tonnes d'acier pour en produire une. Le taux de recyclage varie de 67 à 95 % ; l'emballage 67 %, l'automobile 95 %, dans le béton environ 50 % des armatures et dans les structures et bardage plus de 95 %<sup>49</sup>. Dans le bâtiment, il doit être recyclé uniquement après trente à quarante ans contrairement à l'automobile et aux emballages respectivement dix ans et six mois.

---

<sup>48</sup> Apeal statistiques: <https://www.apeal.org/statistics/>

<sup>49</sup> Le Moniteur, « *Réhabilitation et cycle de vie: l'acier indéfiniment* »

### 2.3.2. Béton

Le recyclage, c'est autour de cet aspect que les grands enjeux se dessinent pour les industries du béton. Il est énergivore nous l'avons bien compris alors comment profiter au maximum de ses atouts le plus longtemps possible? Comment le recycler pour lui offrir un maximum de possibilité pour une future utilisation ?

C'est depuis le début des années 2000 que le concept de déconstruction sélective apparaît qui favorise la mise en place du tri des éléments sur chantier de déconstruction. Avant ça, le tri n'existait pas, on détruisait pour reconstruire sans penser à cette étape importante.

Depuis fin 2011, un décret impose l'élaboration d'un diagnostic des déchets avant déconstruction pour tout bâtiment ayant une surface hors œuvre brute supérieure à 1000 m<sup>2</sup> ou ayant accueilli certaines activités spécifiques<sup>50</sup>.

Lorsque le béton est directement trié sur chantier, son taux de valorisation vaut 77,7 % contre 14,8 % pour les autres déchets dits « de mélanges » qui seront envoyés en déchèterie, plateforme de regroupement et/ou de tris<sup>51</sup>. Depuis déjà la fin des années 90 des recherches sont mises en œuvre pour permettre de remplacer les granulats par des produits recyclés, mais leurs performances ne sont pas encore suffisantes.

Les résultats de ces recherches pointent certaines problématiques comme un besoin supérieur en eau pour la mise en œuvre et des propriétés mécaniques limitées. Les granulats issus du recyclage du béton sont donc pour la majorité utilisés dans la construction routière : remblais, couches d'assise de chaussées... L'enjeu actuel dans son recyclage est avant tout de permettre la séparation des granulats naturels du mortier.

---

<sup>50</sup> Décret n° 2011-610 du 31 mai 2011 et l'Arrêté du 19 décembre 2011 relatifs au diagnostic portant sur la gestion des déchets issus de la démolition de catégories de bâtiments.

<sup>51</sup> Trégouët, Bruno. « *Commissariat général au développement durable; Chiffres & Statistiques n°164* » p.2

Le projet national RECYBETON cherche à réutiliser le mortier recyclé comme matière première dans la production de clinker. Alors que d'autres projets comme ANR COFRAGE cherchent à séparer les granulats du mortier par différentes méthodes : chauffage micro-onde, endommagement par voie électro-hydraulique. Le recyclage serait alors optimal et permettrait de réutiliser les granulats naturels dans du nouveau béton et le mortier dans la production de clinker pour le ciment.

Même s'il est recyclé, il faudra toujours produire du ciment ou autre type de liant équivalent. Le tri et recyclage du béton reste néanmoins un facteur intéressant dans la mesure où cette idée entre vraiment en jeu dans le monde de la construction. Bien qu'elle soit au premier plan à l'heure actuelle, cette démarche n'apporte pas encore de réelle solution ce qui n'empêche pas les entreprises de continuer à le produire et le couler, le problème subsiste.

### 2.3.3. CLT

Quand le bois arrive en fin de vie, il doit être trié suivant deux grandes catégories ; la classe A<sup>52</sup> et la classe B<sup>53</sup>. Le circuit du bois est bien rodé et ce système mis en place doit son existence aux tris préalablement réalisées en déchèteries. Les sites de recyclage de bois comme peuvent stocker et recycler une grande diversité de panneaux en un seul lieu ce qui permet d'économiser de l'énergie et l'usage de transport.

La catégorie A peut désigner les bois qui n'ont pas été traités comme les palettes ou les écorces en provenance de la plaquette forestière. Si le bois est trop abimé, il peut être broyé et utilisé comme paillasse sur les ronds-points ou dans les parcs. Le reste peut partir pour l'usage agricole, animal ou composte.

---

<sup>52</sup> Classe A : Bois non-traité

<sup>53</sup> Classe B : Bois traité

Le bois de classe B est broyé en morceaux de différentes tailles en fonction de son stade de recyclage. À partir d'un moment, le bois présent dans le panneau devient trop petit, on peut citer le MDF par exemple. On ne peut donc plus le transformer en autre panneau, le problème est qu'il a été très pollué par son recyclage, vouloir le reconstitué nécessite toujours plus de colle.

La difficulté de dépolluer ce type de panneau l'envoie directement comme bois de chauffage, les plus pollués pour alimenter les fours de cimenterie, et le reste pour des centrales biomasses. Cela dit, en France, les centrales biomasses ne sont pas assez développées et le coût faible du gaz l'emporte sur l'investissement qu'elles nécessitent<sup>54</sup>.

Dans les deux cas de classe du bois, en fin de vie il va libérer le carbone qu'il avait stocké jusqu'alors. Si on laisse le bois pourrir et se décomposer, il libérera en plus du carbone, du méthane qui participe également au réchauffement climatique.

Il semble alors évident d'utiliser le bois aussi longtemps que possible avant d'arriver à son stade de fin de vie en termes d'usages. Tout le temps où le bois est transformé et réutilisé, c'est du temps où le carbone reste stocké pendant que les forêts contribuent à la photosynthèse.

Cette solution n'est pas un miracle à long terme, elle permet d'entrevoir des possibilités de transition à moyen/court terme, une solution de stockage carbone signifie ralentir la crise environnementale, ce qui nous donnerait le temps de trouver des solutions à plus long terme.

Les centres de recyclage travaillent directement avec designer, chercheurs, architectes pour pouvoir trouver des solutions, des alternatives aux colles dans les panneaux de bois qui faciliterait leur recyclage ou leur destination en fin de vie.

---

<sup>54</sup> Chauvot Myriam, « *Les déchets de bois ne trouvent pas preneurs* »

## 2.4. Propriété thermique

### 2.4.1. Isolation

#### 2.4.1.1. Acier

L'acier est un métal qui a une forte conductivité thermique, c'est-à-dire que la chaleur se propage facilement à travers ce matériau qui fait de lui un mauvais isolant.

Chaque matériau possède une conductivité thermique propre, ainsi on observe des nuances dans l'acier en fonction de sa teneur en carbone, l'acier inoxydable offre une conductivité de 16,3 W/mK alors qu'un acier carboné (0,5-2 %) représente 50,2 W/mK. Il est donc approximativement trente-trois fois plus conducteur que le béton, mais reste néanmoins sept fois moins que le cuivre par exemple avec un facteur  $\lambda$  de 370 W/mK.

#### 2.4.1.2. béton

Le béton possède une conductivité de l'ordre de 1,5 W/mK ce qui fait de lui un mauvais isolant thermique, mais possède pourtant une bonne inertie. Il n'est pas capable d'isoler un environnement A d'un environnement B à long terme si ces deux environnements sont thermiquement différents. Les murs ou structures en béton seront alors la passerelle d'échange thermique entre les deux environnements. Ce phénomène est directement lié à son inertie à la propagation de flux de chaleur et à sa conductivité thermique.

### 2.4.1.3. CLT

La microstructure alvéolée du bois lui confère une bonne isolation thermique, il est un des rares matériaux de construction isolant présent à l'état brut dans la nature. Le bois est dix fois plus isolant que le béton avec un coefficient  $u$  de 0,15 W/mK. En comparaison aux isolants utilisés à l'heure actuelle, il ne peut pas jouer le même rôle, mais permet de négliger certains ponts thermiques liés à la structure. Sa faible conductivité thermique permet un sous-dimensionnement de l'isolation en comparaison avec une structure acier ou béton pour une même performance énergétique.

## 2.4.2. Comportement au feu

### 2.4.2.1. Acier<sup>55</sup>

L'acier est un matériau avec une forte diffusivité et effusivité, ces facteurs déterminent l'inertie à la propagation du flux de chaleur. La diffusivité correspond à la propagation du flux de chaleur par conduction à l'intérieur de l'élément alors que la effusivité correspond à la capacité d'absorber la chaleur ambiante autour de lui. Il est particulièrement sensible aux fluctuations de chaleur internes et externes, positives comme négatives.

L'acier ne brûle pas et ne dégage pas de fumée, on parle de matériau ininflammable. Cela dit, à des températures extrêmes, on observe une diminution de ses capacités mécaniques. À partir de 100 °C, sa rigidité est affectée et à partir de 400 °C il perd progressivement sa résistance. Au-delà de cette température, on observe une diminution continue de la rigidité et de la résistance de la structure.

---

<sup>55</sup> BeSteel, « Résistance au feu de l'ossature en acier »

Toutefois, ces facteurs peuvent être diminués suivant la mise en œuvre, plusieurs solutions sont mises au point pour protéger les structures du feu. La meilleure solution réside en l'application d'une peinture ignifuge, la protection de la structure par des panneaux avec une résistance au feu connue, le remplissage des structures creuses par du béton ou encore le surdimensionnement de la structure si celle-ci doit rester apparente.

#### 2.4.2.2. Béton <sup>56</sup>

Le béton est un matériau qui, confronté au feu se comporte particulièrement bien. Son inertie à la propagation du flux de chaleur dans sa masse lui permet de résister aux hautes températures. Le matériau se réchauffe lentement au contact des flammes, il résiste bien aux pics de températures ponctuels, positifs comme négatifs.

Malgré sa bonne résistance au feu, ses capacités peuvent être affectées suivant le caractère de l'incendie ; la température maximum atteinte, la durée, ou encore la composition du béton et sa microstructure qui elle-même est définie par les proportions d'eau, ciment, air entraîné et la nature des granulats.

La modification de la résistance est due à une modification des microstructures et des minéraux du matériau. Différents stades sont observables en fonction de l'évolution de la température du matériau.

À partir de 300 °C, on ressent une chute de la résistance à la compression du béton, on peut alors voir apparaître des microfissures, ou une séparation des granulats. La température dangereuse pour la structure se situe aux alentours des 600°C

---

<sup>56</sup> Ineris, « Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôts (DRA-03) » p.6

### 2.4.2.3. CLT<sup>57</sup>

Le CLT composé à 98 % de bois est un matériau carboné et donc combustible, néanmoins, sa capacité thermique limite la propagation de chaleur en son sein, ainsi il se carbonise de manière progressive sur sa surface en perdant lentement des couches structurelles.

On estime qu'il brûle de l'ordre de 0,65 mm par minute<sup>58</sup> soit 3,9 cm par heure d'exposition aux flammes. Le comportement et la bonne tenue de la structure sont un argument en faveur du bois.

Contrairement aux idées reçues, le CLT ne peut s'embraser de la même manière qu'une structure à ossature bois. Sa faible conductivité thermique lui permet justement de mieux se comporter au feu, et surtout d'anticiper avec exactitude son comportement.

**Tableau 7** : Caractéristiques thermiques liées aux différents systèmes

Thermique	Conductivité thermique	Chute de la résistance
	W/mK	°C
Acier	50,2	400
Béton	1,5	600
CLT	0,13	Combustion progressive

<sup>57</sup> Ineris, « Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôts (DRA-03) » p.5

<sup>58</sup> Green Michael, « *The case for tall wood buildings* », p. 127



## **2.5. Aspect structurel**

### **2.5.1. Caractéristique propre**

#### **2.5.1.1. Acier**

L'acier possède une masse volumique de 7500 à 8100 kg/m<sup>3</sup> soit plus de trois fois celle du béton. Il est le système qui, des trois, possède la meilleure contrainte admissible, avec 160 N/mm<sup>2</sup> ce qui le rend particulièrement efficace en termes de rapport résistance/masse. Il permet de développer des structures très perméables et peu présentes, on parle d'ossature. Il est particulièrement efficace en traction contrairement à ses homologues, il possède un module d'élasticité de 210N/mm<sup>2</sup>.

#### **2.5.1.2. Béton**

Le béton est un matériau particulièrement lourd, avec une masse volumique de 2500 kg/m<sup>3</sup>, il est plus résistant en compression qu'en traction c'est donc sa compression qui va définir sa résistance maximale. C'est pour contrer sa faiblesse en traction qu'on ajoute des armatures en acier dans le béton armé, ainsi on comble ses lacunes.

La résistance du béton en compression peut être définie par sa contrainte admissible, il définit la capacité maximale de reprise des charges par un matériau sur une surface donnée. Pour le béton, il existe différentes valeurs en fonction de sa composition, mais aussi de ses armatures ; la contrainte admissible du béton est de l'ordre de 11 N/mm<sup>2</sup>. C'est cette valeur qui permet le prédimensionnement des éléments structurels. Pour les planchers, on utilise son module de Young qui est similaire à sa contrainte admissible, 11 N/mm<sup>2</sup>.

### 2.5.1.3. CLT

Tout comme le béton, le CLT est plus résistant en compression, sa contrainte admissible est la même que celle du bois, soit 10 N/mm<sup>2</sup>. Néanmoins, il est cinq fois plus léger que le béton et offre donc une masse volumique de 450 kg/m<sup>3</sup>. Il faut distinguer deux cas de figure, les forces exercées parallèlement au panneau et les forces exercées perpendiculairement. Dans les planchers, le module d'élasticité rentre en jeu pour permettre de calculer la déformation de la structure. Le module de Young du CLT varie d'un producteur à un autre, mais on peut l'estimer à 10 N/mm<sup>2</sup>.

## 2.5.2. Esthétique

### 2.5.2.1. Acier

Comme nous l'avons dit précédemment, le faible volume de l'acier en temps que structure primaire dans un ouvrage lui permet de s'effacer au profit du projet. L'ossature est si peu présente que l'architecte ne doit presque pas en tenir compte pour dessiner les façades.

### 2.5.2.2. Béton

Le béton est bien plus présent si l'architecte décide de réaliser des façades porteuses, cela dit la plupart du temps on met le béton en œuvre sous forme d'ossature, de système poteaux/poutres ce qui va libérer les façades et offrir un large panel de solutions pour les façades, très similaire à l'ossature en acier.

### 2.5.2.3. CLT

De la même manière, le CLT s'il est utilisé en temps que façade porteuse ne va pas permettre une ouverture complète des plans. Comme pour les deux autres systèmes, on peut réaliser une ossature en CLT, mais à partir d'une certaine hauteur si on utilise uniquement du CLT, il n'y aura pas d'autres choix que de mettre en place le principe de façade porteuse à moins de créer un système structurel hybride. La solution la plus simple réside dans la méthode de façade porteuse, peu importe la hauteur, ce qui permet d'avoir des dimensionnements de cloisons structurelles plus minces. Cette solution aura des répercussions importantes en façade.

**Tableau 8** : Caractéristiques structurelles liées aux différents systèmes.

Structure	Contrainte admissible N/mm <sup>2</sup>	Module de Young N/mm <sup>2</sup>	Masse Volumique Kg/m <sup>3</sup>
Acier	160	210	7500-8100
Béton	11	11	2500
CLT	10	10	450





**Tableau 9 :** Récapitulatif, comparaison des différentes caractéristiques des trois systèmes.

<b>Récapitulatif</b>			
	<b>ACIER</b>	<b>BETON</b>	<b>CLT</b>
Matières premières %	Minerais de fer : 160	Ciment : 15	Bois : 98
	Coke : 45	Granulat : 44	Adhésif : 2
	Eau : 1000	Sable : 34	
		Eau : 7	
Emission CO <sup>2</sup> kg/m <sup>3</sup>	Sidérurgie : 6950	Ciment : 1208	Bois : 176
	Coke : 1116	Granulat : 14	Adhésif : 4
	Fonderie : 257	Sable : 11	
	Non-ferreux : 257		
Séquestration carbone kg/m <sup>3</sup>	0	0	700
Bilan carbone kg/m <sup>3</sup>	8580	1232	-520
Energie grise kWh/m <sup>3</sup>	74400 - 94400	3500 - 6500	750 - 1750
Conductivité thermique W/mK	50,2	1,5	0,13
Chute de la résistance °C	400	600	Progressif
Contrainte admissible N/mm <sup>2</sup>	160	11	10
Module de Young N/mm <sup>2</sup>	210	11	10
Masse volumique kg/m <sup>3</sup>	8000	2500	450



## PARTIE 3 : Analyse du Cycle de Vie

*« On ne change jamais les choses en combattant la réalité existante. Pour changer quelque chose, construisez un nouveau modèle qui rendra obsolète celui existant. »*

Richard Buckminster Fuller





## 1. **TOTEM**<sup>59</sup>

### 1.1. Qu'est ce que c'est ?

TOTEM (Tool to Optimise the Total Environnemental impact of Materials) est un outil mis au point afin d'aider le secteur belge de la construction pour objectiver et permettre de réduire les impacts environnementaux des bâtiments liés aux matériaux mis en œuvre. Il a émergé grâce au partenariat des trois régions belges, l'OVAM, Bruxelles environnement et le Service public de Wallonie.

### 1.2. Enjeux

Depuis l'entrée en vigueur des réglementations européennes de Performance Energétique des Bâtiments (PEB), le secteur de la construction s'intéresse de plus en plus aux enjeux liés aux consommations énergétiques.

Après cette approche uniquement liée aux consommations, le secteur de la construction se remet à nouveau en question pour relever un prochain défi qui réside dans une diminution de l'impact environnemental lié aux matériaux. Pour ce faire, toutes les étapes du cycle de vie du bâtiment doivent être prises en compte ainsi que toutes leurs implications sur l'environnement.

D'ici quelques années, des normes concernant l'impact des matériaux verront sans doute le jour à la manière des normes PEB, ce qui favorisera l'utilisation d'outils pour les quantifier et les réduire. Cette démarche témoigne de l'intérêt qu'il faut porter aux impacts environnementaux des matériaux en plus des impacts liés aux consommations énergétiques.

---

<sup>59</sup> Demesmaecker P., Vannerom A., « *TOTEM le guide: Une méthodologie belge pour évaluer les impacts environnementaux des bâtiments* »

### **1.3. Base de données**

L'outil se réfère à deux bases de données, une spécifique et une générique. Les données génériques proviennent de la base de données Ecoinvent qui est largement reconnue dans le domaine scientifique, elles sont la représentation de l'Europe occidentale c'est pourquoi elles ont été adaptées au domaine de la construction belge, elles nous donnent une idée des valeurs sans être exactes.

L'objectif à terme est d'utiliser des données spécifiques provenant des fabricants de matériaux via la base de données B-EPD. Ils peuvent fournir ces informations via la Déclaration Environnementale du Produit (DEP) qui est ensuite vérifiée et déposée au Service fédéral Santé publique. Leur ajout représente une énorme valeur ajoutée à l'outil, elles permettent par ailleurs une vérification des données génériques.

### **1.4. Indicateurs d'impact**

Pour pouvoir analyser l'impact des matériaux sur l'environnement, il faut définir un cadre d'étude proposant différents indicateurs d'évaluation. Le Centre Européen de Normalisation (CEN) les définit en deux groupes, la norme EN15804 préconise l'utilisation des indicateurs de base :

- Réchauffement climatique
- Appauvrissement de la couche d'ozone
- Acidification des sols et de l'eau
- Eutrophisation
- Formation d'ozone photochimique
- Épuisement des ressources abiotiques

Il existe des indicateurs complémentaires qui ne sont pas nécessaires selon les normes européennes, mais, ajoutées à l'outil TOTEM permettent d'aborder d'autres thèmes importants pour les différents niveaux de politique belge :

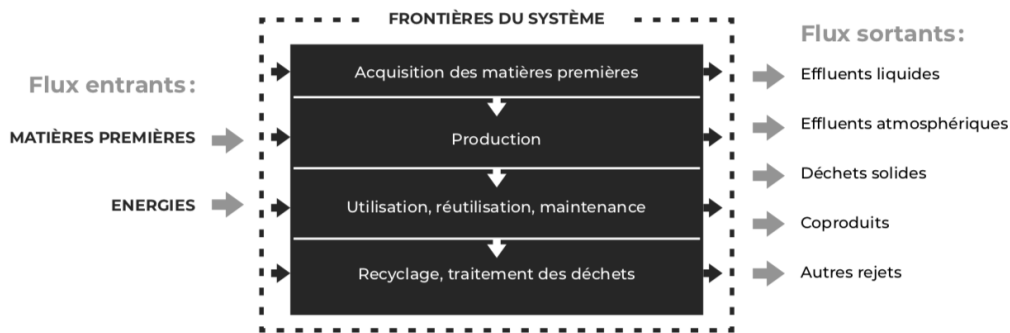
- Toxicité humaine
- Particules fines
- Rayonnement ionisant
- Écotoxicité pour les écosystèmes
- Occupation du sol
- Transformation du sol
- Eau

Néanmoins, on remarque que certains indicateurs sont presque nuls et donc négligeables, dans le cadre de cette étude il y a six indicateurs prépondérants :

- Réchauffement climatique
- Toxicité humaine
- Occupation du sol
- Particule fine
- Acidification des sols et de l'eau
- Eutrophisation

## 1.5. Étapes du cycle de vie

Schéma 1 : Schématisation des différentes étapes du cycle de vie liées à un matériau de construction.<sup>60</sup>



Chaque étape du cycle de vie a des impacts différents selon le matériau, dans l'analyse, toutes les étapes doivent être prises en compte, on appelle cette approche « cradle-to-cradle » (du berceau au berceau) c'est-à-dire de la première phase de production jusqu'à la phase de déconstruction et de recyclage en un nouveau produit. Certaines étapes sont prépondérantes dans le cycle de vie en fonction de ce qu'on étudie, dans ce cas, nous nous focaliserons sur les étapes suivantes :

- Production
- Transport jusqu'au site de construction
- Construction et installation
- Maintenance
- Remplacement des matériaux mis en œuvre
- Démolition et déconstruction
- Transport fin de vie
- Élimination

<sup>60</sup> Demesmaecker P., Vannerom A., « *TOTEM le guide: Une méthodologie belge pour évaluer les impacts environnementaux des bâtiments* » Infographie : © Olivier Gilgean et Thierry Marcelis p.32

## **1.6. Résultats**

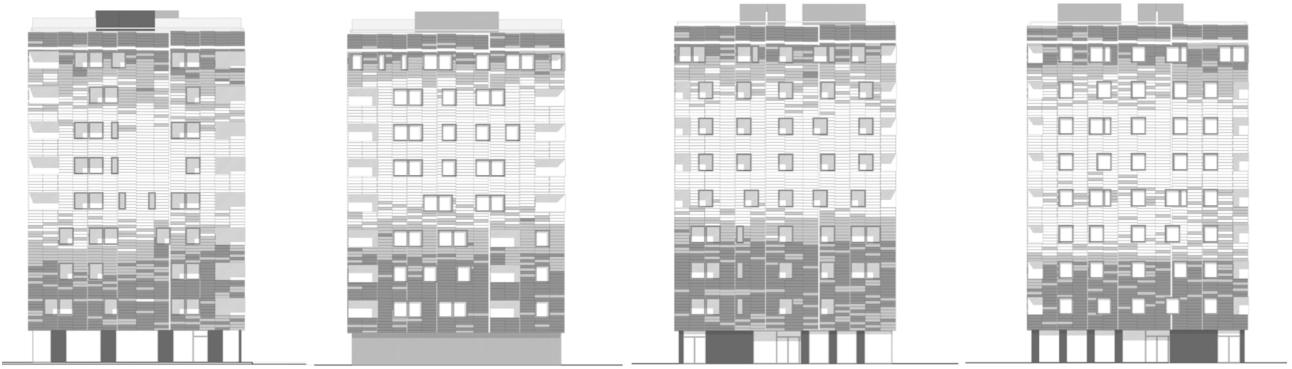
L'outil TOTEM étudie donc tous les indicateurs d'impact environnemental pour chaque étape du cycle de vie afin de nous faire un bilan global sur les matériaux mis en œuvre.

Afin de confronter des chiffres comparables, l'outil passe par un principe de monétarisation afin de ramener tous les résultats à une même unité qui est exprimée en €/FU. Cette unité correspond au coût de la collectivité nécessaire pour rembourser les dommages causés à l'environnement pour une surface utile, ici le mètre carré.

Les résultats obtenus avec TOTEM sont là pour nous donner un ordre d'idée, ils sont actuellement théoriques, mais restent néanmoins objectifs, l'outil a d'ailleurs été reconnu pour la certification BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) le 18 février 2020. Il s'agit d'un standard de certification britannique relatif à l'évaluation environnementale des bâtiments la plus répandue à l'international.

## **1.7. Questionnements**

Pour pouvoir appréhender les résultats de l'étude, il faut émettre des questionnements sur certains critères d'évaluation. Les doutes qui peuvent planer autour de l'outil sont variés ; la provenance des données génériques qui diffèrent parfois des spécifiques et donc influent sur les résultats, les informations concernant le transport sur site qui est relatif à chaque projet, la séquestration carbone dans les produits issus de la filière bois qui n'est pas comptabilisée puisque l'analyse se base le concept cradle-to-cradle. Il s'agit donc ici d'une approche pour nous donner une idée des coûts environnementaux et non pas une valeur exacte.



Elevations, © Waugh Thistleton

**LIEU :**

Hackney, Londres

**STATUS:**

Construit en 2009

**CLIENT :**

Telford Homes

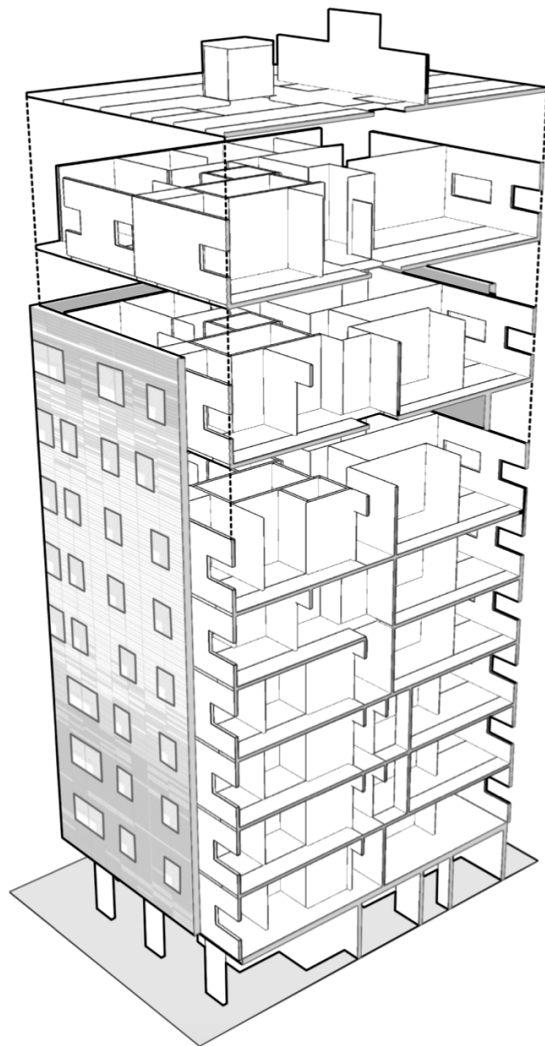
**BUDGET :**

€ 4,5 millions

**PRIX :**

RIBA President's  
Award for Research  
2009

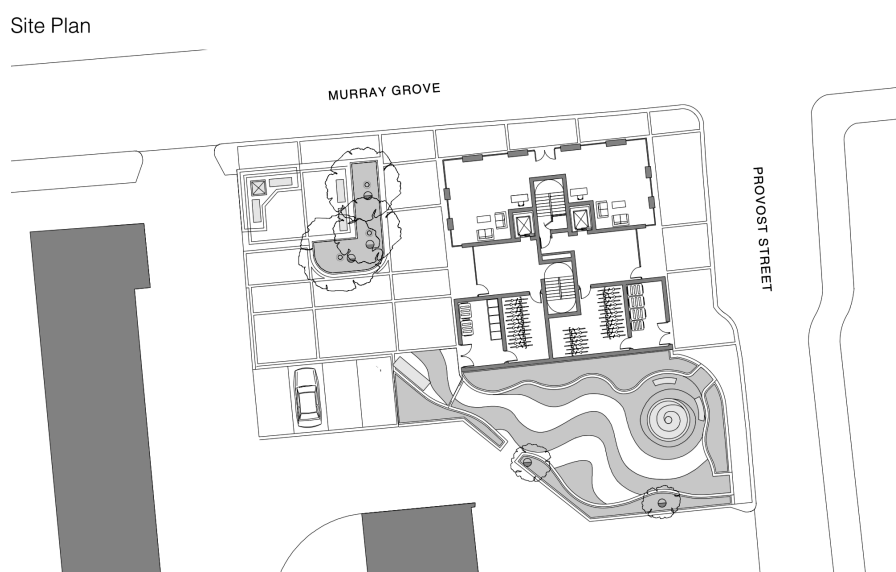
BCI Building Project



Coupe isométrique, © Waugh Thistleton

## 2. Cas d'étude : Murray Grove

### 2.1. Présentation



Plan d'implantation, © Waugh Thistleton

Murray Grove est le premier projet de logements de grande hauteur construit entièrement en CLT, les éléments porteurs, les planchers et même les escaliers, cages d'ascenseur comprises. Il est composé de neuf niveaux dont les plans sont dessinés avec une trame de cloison intérieure ainsi qu'une façade porteuse et un noyau central pour une bonne stabilité de l'édifice. Étant donné qu'aucun immeuble de logement de cette taille n'avait jamais été réalisé auparavant, sa construction a nécessité l'accord des autorités en termes d'isolation acoustique, résistance au feu et résistance de la structure.

Le bâtiment a été réalisé en quarante-neuf semaines, le montage de la structure en CLT a nécessité quatre hommes et vingt-sept jours. Offrant vingt-neuf appartements, il démontre du potentiel du bois comme économiquement viable et responsable de l'environnement. Contrairement à l'acier et au béton qui génèrent du CO<sup>2</sup>, le projet a permis d'en stocker 186 tonnes de dans sa structure ce qui offre une belle alternative aux systèmes utilisés aujourd'hui.





Vue extérieure du projet après construction



Baie pour les fenêtres



Vis de fixation des parois structurelles, outils légers



Système de suspension pour les techniques



Système de fixation supplémentaire, parois intérieures



Parois intérieures structurales avant la pose de dalle

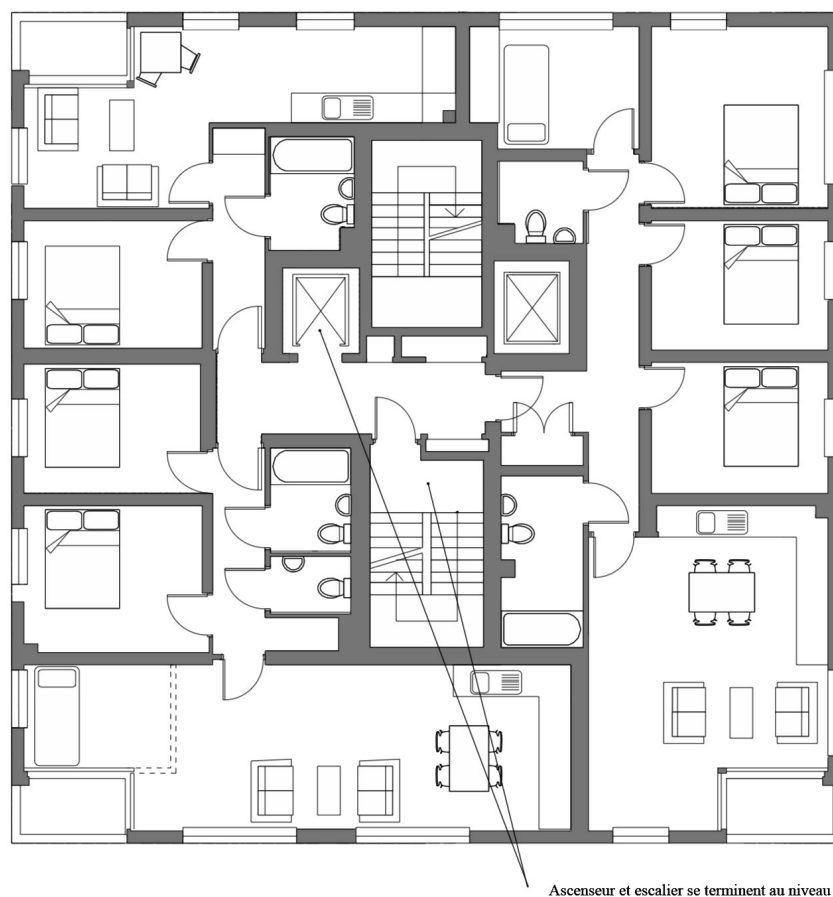


Fixation des dalles de plancher en CLT, nécessite que 2 hommes sur site et pilote pour la grue

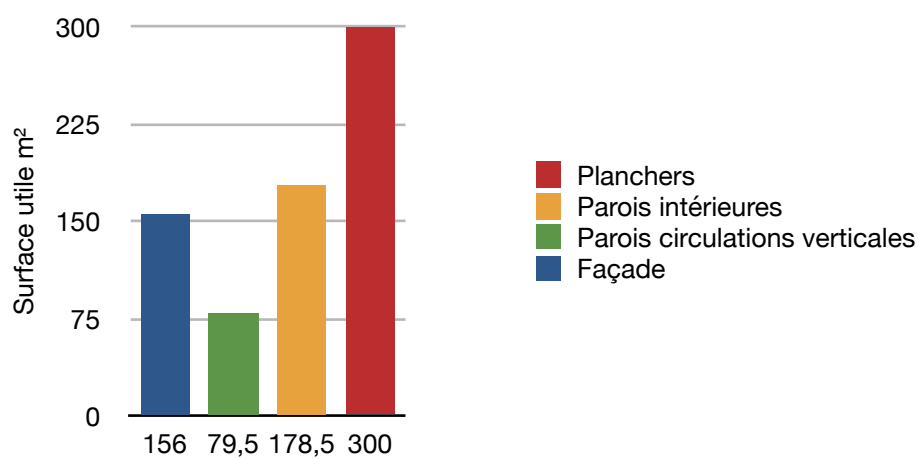


## 2.2. Plans types<sup>61</sup>

Le projet propose deux types de plans distincts : Le rez-de-chaussée commercial est suivi de trois niveaux dont chacun est composé de trois appartements à destination locative.

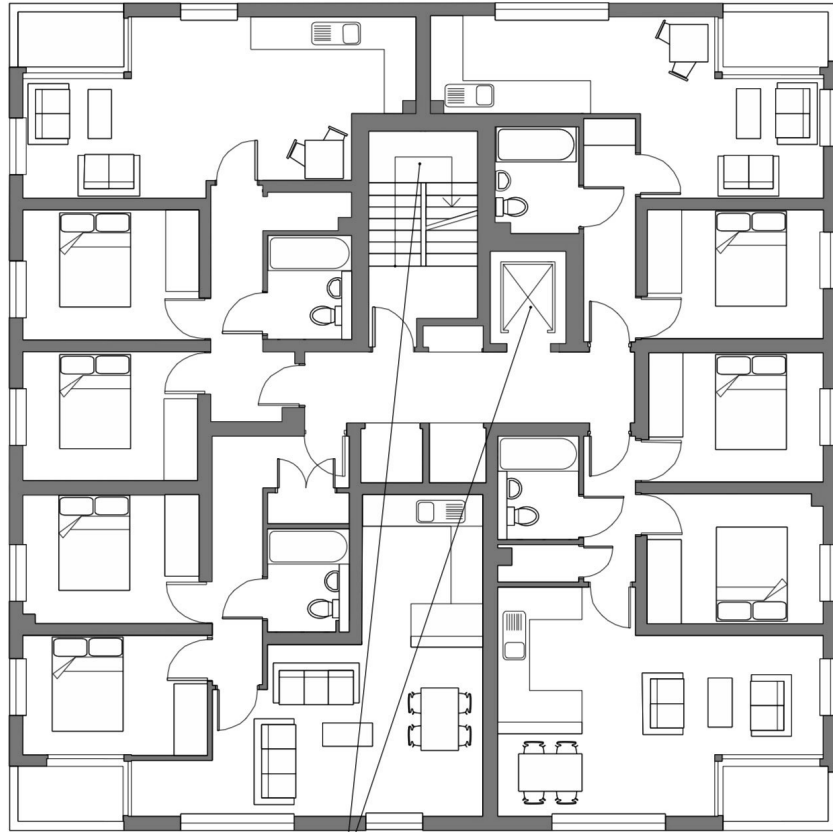


**Graphique 3 :** Le graphique représente la surface propre de chaque type de parois pour le niveau mentionné ci-dessus



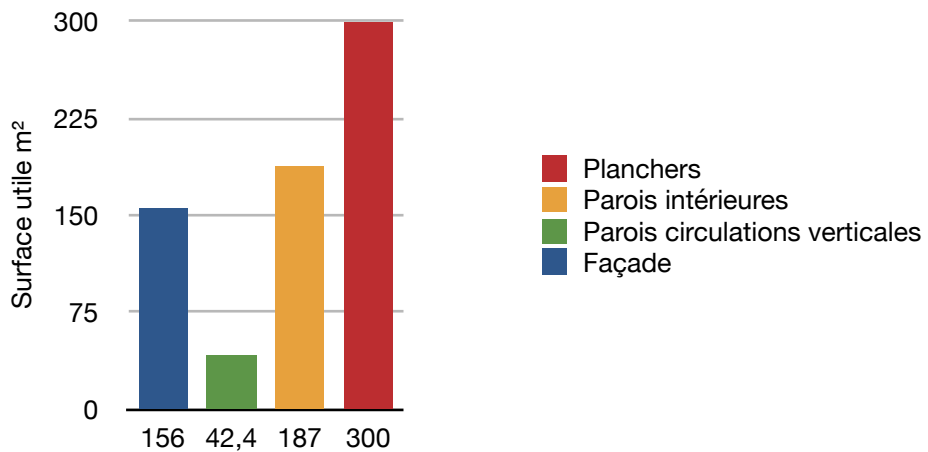
<sup>61</sup> Plan : © Waugh Thistleton

Les cinq derniers niveaux se composent chacun de quatre appartements destinés à des propriétaires privés.



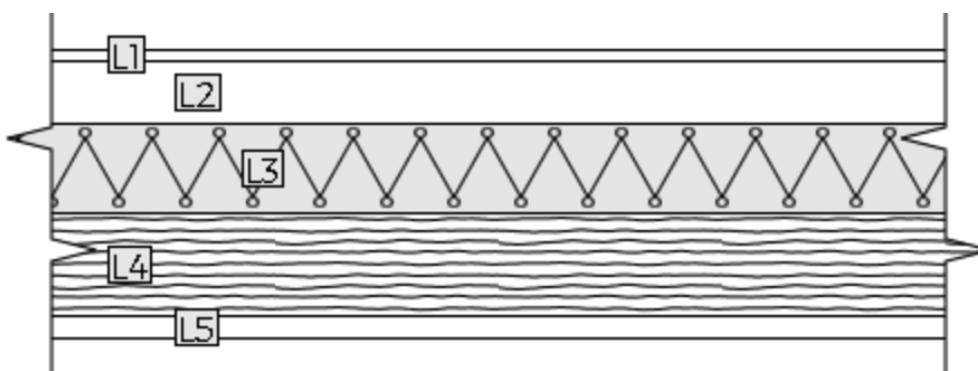
Ascenseur et escalier uniquement accessibles au rez-de-chaussée et aux niveaux 4 à 8

**Graphique 4 :** Le graphique représente la surface propre de chaque type de parois pour le niveau mentionné ci-dessus



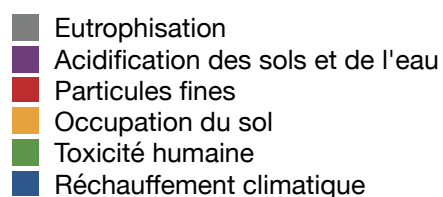
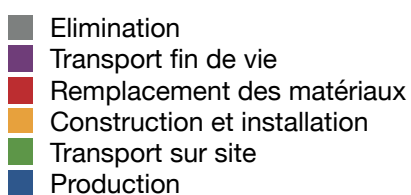
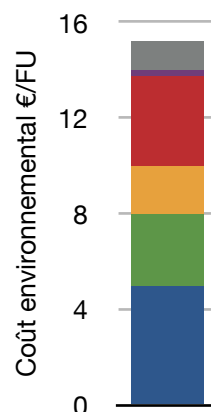
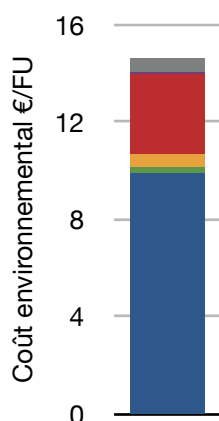
## 2.3. Composition de parois

### 2.3.1. Façades



Le complexe de façade du projet est composé de l'intérieur vers l'extérieur comme suit ; double plaque de plâtre comme finition intérieure 25mm (L5), structure en CLT 117mm (L4), isolation PUR 100mm (L3), vide d'air 70mm (L2) et bardage en ardoise Eternit 4mm (L1)

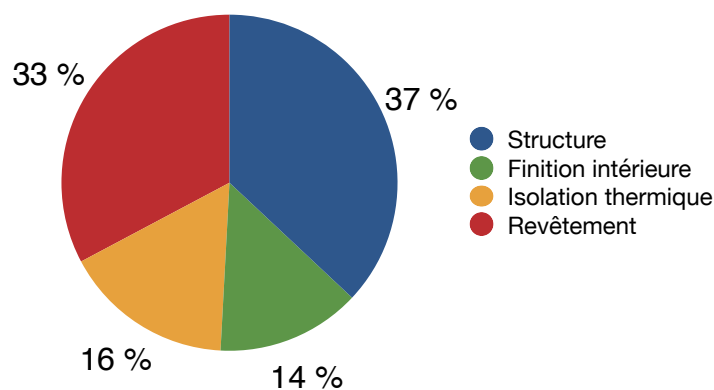
**Graphique 5-6:** Le graphique de gauche montre le coût environnemental du complexe de façade par étape de cycle de vie tandis qu'à droite il montre le coût environnemental par indicateur d'impact.



Les **graphiques 5-6** nous montrent le coût environnemental du complexe de façade du cas d'étude, il équivaut plus ou moins à **15 €/FU**. On constate dans les étapes du cycle de vie (à gauche) que le principal coût vient de la production qui vaut plus de 75 %. Ensuite vient le remplacement des matériaux, l'outil TOTEM fixe une durée de vie des bâtiments étudiés à 60 ans. Ainsi l'aspect « remplacement des matériaux » affecte uniquement le revêtement et les finitions.

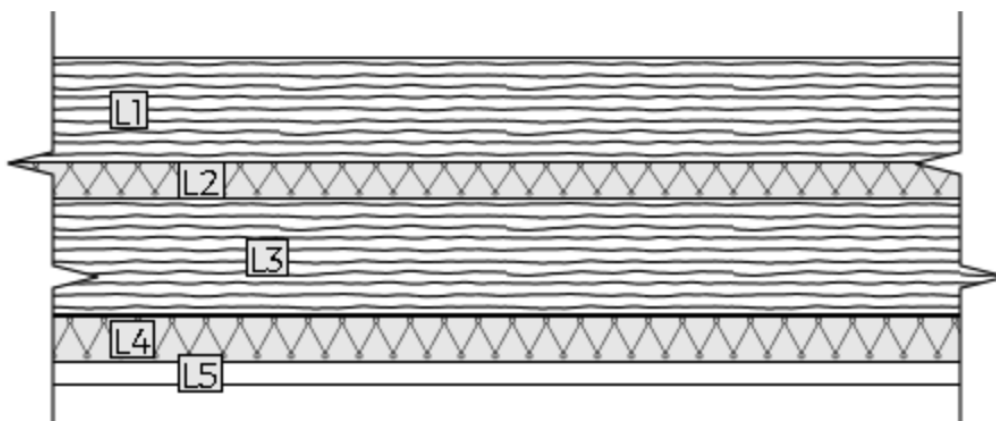
Le graphique de droite montre trois indicateurs plus influents sur le coût du complexe de façade ; « réchauffement climatique », « toxicité humaine » et « particules fines », à eux trois ils représentent près de 80 % du coût total. Les deux autres indicateurs qu'on peut observer sont moins présents ; « occupation du sol » et « eutrophisation » mais restent non négligeables.

**Graphique 7** :Le graphique représente le coût environnemental de chaque élément du complexe de façade sous forme de pourcentage.



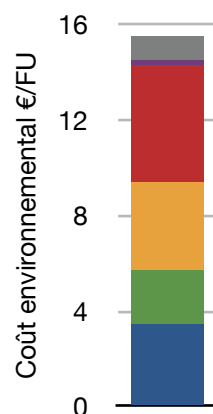
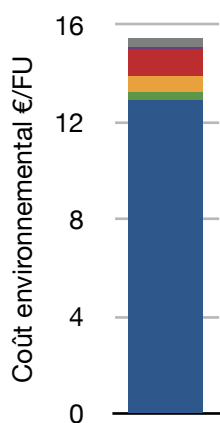
Dans le **graphique 7**, on remarque que les deux coûts les plus marqués concernent la structure et le revêtement. Le coût particulièrement élevé du revêtement est sans aucun doute lié à l'étape « remplacement des matériaux ». Il s'agit d'un coût qui s'étale dans le temps alors que le coût structurel est ponctuel à la construction de l'ouvrage. L'isolation thermique et le revêtement intérieur sont presque équivalents.

### 2.3.2. Parois circulations verticales



Les parois des circulations verticales sont composées comme suit : CLT 117 mm (L1), isolation thermique PURE 40mm (L2), CLT 128mm (L3), isolation acoustique 50mm (L4), double plaque de plâtre de finition 25mm (L5)

**Graphique 8-9:** Le graphique de gauche montre le coût environnemental des parois des circulations verticales par étape de cycle de vie tandis qu'à droite il montre le coût environnemental par indicateur d'impact.



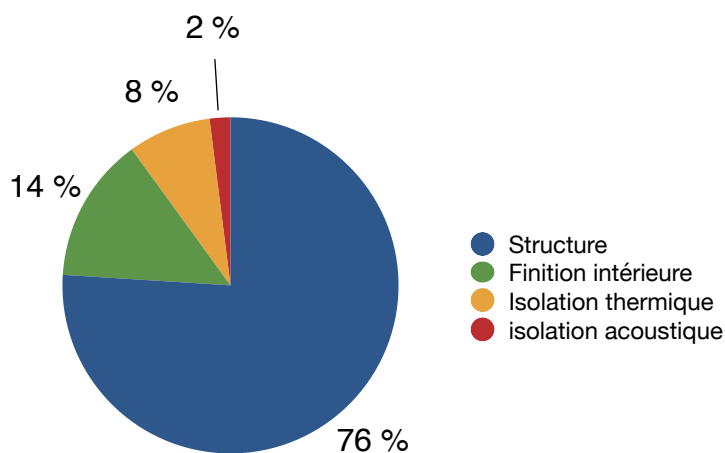
- Elimination
- Transport fin de vie
- Remplacement des matériaux
- Construction et installation
- Transport sur site
- Production

- Eutrophisation
- Acidification des sols et de l'eau
- Particules fines
- Occupation du sol
- Toxicité humaine
- Réchauffement climatique

Les **graphiques 8-9** expriment le coût environnemental de cette paroi qui équivaut plus ou moins à **15 €/FU**. Le graphique de gauche nous montre que l'étape du cycle de vie la plus coûteuse pour l'environnement est la « production » avec plus de 90 %, ensuite le « remplacement des matériaux » avec moins de 10 % qui concerne essentiellement les finitions en plâtre. La « construction et installation », « élimination » et « transport sur site » sont minoritaires voir négligeables.

À droite on observe des taux beaucoup moins contrastés, en première position, les « particules fines », suivi de près par deux autres indicateurs presque équivalents ; « réchauffement climatique » et « occupation du sol » pour finir avec la « toxicité humaine ». L'indicateur « eutrophisation » est le moins présent.

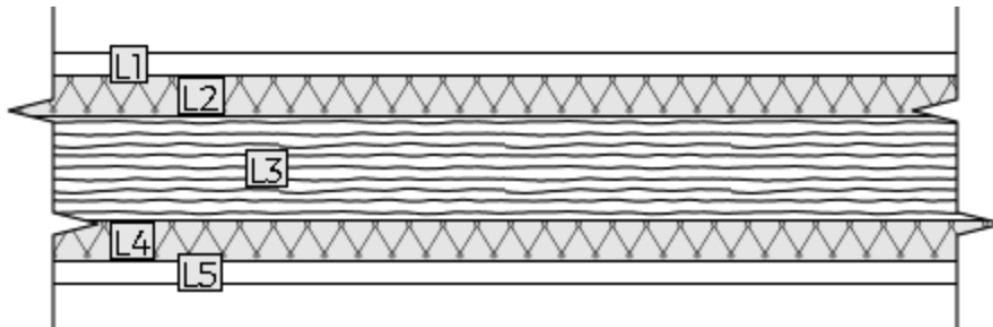
**Graphique 10** :Le graphique représente le coût environnemental de chaque élément des parois de circulations verticales sous forme de pourcentage.



Dans le **graphique 10** on remarque que l'impact de cette paroi est causé à 76 % par la structure, pas étonnant puisqu'elle représente presque 75 % de son volume. Les finitions intérieures sont en deuxième place pour cause, le remplacement des matériaux pendant la durée de vie, et l'impact du ciment présent dans ces panneaux. L'isolation thermique et acoustique représente ensemble 10 % du coût total de la paroi.

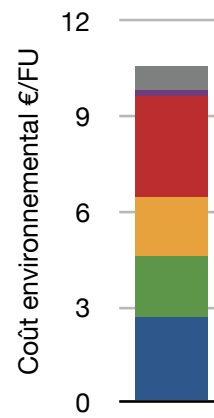
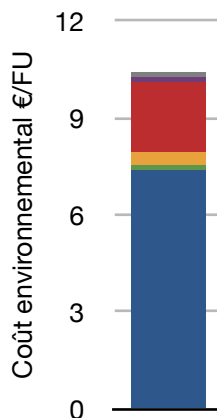


### 2.3.3. Parois intérieures



Les parois intérieures du projet sont composées comme suit : double plaque de plâtre comme finition (L5), isolation acoustique 45 mm (L2), CLT 117mm (L3), isolation acoustique 45 mm (L4) et double plaque de plâtre de finition 25mm (L5)

**Graphique 11-12:** Le graphique de gauche montre le coût environnemental des parois intérieures par étape de cycle de vie tandis qu'à droite il montre le coût environnemental par indicateur d'impact.



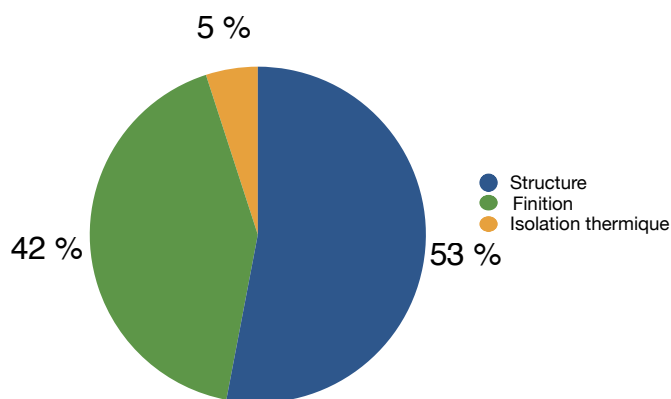
- Elimination
- Transport fin de vie
- Remplacement des matériaux
- Construction et installation
- Transport sur site
- Production

- Eutrophisation
- Acidification des sols et de l'eau
- Particules fines
- Occupation du sol
- Toxicité humaine
- Réchauffement climatique

Les **graphiques 11-12** nous montrent le coût environnemental des cloisons intérieures du cas d'étude, il équivaut plus ou moins à **10 €/FU**. On constate dans les étapes du cycle de vie (à gauche) que le principal coût vient de la production qui vaut plus de 75 %. Ensuite vient le remplacement des matériaux, l'outil TOTEM fixe une durée de vie des bâtiments étudiés à 60 ans. Ainsi « l'aspect remplacement des matériaux » affecte essentiellement le revêtement et les finitions.

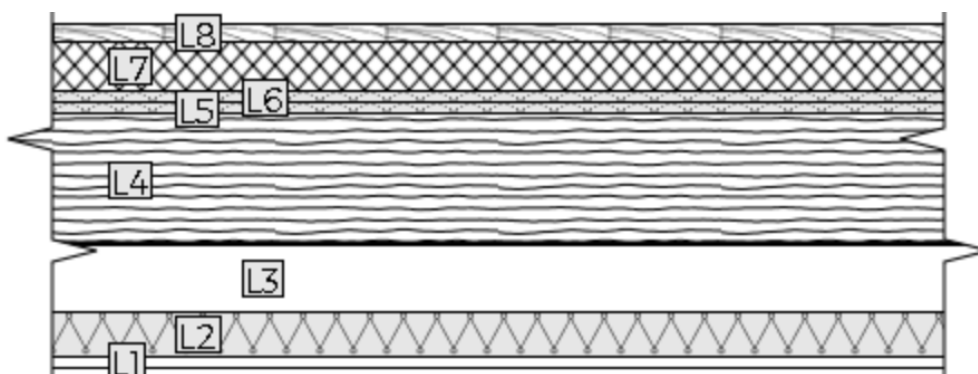
À droite on remarque que le coût est principalement étalé sur quatre indicateurs, proportionnellement comme suit ; « particules fines », « réchauffement climatique », « Toxicité humaine » et « Occupation du sol ». Le dernier indicateur est bien moins présent, mais reste non négligeable il s'agit de « eutrophisation ».

**Graphique 13** :Le graphique représente le coût environnemental de chaque élément des parois intérieures sous forme de pourcentage.



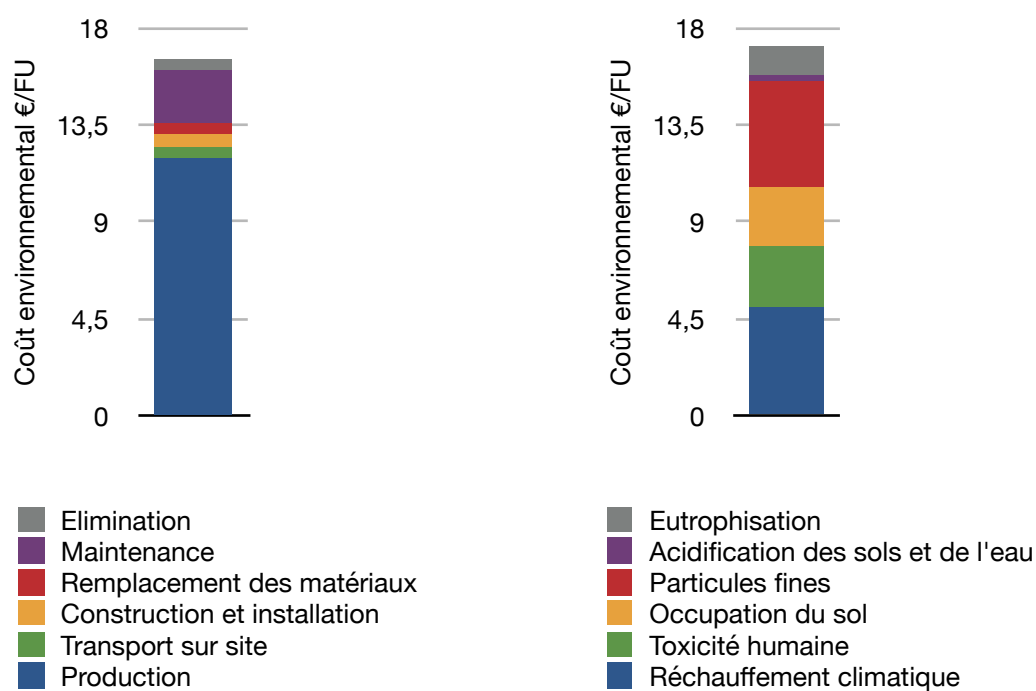
Le **graphique 13** montre que l'impact environnemental des cloisons intérieures est principalement lié à la structure à raison de 53 % ce résultat semble logique puisqu'elle représente presque 50 % du volume de la cloison. Les finitions représentent quand même 42 % dû au remplacement des éléments après un certain temps dans le projet et sans doute la composition même dans laquelle on retrouve du ciment qui, comme nous l'avons vu est particulièrement néfaste pour l'environnement.

### 2.3.4. Plancher



Le complexe de plancher du projet est composé du côté inférieur vers le côté supérieur comme suit ; plaque de plâtre finition au plafond 25mm (L1), isolation 50mm (L2), 75 mm vide d'air (L3), CLT 146mm (L4), isolation 25mm (L5/L6), chape de béton 55mm (L7), Parquet bois massif 15mm (L8).

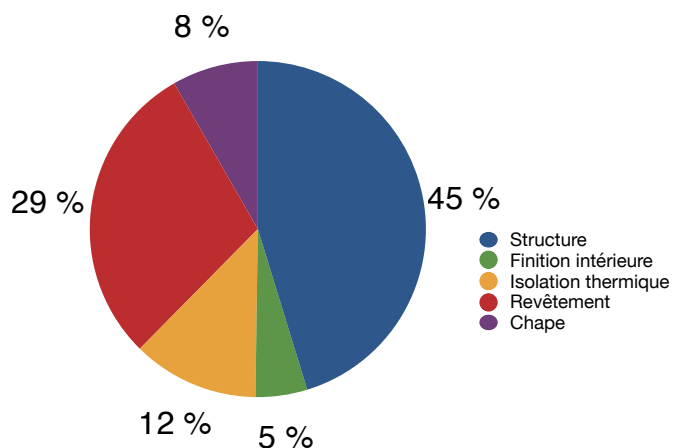
**Graphique 14-15:** Le graphique de gauche montre le coût environnemental du complexe de plancher par étape de cycle de vie tandis qu'à droite il montre le coût environnemental par indicateur d'impact.



Les **graphiques 14-15** nous montrent le coût environnemental du complexe de plancher du cas d'étude, il équivaut plus ou moins à **16 €/FU**. On remarque à gauche que la « production » équivaut à 70 % du coût total, ensuite on a le coût de « maintenance » qui sort du lot, il s'agit de l'entretien des éléments, on comprend aisément qu'il s'agit de la surface qui est la plus sujette aux « dégradations » dues à son utilisation quotidienne. Les étapes du cycle de vie « élimination », « remplacement des matériaux », « construction et installation » ainsi que « transport sur site » sont négligeables vis-à-vis des deux étapes précédemment citées.

À droite on remarque que le coût est principalement étalé sur quatre indicateurs, proportionnellement comme suit ; « particules fines », « réchauffement climatique », « toxicité humaine » et « occupation du sol ». Le dernier indicateur est bien moins présent, mais reste non négligeable il s'agit de « eutrophisation ».

**Graphique 16** :Le graphique représente le coût environnemental de chaque élément du complexe de plancher sous forme de pourcentage.



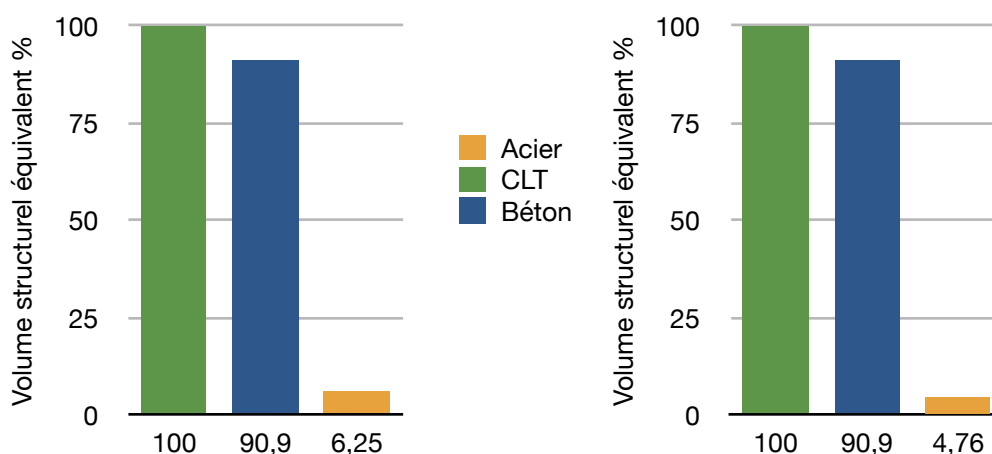
Le **graphique 16** montre que la structure a une importance supérieure à celle présente dans le complexe de façade, il représente ici 45 % du coût environnemental contre 37 % pour le complexe de façade. Cette proportion est liée au dimensionnement structurel plus important pour le plancher. On remarque également que le revêtement a un gros impact compte tenu du besoin en maintenance en plus des autres coûts qui y sont liés.

### 3. Comparaison des trois systèmes

Dans cette dernière partie, nous allons comparer le coût environnemental des trois systèmes. Pour rendre cette comparaison objective, il nous faut comparer des éléments équivalents. Cette équivalence est définie en **Annexe** en deux étapes ;

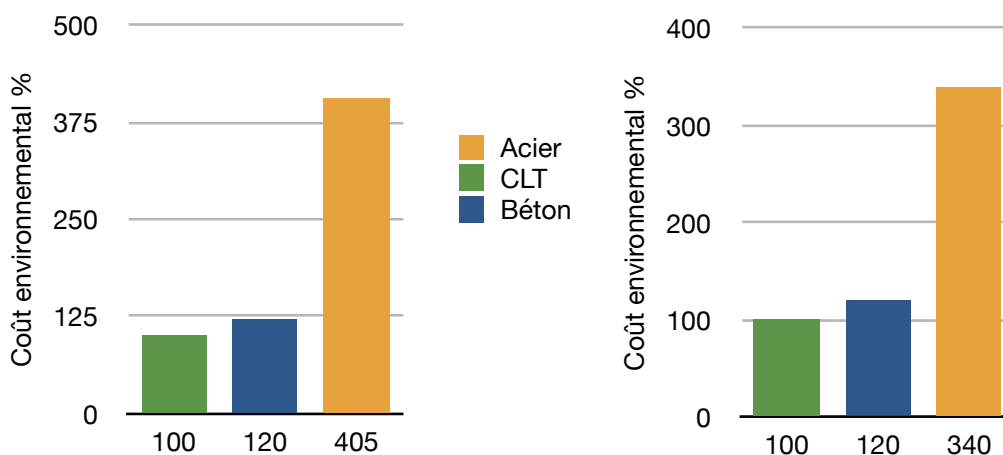
La première étape consiste à trouver des facteurs de proportion de volume structurel équivalent :

**Graphique17-18:** Le graphique de gauche montre la quantité de volume structurel équivalent dans les structures verticales tandis qu'à droite le volume structurel équivalent dans le cas de plancher le tout exprimé en %



La deuxième consiste à déterminer un facteur de proportion des coûts environnementaux entre les matériaux de sorte à pouvoir l'extrapoler, au cas d'étude :

**Graphique19-20:** Le graphique de gauche montre le coût environnemental des trois système pour un volume structurel équivalent dans les structures verticales et à droite pour le cas des planchers, le tout exprimé en %



Maintenant que nous avons une idée des proportions de coûts environnementaux au sein de chaque système, nous allons les faire intervenir pour les quatre types de parois du cas d'étude. À cette étape on constate déjà un écart des 300 % entre le CLT et l'acier et un écart de 20 % entre le CLT et le béton dans le cas des structures verticales. Ces proportions nous montrent que le CLT gagne haut la main face à l'acier et est étrangement assez proche du béton.

Nous allons donc comparer chaque complexe du cas d'étude en l'imaginant respectivement en béton et en acier. Pour ce faire certains aspects sont négligés, nous supposons :

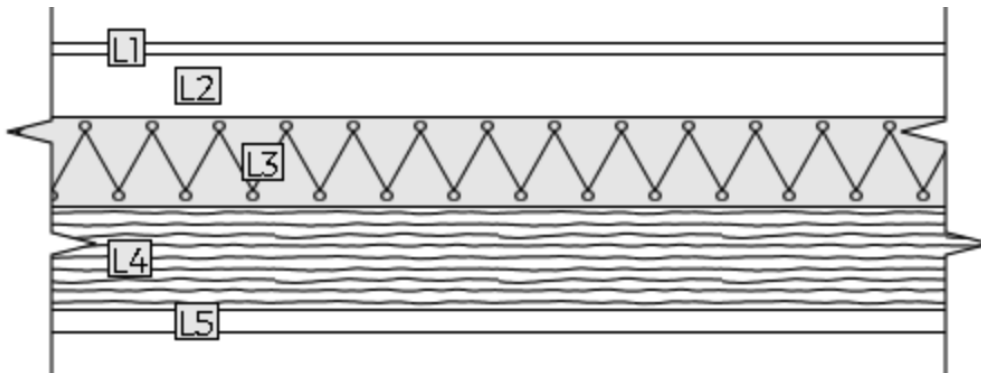
- Qu'uniquement la structure change
- Que tous les autres éléments restent identiques
- Qu'on ne tient pas compte des ouvertures

Cette négligence est en faveur des autres systèmes ;

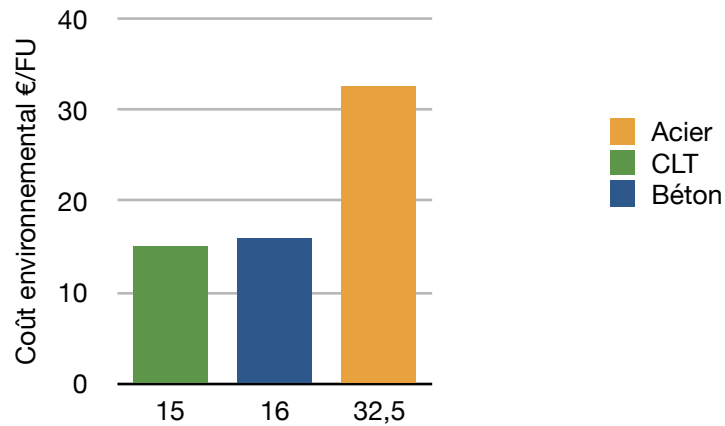
dans le cas de parois en acier, il faut ajouter une sous-structure pour les finitions de murs, et dans le cas de l'isolation thermique, il faudrait la surdimensionner afin d'obtenir des mêmes performances énergétiques pour les trois systèmes. Ces facteurs feraient donc pencher d'autant plus la balance vers le CLT. Cela dit nous partons ici du principe que les éléments restants inchangés mis à part la structure, proportionnellement aux facteurs précédemment cités.

Comme nous l'avons vu au point **2.3**, le coût environnemental de la structure CLT vaut entre 37 % et 76 % en fonction du cas de parois étudié. La structure est donc un enjeu majeur de la construction c'est pourquoi c'est elle que l'étude met en valeur. Les résultats seront légèrement optimistes concernant l'acier et le béton, mais restent néanmoins une approche cohérente des enjeux qui s'en dégagent.

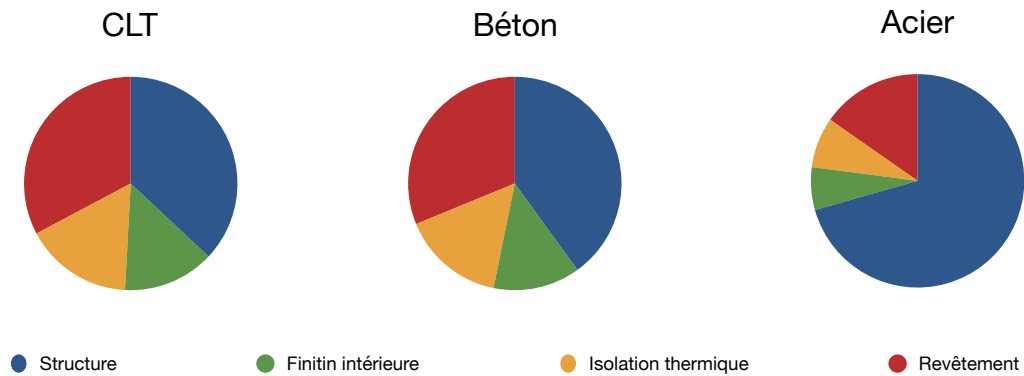
### 3.1. Façades



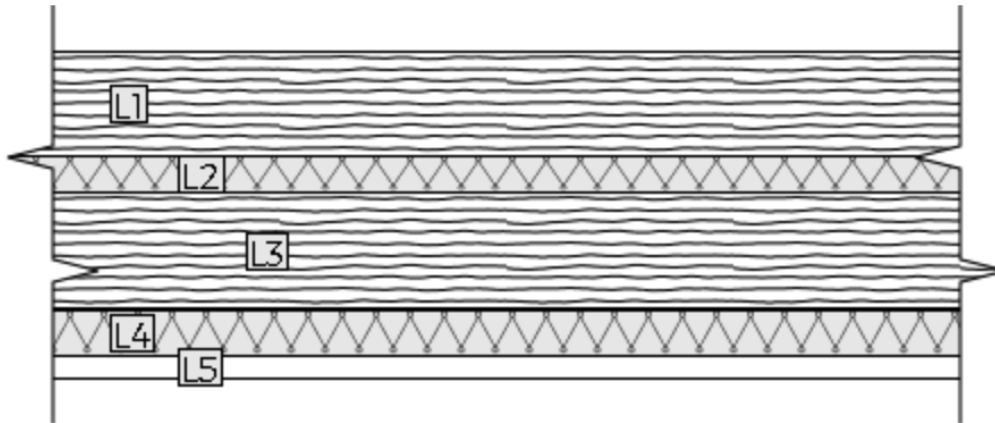
**Graphique 21** : Le graphique compare les coûts environnementaux du complexe de façade pour les trois systèmes structurels.



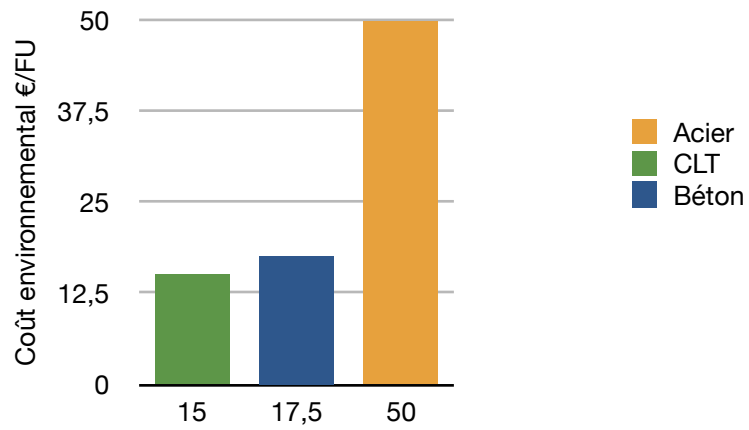
**Graphique 22-23-24** : Les trois graphiques représentent le coût environnemental en fonction du type de matériaux présent dans le complexe de façade pour les trois systèmes



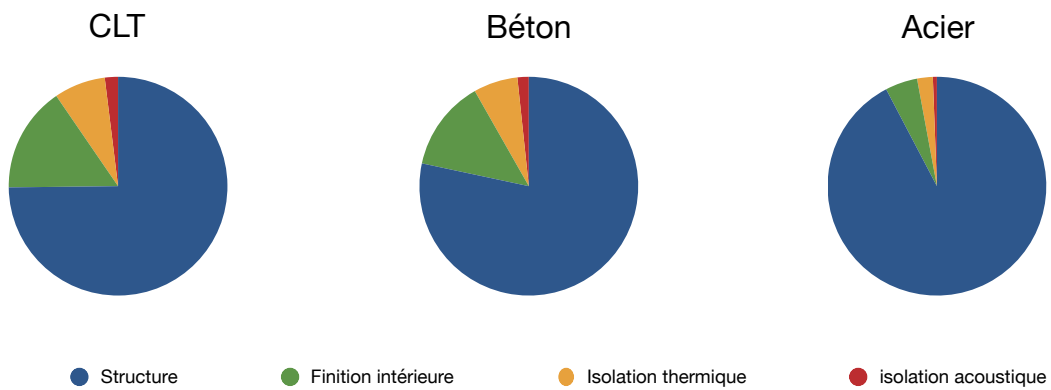
### 3.2. Parois circulations verticales



**Graphique 25 :** Le graphique compare les coûts environnementaux des parois de circulations verticales pour les trois systèmes structurels.

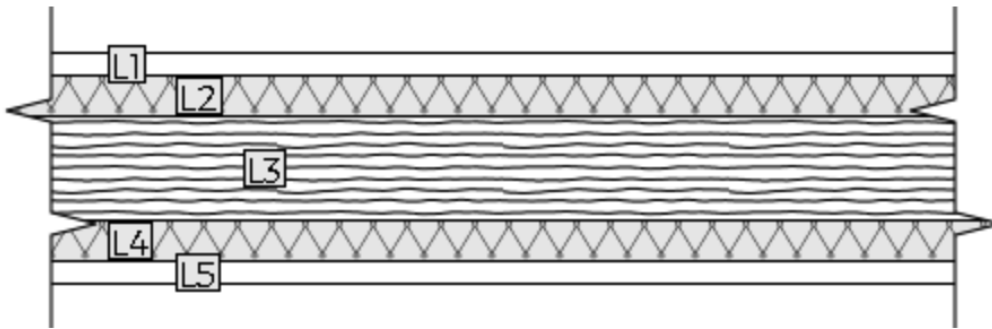


**Graphique 26-27-28 :** Les trois graphiques représentent le coût environnemental en fonction du type de matériaux présent dans les parois de circulations verticales pour les trois systèmes structurels

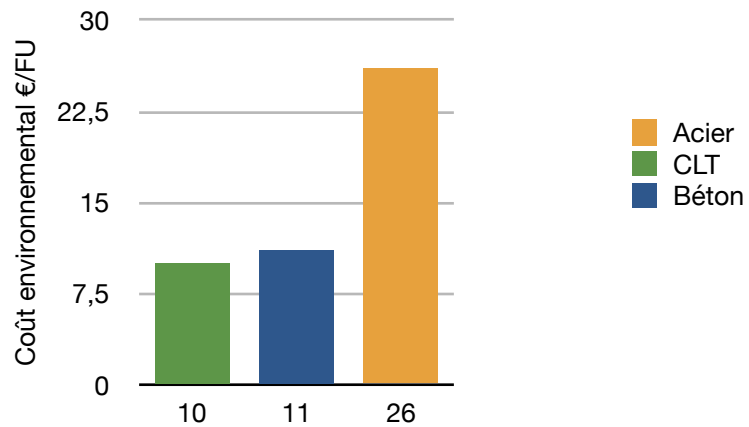




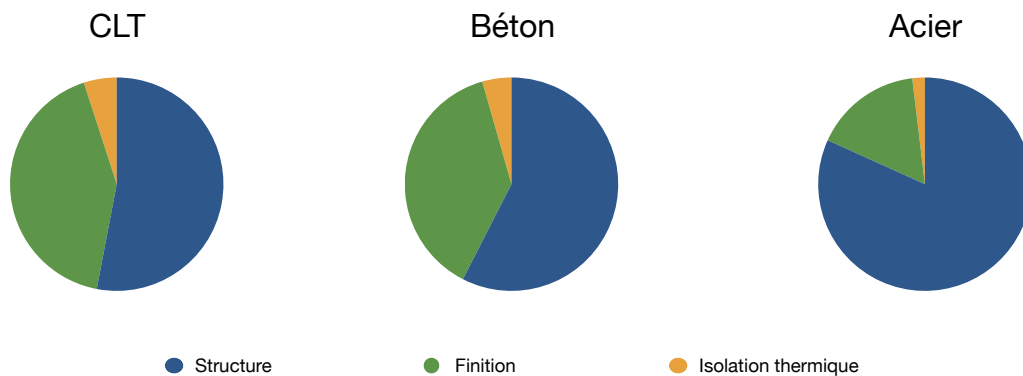
### 3.3. Parois intérieures



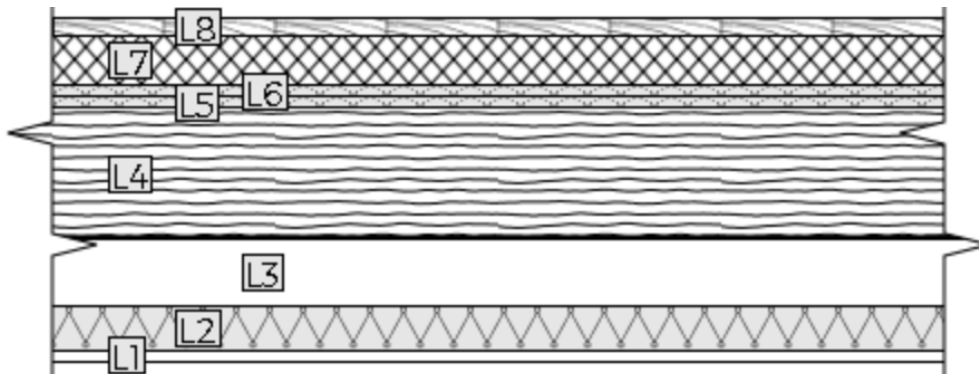
**Graphique 29 :** Le graphique compare les coûts environnementaux des parois intérieures pour les trois systèmes structurels.



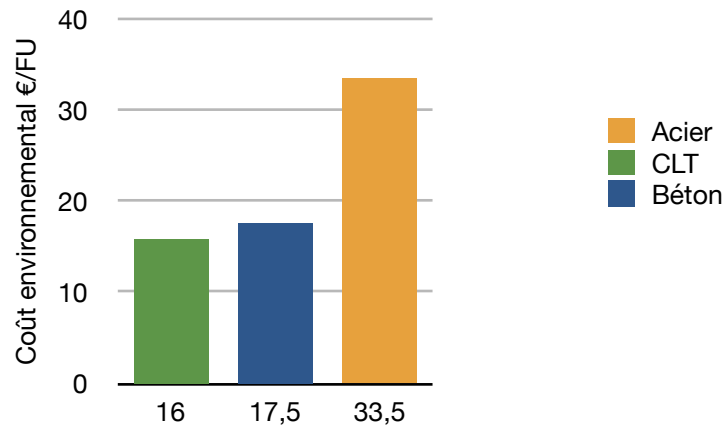
**Graphique 31-32-33 :** Les trois graphiques représentent le coût environnemental en fonction du type de matériaux présent dans les parois intérieures pour les trois systèmes structurels



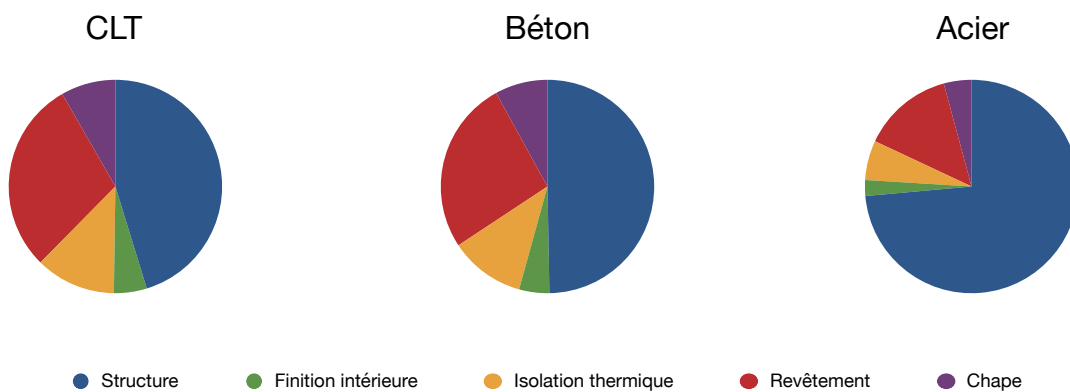
### 3.4. Planchers



**Graphique 30 :** Le graphique compare les coûts environnementaux des planchers pour les trois systèmes structurels.



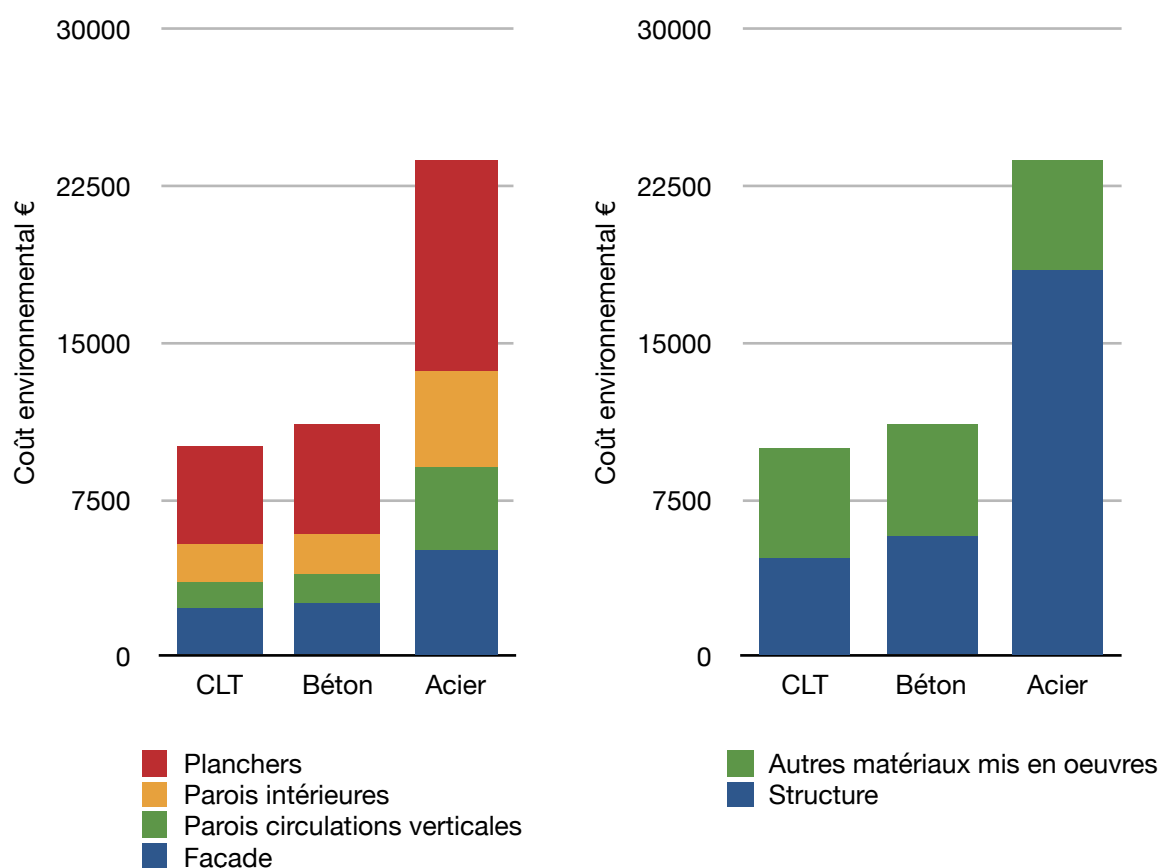
**Graphique 34-35-36 :** Les trois graphiques représentent le coût environnemental en fonction du type de matériaux présent dans les plancher pour les trois systèmes structurels



Les quatre types de parois sont présents à proportions variées dans le projet. Si on regarde les proportions au point 2.2, on se rend compte que la paroi la plus influente sur le coût environnemental est sans hésiter « le plancher ».

Le coût qu'on vient de calculer au m<sup>2</sup> a une influence différente suivant sa proportion au sein du projet. On peut calculer rapidement le coût global pour un étage type en fonction des proportions de parois utilisées.

**Graphique 37-38** : Le graphique de gauche représente le coût environnemental liés aux proportions de parois utilisées au sein d'un étage type, le graphique de droite met en valeur le coût environnemental lié à la structure au sein d'un étage type



Le **graphique 38** montre que dans le cas d'étude, le coût environnemental de la structure représente au minimum 45 % pour le cas du CLT et plus de 75 % dans le cas de l'acier. Cette étude met en valeur l'importance de la structure au sein d'un projet d'architecture comme motif principal de questionnement pour l'architecte.





## Conclusion

Le bois est le plus ancien matériau utilisé par l'homme, néanmoins cette étude met l'accent sur la contemporanéité du CLT en temps que matériau du XXI<sup>e</sup> siècle. À ce titre, il suscite un intérêt qui a été décrit en long et en large dans la **partie 1**. Tout du long on comprend qu'il y a un intérêt grandissant pour les hautes structures peu importe les matériaux mis en œuvre. Cet aspect va de pair avec le développement du CLT qui apparaît peu à peu comme **une solution écologiquement avantageuse** aux hautes structures.

L'enjeu premier réside dans sa promesse écologique, qui a été vérifiée par cette étude ; **Oui, le CLT est le système le plus respectueux de l'environnement**. Sur un étage type étudié, **il a un coût deux fois moins élevé que l'acier**. Cela dit, on remarque que l'impact du CLT est à peu de chose près identique à celui du béton. Cette observation peut être discutée sur plusieurs points ;

- La quantité d'isolation prise en compte devrait être supérieure pour le cas du béton et de l'acier afin d'avoir les mêmes performances énergétiques, ce qui accentue leur impact.
- Le logiciel utilisé ne tient pas compte de la séquestration carbone du bois dans les résultats.

Si on tient compte de cette séquestration, alors : prenons le cas du plancher étudié comme exemple, le complexe en CLT a un coût environnemental qui passe de 16 €/FU à **11 €/FU** contre **17,5 €/FU** pour le béton et **33,5 €/FU** pour l'acier. **Soit une différence de 70 % avec le béton et 230 % avec l'acier.**

Cet aspect ne signifie pas que le CLT coûte moins cher pour l'environnement que ce qu'annonce TOTEM, mais qu'il est bénéfique à l'indicateur d'impact « **réchauffement climatique** » pour une durée déterminée (ici 60 ans). Son bienfait ne concerne que le CO<sup>2</sup> et aucun autre gaz à effet de serre. Il faut bien comprendre cette nuance qui fait de lui une aide à moyen/court terme dans la réduction des émissions.

D'autres éléments qui peuvent nourrir la réflexion nous renvoient à la **Partie 2**, certes le béton a un impact moins important que l'acier sur l'environnement, cependant l'acier offre de belles promesses en termes de recyclage alors que le béton n'en propose actuellement pas énormément ou nécessite des processus complexes pour une remise en valeur peu convaincante.

D'autre part, le bois peut être recyclé pendant un temps jusqu'à son élimination par combustion, à ce stade il génère de l'énergie sous forme de calories, mais en contrepartie il libère le CO<sup>2</sup> accumulé pendant sa croissance, ce qui n'est pas le cas des deux autres matériaux.

Après cette étude il apparaît évident que le point central du débat autour du CLT est sa séquestration qui apporte de belles perspectives en temps que stockage temporaire. Sa libération inévitable peut être contrôlée et optimisée de sorte à garantir une séquestration maximale dans le temps. Grâce à la démesure des gratte-ciel qui mettent en oeuvre énormément de matière pour leur structure, **il apporte une réponse à la crise du réchauffement climatique tout en assimilant la demande mondiale en logements.**

La **Partie 3** nous montre que le choix des architectes pour un système structurel est non négligeable, cependant, les autres matériaux constituent une part importante du coût environnemental d'un projet. La remise en question sur la matérialité doit se faire au-delà de la structure et c'est justement grâce à des outils comme TOTEM que les architectes de demain pourront mettre cette réflexion en place de manière concrète et cohérente.

Il apparaît évident que l'aspect énergétique des bâtiments est prédominant dans l'impact sur l'environnement. C'est pourquoi l'impact des matériaux ne doit en aucun cas remplacer cet aspect. Comme nous l'avons souligné, ce questionnement vient en complément pour réduire d'autant plus les impacts environnementaux.

Un indicateur environnemental qui apparaît presque uniquement pour le CLT est « occupation du sol », en réalité on comprend qu'en favorisant l'industrie du bois, il faut planter et entretenir les forêts renouvelables. On est face à un paradoxe entre l'augmentation du nombre d'arbres qui accroît la capacité de stockage CO<sup>2</sup>, et la potentielle destruction ou dégradation de certains écosystèmes ainsi qu'une possible perte de biodiversité due à une industrie forestière intensive. Cet aspect est assez complexe et mériterait qu'on le développe plus en détail.

L'essor de ce nouveau matériau doit se faire dans le respect de l'environnement sans se transformer en une surconsommation, quoiqu'à mon sens, elle sera toujours moins néfaste que celle qu'on connaît actuellement avec le béton. Une chose est certaine, l'industrie du bois accroît et va continuer dans ce sens au même titre que les projets verticaux qu'elle génère, et ce, au détriment du béton et de l'acier.



Il est évident qu'on ne peut se passer des deux autres systèmes, en particulier pour les fondations des ouvrages, pour lesquelles le bois n'est pas assez efficace, surtout pour le cas des gratte-ciel qui nécessitent des fondations profondes, robustes et non sujettes aux dégradations de la nature.

Certains des plus hauts projets à l'étude allient les trois systèmes dans des proportions pouvant atteindre jusqu'à 90 % de bois. Aujourd'hui, il faut croire en une collaboration des matériaux pour répondre aux enjeux à venir, sans quoi on tomberait dans une illusion du « tout bois » qui cherche sans fondement à destituer l'acier et le béton. Les trois systèmes ont leur place dans le monde des gratte-ciel, dans des proportions intelligentes et en les utilisant là où il le faut. Il s'agit ici de faire un choix pertinent et non pas de répéter ce qu'on fait depuis toujours sans émettre de réflexion.

Quand nous aurons plus de projets de grande hauteur en bois à étudier, il serait intéressant de se pencher sur la question d'hybridation des matériaux et se demander en quoi ils font sens vis-à-vis du « mono-matériau ».

L'aspect économique est aussi un facteur important à prendre en compte pour les départager, il n'a pas été abordé ici puisque l'objet de l'étude était l'aspect écologique, il n'en reste pas moins un questionnement qui a le mérite d'exister et sur lequel quelqu'un devrait se pencher sérieusement.

Il n'existe pas de matériau miracle pour le cas des gratte-ciel, mais il apparaît ici que le CLT est la meilleure alternative d'un point de vue environnemental tout du moins.

J'aimerais souligner le fait que nous, architectes, ingénieurs ne pouvons plus fermer les yeux sur les objets que nous concevons de manière purement esthétique ou conceptuelle. Les faits sont là, énoncés et démontrés, il faut en tenir compte pour pouvoir appréhender le futur avec optimisme, quoique très réaliste, je terminerai sur ces mots :

*« L'écologie n'arrive à rien parce qu'elle est incompatible avec notre idée abrahamique de la terre. Nous abusons de la terre parce que nous la considérons comme une commodité qui nous appartient. Si nous la considérons au contraire comme une communauté à laquelle nous appartenons, nous pouvons commencer à l'utiliser avec amour et respect. Il n'y a pas d'autre moyen si nous voulons que la terre survive à l'impact de l'homme mécanisé, et si nous voulons engranger la moisson esthétique qu'elle est capable d'offrir à la culture. »*

*Aldo Leopold,*

*Almanach d'un comté des sables*



## PARTIE 4 : Annexe

Cette partie comporte des précisions sur les modalités de détermination des différents facteurs de proportion utilisés dans la partie 3 ainsi qu'une liste exhaustive de projets de grande hauteur en bois à travers le monde.



## **1. Facteurs de proportion**

Afin de pouvoir comparer les trois systèmes évoquer dans ce travail, il faut pouvoir trouver des facteurs de proportion qui permettent cette comparaison. En effet, on ne peut confronter ces systèmes de par leur impact environnemental au mètre cube puisque l'étude s'intéresse à leur utilisation structurelle au sein de projets de grande hauteur et chaque système ne possède pas les mêmes caractéristiques mécaniques. On comprend facilement qu'il faudra un plus gros volume de bois que d'acier pour supporter une charge égale.

N'étant pas ingénieur, le savoir mis à ma disposition au sein d'une structure n'est autre que le prédimensionnement qui nous donne une idée des dimensions relatives d'un élément porteur. Ainsi dans les calculs, deux caractéristiques des matériaux sont mises en avant, il s'agit de la contrainte admissible exprimée en  $N/mm^2$  et du module d'élasticité dit module de Young exprimé également en  $N/mm^2$ .

Pour dimensionner une colonne, on utilise la contrainte admissible pour une force perpendiculaire ;  $10N/mm^2$  pour le bois,  $11N/mm^2$  pour le béton et  $160N/mm^2$  pour l'acier.

Pour une dalle (considérée comme une poutre biappuyée) dont la force est perpendiculaire à l'élément structurel, on fait référence au module d'élasticité pour pouvoir déterminer une épaisseur pour une certaine flèche de déformation donnée.

Ce facteur peut s'appliquer à une épaisseur dimensionnée et donc est transposable en volume puisque la comparaison des trois systèmes ne peut se faire qu'au sein d'un même projet pour lequel seuls la contrainte admissible et le module d'élasticité changent d'un matériau à l'autre, le volume structurel va alors changer proportionnellement à ces facteurs.

**Tableau 10** : Contrainte admissible, module de Young et les proportions qui en résultent

<b>Systeme</b>	<b>Contrainte admissible N/mm<sup>2</sup></b>	<b>Proportion Structure verticale %</b>	<b>Module d'élasticité N/mm<sup>2</sup></b>	<b>Proportion structure horizontale %</b>
Acier	160	6,25	210	4,76
Béton	11	90,9	11	90,9
CLT	10	100	10	100

Pour exemple :

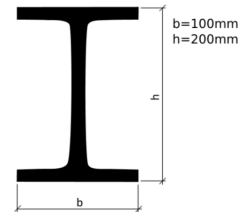
- Si on impose un volume structurel vertical de 1 m<sup>3</sup> de CLT, on aura 90,9 % de ce volume en béton soit 0,909 m<sup>3</sup> et son équivalent en acier sera de 6,25 % soit 0,0625 m<sup>3</sup>.
- Si on impose un volume structurel d'une dalle ou d'une poutre de 1 m<sup>3</sup> de CLT, on aura 90,9 % de volume en béton soit 0,909 m<sup>3</sup> et son équivalent en acier sera de 4,76 % soit 0,0476 m<sup>3</sup>.

## 2. Comparaison brute des systèmes

### 2.1. Structures verticales

#### 2.1.1. Acier

L'étude se base sur un mètre courant d'un IPE 200 d'une surface de 2850 mm<sup>2</sup>. Le choix de cet élément a été restreint par le logiciel TOTEM qui ne possède pas un grand catalogue de structure en acier.



#### 2.1.2. Béton



La quantité de béton a été définie par la quantité d'acier, ainsi pour une surface de 2850 mm<sup>2</sup> en acier on fait une simple règle de trois :

$$(2850/6,25)*90,9 = 41\,450,4 \text{ mm}^2$$

Sur un mètre courant on a donc  $41\,450,4/1000 = 41,45$  mm soit 4,1 cm

#### 2.1.3. CLT



La quantité de CLT a été définie par la quantité d'acier, ainsi pour une surface de 2850 mm<sup>2</sup> on fait une simple règle de trois :

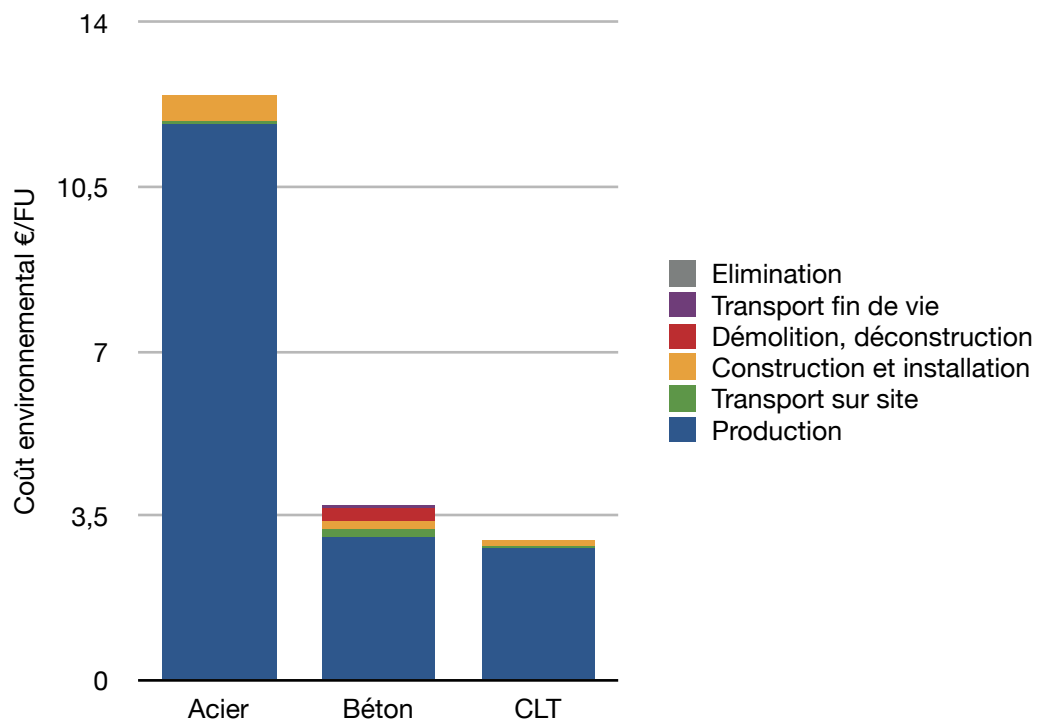
$$(2850/6,25)*100 = 45\,600 \text{ mm}^2$$

Sur un mètre courant on a donc  $45\,600/1000 = 45,6$  mm soit 4,56 cm



## 2.1.4. Coût pour toutes les étapes du cycle de vie

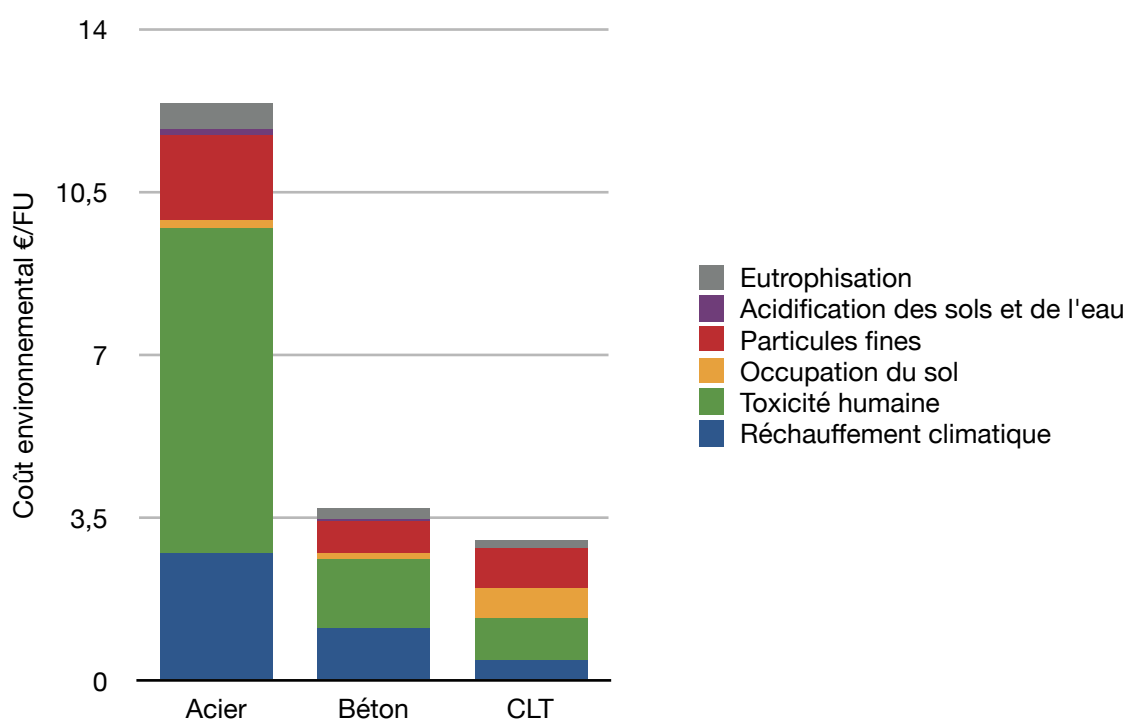
**Graphique 39** : Le graphique représente le coût environnemental de chaque système par étape de cycle de vie.



Le **graphique 39** montre que l'étape du cycle de vie des matériaux la plus influente sur l'environnement est pour les trois la « production ». Ensuite on a d'autres indicateurs en proportions variées suivant le système « construction et installation » et « élimination ». Néanmoins on remarque certains facteurs apparaître pour le béton, « transport jusqu'au site de construction », « démolition déconstruction » et « transport fin de vie ».

### 2.1.5. Coût pour tous les indicateurs d'impact

**Graphique 40** : Le graphique représente le coût environnemental de chaque système par indicateur d'impact



Le **graphique 40** montre que 6 indicateurs d'impact environnemental sortent du lot pour les trois systèmes étudiés. Deux indicateurs sont prépondérants, le « réchauffement climatique » ainsi que « toxicité humaine ». Les quatre autres indicateurs sont relatifs à chaque système, « acidification des sols », « eutrophisation », « particules fines » et « occupation du sol ».

## 2.1.6. Précision du coût par indicateur d'impact

Indicateur de l'impact	Coût environnemental €/FU	Coût environnemental %
Réchauffement climatique	2,764 €/FU	22,11 %
Toxicité humaine	6,94 €/FU	55,59 %
Occupation du sol	0,2 €/FU	1,65 %
Particules fines	1,85 /FU	14,81 %
Acidification des sols et de l'eau	0,11 €/FU	0,9 %
Eutrophisation	0,58 €/FU	4,64 %
<b>Total</b>	<b>12,5 €/FU</b>	<b>100 %</b>

Tableau 11 : Acier, coût environnemental par indicateur

Indicateur de l'impact	Coût environnemental €/FU	Coût environnemental %
Réchauffement climatique	1,12 €/FU	30,11 %
Toxicité humaine	1,5 €/FU	40,43 %
Occupation du sol	0,115 €/FU	3,09 %
Particules fines	0,69 /FU	18,72 %
Acidification des sols et de l'eau	0,03 €/FU	0,97 %
Eutrophisation	0,24 €/FU	6,47 %
<b>Total</b>	<b>3,725 €/FU</b>	<b>100</b>

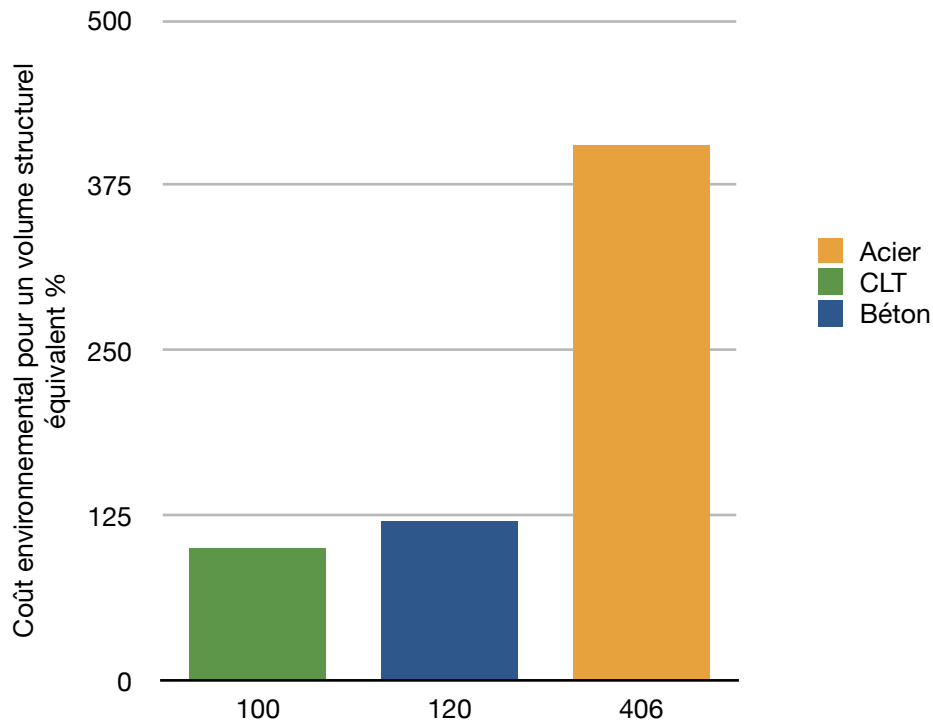
Tableau 12 : Béton, coût environnemental par indicateur

Indicateur de l'impact	Coût environnemental €/FU	Coût environnemental %
Réchauffement climatique	0,47 €/FU	15,48 %
Toxicité humaine	0,88 €/FU	28,99 %
Occupation du sol	0,65 €/FU	21,6 %
Particules fines	0,83 €/FU	27,5 %
Acidification des sols et de l'eau	0,02 €/FU	0,75 %
Eutrophisation	0,168 €/FU	5,54 %
<b>Total</b>	<b>3,036 €/FU</b>	<b>100 %</b>

Tableau 13 : CLT, coût environnemental par indicateur

### 2.1.7. Proportions d'impact en fonction du système

**Graphique 41 :** Le graphique représente le rapport de proportion du coût environnemental lié à un volume structurel équivalent.



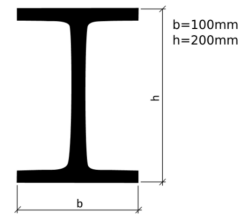
Cet exercice permet de mettre au point des proportions de comparaison des impacts environnementaux entre les trois systèmes. Elles ont été appliquées dans l'étude de Murray Grove afin de déterminer le coût environnemental des cloisons verticales dans le système béton et acier en partant du coût environnemental du CLT comme référence.



## 2.2. Structures horizontales

### 2.2.1. Acier

L'étude se base sur un mètre courant d'un IPE 200 d'une section de 2850 mm<sup>2</sup>. Le choix de cet élément a été restreint par le logiciel TOTEM qui ne possède pas un grand catalogue de structure en acier.



### 2.2.2. Béton



La quantité de béton a été définie par la quantité d'acier, ainsi pour une surface de 2850 mm<sup>2</sup> on fait une simple règle de trois :

$$(2850/4,76)*90,9 = 54\,425,4 \text{ mm}^2$$

Sur un mètre courant on a donc  $54\,425,4/1000 = 54,42 \text{ mm}$

soit 5,4 cm

### 2.2.3. CLT



La quantité de CLT a été définie par la quantité d'acier, ainsi pour une surface de 2850 mm<sup>2</sup> on fait une simple règle de trois :

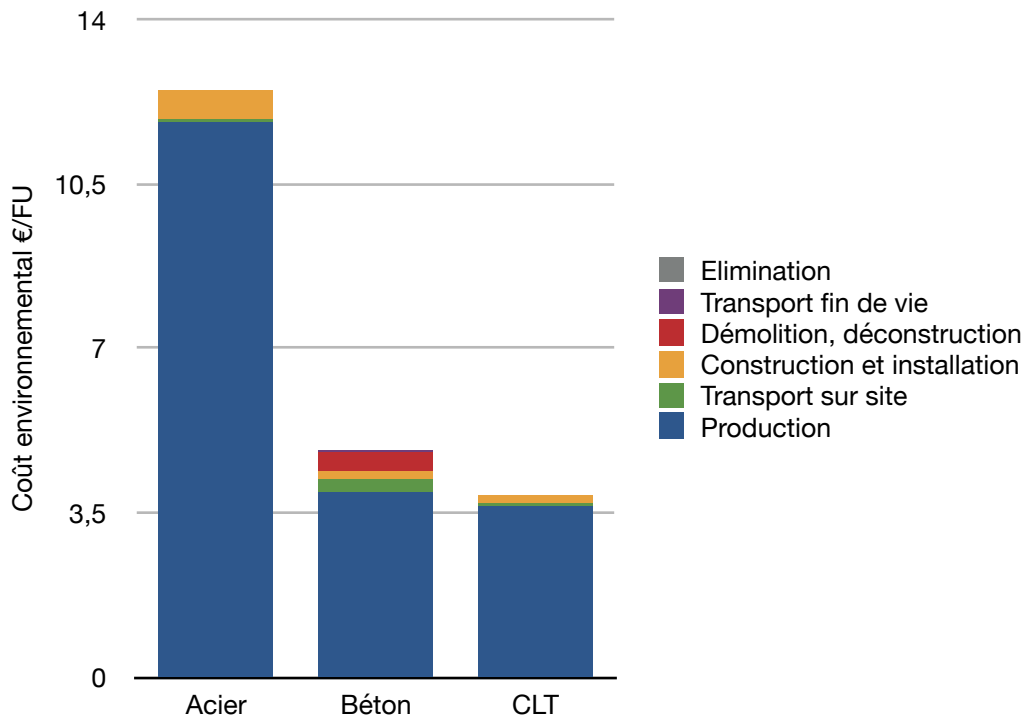
$$(2850/4,76)*100 = 59\,873,9 \text{ mm}^2$$

Sur un mètre courant on a donc  $59\,874/1000 = 59,9 \text{ mm}$

soit 5,9 cm

## 2.2.4. Coût pour toutes les étapes du cycle de vie

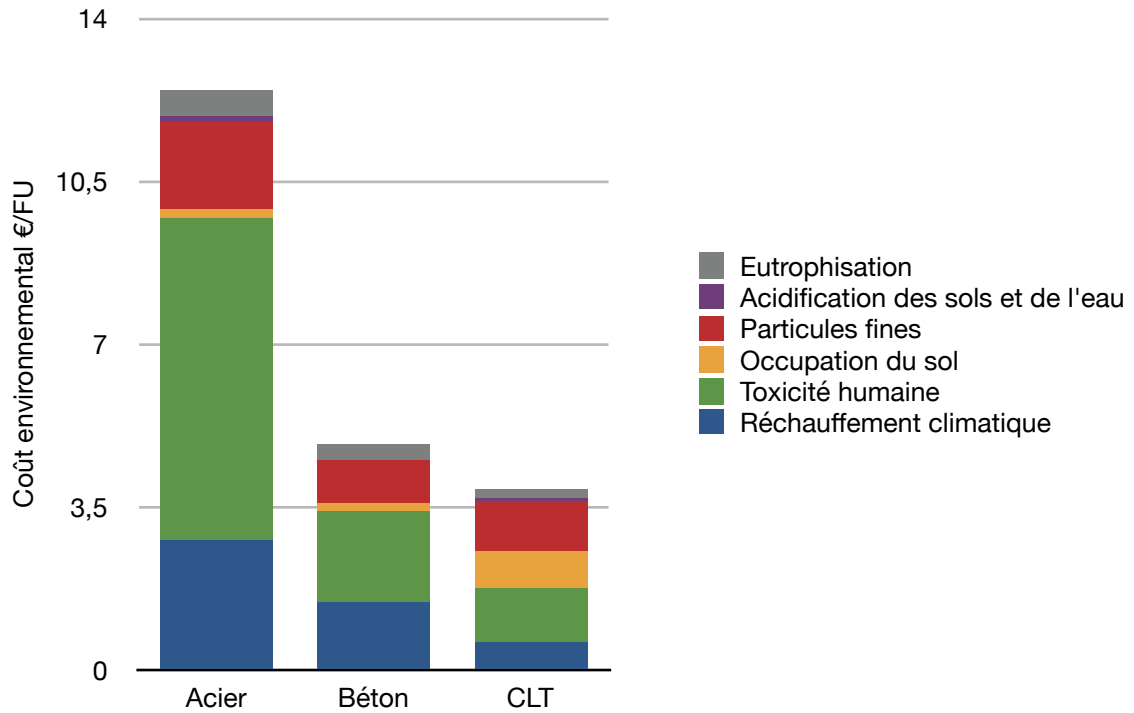
**Graphique 42** : Le graphique représente le coût environnemental de chaque système par étape de cycle de vie.



Le **graphique 42** montre que l'étape du cycle de vie des matériaux la plus influente sur l'environnement est pour les trois la « production ». Ensuite on a d'autres indicateurs en proportions variées suivant le système ; « construction et installation » ainsi que « élimination ». Néanmoins on remarque certains facteurs apparaître pour le béton, « transport jusqu'au site de construction », « démolition et déconstruction ».

### 2.2.5. Coût pour tous les indicateurs d'impact

**Graphique 43** : Le graphique représente le coût environnemental de chaque système par indicateur d'impact.



Le **graphique 43** montre que 6 indicateurs d'impact environnemental sortent du lot pour les trois systèmes étudiés. Deux indicateurs sont prépondérants ; « réchauffement climatique » ainsi que la « toxicité humaine ». Les quatre autres indicateurs sont relatifs à chaque système, « acidification des sols », « eutrophisation », « particules fines » et « occupation du sol ».



## 2.2.6. Précision du coût par indicateur d'impact

Indicateur de l'impact	Coût environnemental €/FU	Coût environnemental %
Réchauffement climatique	2,764 €/FU	22,11 %
Toxicité humaine	6,94 €/FU	55,59 %
Occupation du sol	0,2 €/FU	1,65 %
Particules fines	1,85 /FU	14,81 %
Acidification des sols et de l'eau	0,11 €/FU	0,9 %
Eutrophisation	0,58 €/FU	4,64 %
<b>Total</b>	<b>12,5 €/FU</b>	<b>100 %</b>

Tableau 14 : Acier, coût environnemental par indicateur

Indicateur de l'impact	Coût environnemental €/FU	Coût environnemental %
Réchauffement climatique	1,46 €/FU	30,11 %
Toxicité humaine	1,96 €/FU	40,43 %
Occupation du sol	0,15 €/FU	3,09 %
Particules fines	0,9 /FU	18,72 %
Acidification des sols et de l'eau	0,04 €/FU	0,97 %
Eutrophisation	0,31 €/FU	6,47 %
<b>Total</b>	<b>4,859 €/FU</b>	<b>100</b>

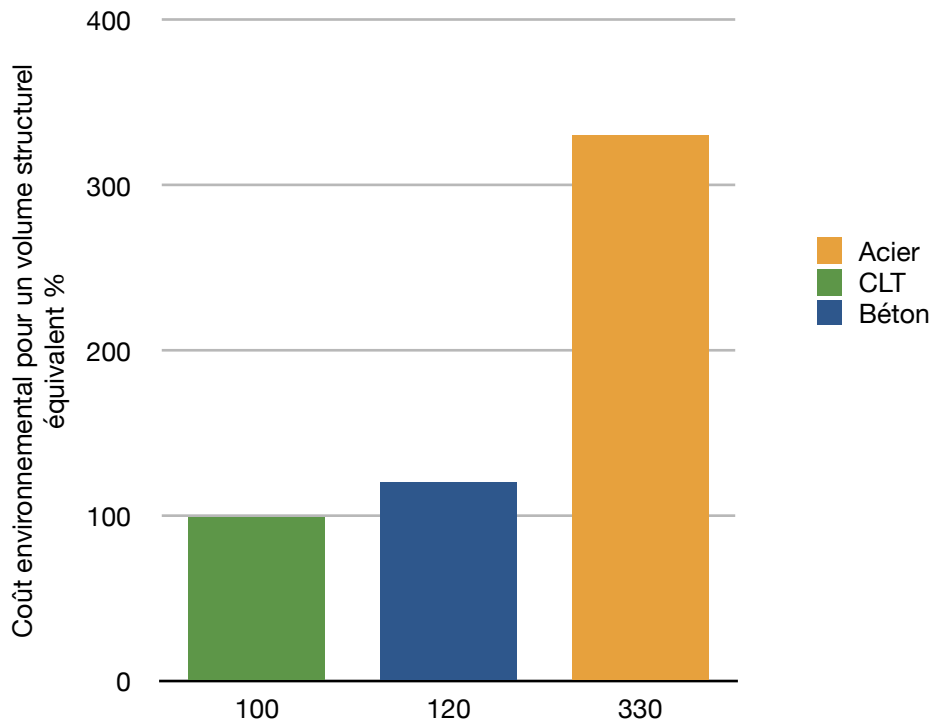
Tableau 15 : Béton, coût environnemental par indicateur

Indicateur de l'impact	Coût environnemental €/FU	Coût environnemental %
Réchauffement climatique	0,6 €/FU	15,48 %
Toxicité humaine	1,13 €/FU	28,99 %
Occupation du sol	0,84 €/FU	21,6 %
Particules fines	1,08 €/FU	27,5 %
Acidification des sols et de l'eau	0,03 €/FU	0,75 %
Eutrophisation	0,21 €/FU	5,54 %
<b>Total</b>	<b>3,928 €/FU</b>	<b>100 %</b>

Tableau 16 : CLT coût environnemental par indicateur

### 2.2.7. Proportion d'impact en fonction du système

**Graphique 44** : Le graphique représente le rapport de proportion du coût environnemental lié à un volume structurel équivalent.



Cet exercice permet de mettre au point des proportions de comparaison des coûts environnementaux entre les trois systèmes. Elles ont été appliquées dans l'étude de Murray Grove afin de déterminer le coût environnemental des planchers dans le système béton et acier en partant du coût environnemental du CLT comme référence.







### 3. Cas exemplatifs <sup>62</sup>

#### 3.1. Critère de choix

La sélection des cas exemplatifs a été faite selon différentes définitions des gratte-ciel. Pour pouvoir comprendre ce que c'est, il faut observer sa définition, ici le Larousse :

*« Bâtiment d'habitation ou de bureaux à grand nombre d'étages et à faible emprise au sol par rapport à sa hauteur. (On dit en langue administrative I.G.H. [immeuble de grande hauteur]). Le gratte-ciel est une création de l'architecture américaine, et spécialement de l'école de Chicago, à la fin du XIXe siècle ».*

Cette définition fait allusion aux immeubles de grande hauteur qui eux-mêmes sont définis par les normes incendies. La définition varie selon les pays afin d'appliquer des recommandations plus ou moins strictes selon la hauteur. Ce ne sont en réalité pas des normes, mais des lois qui imposent des règles obligatoires en termes de sécurité au feu.

En Belgique, les immeubles de grande hauteur (IGH) sont définis dans l'arrêté royal du 12 juillet 2012 comme bâtiments hauts (BH) dont la hauteur est supérieure à 25 m<sup>63</sup>. Toutes ces normes sont strictement relatives à la Belgique, mais c'est celle à laquelle le travail se réfère pour restreindre les cas d'études.

Seule la hauteur du bâtiment ne peut définir le concept de tour, par exemple une barre d'habitation supérieure à cette hauteur n'y correspond pas. C'est pourquoi la définition du Larousse vient compléter la compréhension. Ainsi cette partie commence par les projets « ambigus » à savoir ceux qui divergent légèrement du concept, mais qui ont apporté beaucoup dans le développement des gratte-ciel en bois.

---

<sup>62</sup> Fourthdoor, « Overview of CLT tall towers and larger scale housing, office and related projects as of early 2018 »

<sup>63</sup> Annexe 4 et 4/1 de l'Arrêté Royal relatif aux normes incendies en Belgique





**Carte du monde:**

Elle représente les zones actuels de développement de hautes structures bois. Elle permet de visualiser les pôles les plus influents. La taille des zones oranges représente de manière schématique le nombres de projet





Design center for design innovation, photographie : © Ema Pete



T3 Mineapolis, MGA, photographie : © Blaine Brownell



Patch 22, photographie : © Luuk Krame

## **3.2. Ambigus**

### **3.2.1. Design center for design innovation, Vancouver, MGA**

Le projet de MGA comprend huit étages pour un total de 29,5 m, à son achèvement il s'agissait de la structure tout en bois la plus haute du monde. Aujourd'hui des bâtiments plus hauts ont vu le jour à Vancouver dont la tour Brock Commons, T3 Mineapolis ou encore la Terrace House de Shigeru Ban pour bientôt. Ensemble ils font de Vancouver le centre névralgique des grands immeubles en bois d'Amérique du Nord.

### **3.2.2. T3, Mineapolis, MGA**

La tour est actuellement le plus haut projet en bois des États-Unis, sur sept niveaux, environ 3600 m<sup>3</sup> de CLT sont mis en œuvre et stockent pas loin de 3200 tonnes de CO<sup>2</sup>. Le bois provient d'un spécialiste canadien du CLT, Structurecraft. Il aura fallu seulement deux mois et demi pour monter la structure.

### **3.2.3. Patch 22, Amsterdam, Tom Frantzen**

Patch 22 est un projet inhabituel, sur un terrain portuaire industriel à Amsterdam, l'immeuble de sept étages conçu de manière extrêmement durable s'élève à 30 m au-dessus du sol. Il propose une flexibilité incroyable permettant de permuter les espaces commerciaux et les espaces résidentiels. Ils peuvent être agrandis ou séparés en raison du manque de cloisons structurelles intermédiaires pour des plans libres appropriables. L'approche durable a été rendue possible grâce à 195 tonnes de CLT de chez Mayr Melnholf, une toiture entièrement recouverte de panneaux photovoltaïques, la collecte et la réutilisation des eaux de pluie ainsi que des poêles à pellets utilisant des déchets de l'industrie du bois comme combustible.



Perspective, photographie : © Stephane Lartigue



International House, photographie : © Ben Guthrie



Daramu House, image : © Lendlease

#### 3.2.4. Perspective, Bordeaux, Nicolas Laisné

Achevé en 2019, le projet culmine à 30 m pour sept niveaux. Il utilise du LVL et du lamellé collé plutôt que du CLT. Il contribue à la valorisation des secteurs locaux et régionaux pour l’approvisionnement du bois même si StoraEnso a livré la majorité du LVL. « Perspective » vise une certification BREEAM dans l’optique d’offrir des bureaux respectueux de l’environnement.

#### 3.2.5. International House, Sydney, Lendlease

Inauguré en 2017, International House est le premier immeuble de bureau et commerce d’Australie à être construit à partir de panneaux de bois massif, un mélange de CLT et de lamellé collé. L’immeuble de bureaux de six étages met en œuvre plus de 2000 m<sup>3</sup> de CLT et 950 m<sup>3</sup> de poutres en lamellé-collé. Les poutres provenant de l’usine autrichienne de Stora Enso ont été expédiées depuis l’Europe centrale. Le lamellé-collé et le CLT sont utilisés en structure partout dans le bâtiment, les planchers, les colonnes, les murs, le toit, la cage d’ascenseur et même les escaliers. Le reste du bois provient de manufactures australiennes. Le projet a remporté de nombreux prix et a suscité l’intérêt pour un deuxième projet de bureaux en CLT dans le même quartier à Sydney, Daramu House.

#### 3.2.6. Daramu house, Sydney, Lendlease

Au cœur de la conception se trouve la structure avec une grille de 9 m par 9 m qui est actuellement la plus grande au monde pour des projets commerciaux de moyenne hauteur en bois. Une entrée impressionnante de 18 m est obtenue par une solution innovante qui met en place une ferme en bois qui elle fait également office de contreventement. Daramu House est leader mondial en termes de durabilité et d’innovation.



5 King Street, image : © Arecon



LCT ONE, photographie: © Norman Radon

### 3.2.7. 5 King Street, Brisbane, Smart Bates Architects

Le plus ambitieux projet australien en bois est le 5 King Street, à Brisbane. Conçu par Bates Smart Architects, l'immeuble de bureaux de dix étages atteint près de 45 m en utilisant un système de poutres en lamellé-collé en forme de V derrière la façade vitrée. Chaque colonne de lamellé-collé mesure 48 par 48 cm, 76 cm de profondeur pour les plus longues portées et 32 cm pour les plus courtes. Les colonnes forment une grille de 6 m par 9 m pour soutenir les planchers en CLT de tout le projet.

### 3.2.8. LCT ONE Life cycle tower, Dornbirn, Hermann Kauffman

Le projet qui clôt ce chapitre d'introduction dans la discussion des hauts bâtiments en bois met au point une nouvelle méthode de construction ; un système hybride bois-béton intégrant des planchers en CLT. Ce système a été introduit par Kauffman, mais majoritairement développé par la société privée CREE (dont le propriétaire a financé le projet). Suite à ce projet, les grandes lignes des bâtiments hauts en bois étaient toutes tracées.



Murray Grove, photographie, © Waugh Thistleton Architects



Hundeskogen, photographie, © Sindre Ellingsen, Njål Undenheim

### **3.3. Achievés**

#### **3.3.1. Murray Grove, Londres, Waugh Thistleton Architects**

Murray Grove est le premier projet de logement de grande hauteur construit entièrement en CLT, les éléments porteurs, les planchers et même les escaliers, cages d'ascenseur comprises. Le projet est composé de neuf niveaux dont les plans sont dessinés avec une trame et des façades porteuses. Étant donné qu'aucun projet de logement de cette taille n'avait jamais été réalisé auparavant, la construction de cet édifice a nécessité l'accord des autorités en termes d'isolation acoustique, résistance au feu, résistance de la structure. Le projet a été réalisé en quarante-neuf semaines, le montage de la structure en CLT a nécessité quatre hommes et vingt-sept jours. Offrant vingt-neuf appartements, il démontre le potentiel du CLT comme économiquement viable et responsable de l'environnement. Il offre une belle alternative au béton et à l'acier dans les immeubles de logement. Ce projet exemplaire a permis de stocker 186 tonnes de CO<sup>2</sup> a été l'introducteur du CLT au Royaume-Uni, il a lancé un mouvement international dans son utilisation pour la grande hauteur.

#### **3.3.2. Hundeskogen, Norvège, Helen & Hard/dRMM**

En 2007, Helen & Hard, en collaboration avec le Britannique dRMM, a commencé à travailler sur ce qui aurait été facilement le plus haut bâtiment en bois de l'époque. Hundeskogen, en Norvège, a tenté de pousser l'enveloppe en bois jusqu'à seize étages, mais il a rencontré des problèmes et a été suspendu. Initialement envisagés pour laisser la structure apparente, les travaux d'ingénierie structurelle ont été entrepris par Mike Hadi Associates, et la moitié de Techniker, les ingénieurs de Murray Grove. Lorsque Helen & Hard sont retournés travailler sur le projet avec l'Institut Treteknisk d'Oslo, ils ont eu du mal à persuader les développeurs de faire confiance à un bâtiment tout en bois, ainsi le projet s'est transformé pour laisser place à une structure hybride béton-bois et il a finalement été achevé en 2012.





Trees, image : © Artec/Sweco



Brummundal, photographie, © Anti Hamar, Edgar Haugen



Moholt Timber Towers, photographie: © MDH Akitekter

### 3.3.3. Treet, Bergen, Norvège, Artec/ Sweco

À Bergen, sur la côte ouest-norvégienne, une tour de quatorze étages pour 52,8 m de haut a été pendant deux ans le plus haut bâtiment en bois du monde jusqu'à ce que la tour Brock Commons de Vancouver l'éclipse de 0,2 mètre. Avec 385 tonnes de CLT et 550 m<sup>2</sup> de bois lamellé-collé fournis par Moelven, Treet a amené l'industrie mondiale du bois à se concentrer sur la côte ouest-norvégienne.

### 3.3.4. Brumundal, Norvège, Voll Arkitekter

Les Norvégiens ont récupéré le titre du bâtiment le plus haut avec la tour Mjøsa de dix-huit étages pour 80 m. Achevée à Brumunddal, à l'ouest d'Oslo en 2019 elle a été conçue par Voll Arkitekter et soutenue par le Finlandais MetsaWood, le projet offre tout un complexe hôtelier entièrement construit en bois massif. Il est actuellement le projet en panneaux de bois le plus haut au monde, mais se verra destitué par le projet de Vienne HoHo.

### 3.3.5. Moholt Timber Towers, Trondheim, MDH Arkitektur

Achévé en 2016 à Trondheim, Moholt Timber Towers est un large projet reprenant un jardin d'enfants et un plan directeur du village étudiant. Composé de trois blocs verticaux près du campus universitaire NTNU de Trondheim, chaque bâtiment atteint neuf étages pour près de 30 m, il constitue une belle représentation d'une application résidentielle des immeubles bois.

Le projet repose sur des fondations en béton visibles depuis l'intérieur, et d'une structure entièrement en bois pour le reste du projet. Il offre toutes structures apparentes à l'intérieur en temps que finition ce qui n'est pas le cas dans tous les pays à cause des réglementations incendie et de la facilité de poser un revêtement en plâtre pour protéger la structure.



Skaio, photographe : © Bernd Borchardt



Via Cenni, photographe : © Pietro Savorelli

### 3.3.6. Skaio, Heilborn, Kaden+Lager

La première tour en bois allemande a été construite dans la ville de Heilbronn, dans le sud-ouest du Bade-Wurtemberg. SKAIO a été lancé dans le cadre du « BUGA 2019 Federal Horticultural Show » de Heilborn. Il fait partie d'un site de huit nouveaux bâtiments près de l'entrée de BUGA 2019, SKAIO mesure 34 m de haut, avec dix étages et soixante appartements au-dessus du niveau du sol. De plus, il propose un deuxième bâtiment en bois de cinq étages qui fait également partie du plan global. Utilisant des panneaux d'épicéa fournis par Zublin Timber, SKAIO est une conception hybride béton/bois, avec un sous-sol, une cage d'escalier et un noyau d'ascenseur en béton. La surface totale hors sol est de 5 685 m<sup>2</sup>, avec 3 300 m<sup>2</sup> habitables dont environ la moitié sont des logements sociaux. Le rez-de-chaussée comprend un espace supplémentaire, avec une disposition intérieure pour les vélos, ainsi que des poussettes et des fauteuils roulants. La toiture offre une terrasse comme jardin collectif pour tous les logements.

### 3.3.7. Via Cenni, Milan, Rossiprodi Associates

Ce projet de logements sociaux de quatre à neuf étages a été lancé en 2012 par le cabinet milanais Rossi Prodi Associates. Le CLT est utilisé partout, y compris dans les escaliers et les cages d'ascenseur, le projet est supporté par une dalle de béton utilisée comme parking souterrain. Les blocs de logements mesurent 27 m de hauteur et fournissent cent-vingt-quatre unités d'habitation. Le projet a utilisé 6 100 m<sup>2</sup> de CLT, y compris pour les terrasses, où des panneaux de CLT se déploient en porte-à-faux pour former la base des balcons.



Brock Commons Tall Wood, photographie : © KK Law, Naturally :wood



Forté Living, photographie : © Emma Cross



Carbon 12, photographie : © Andrew Pogue

### 3.3.8. Brock Commons Tallwood, Vancouver, ActonOstry Architects

Le projet est composé de dix-huit étages pour 53 m de hauteur et abrite quatre-cent-quatre chambres d'étudiants sur le campus de l'Université de Colombie-Britannique à Vancouver. Les planchers sont en bois lamellé-collé et en CLT sur un rez-de-chaussée en béton. Conçu sur une grille structurale de 4 m par 2,85 m, l'ensemble de la structure stocke 1730 tonnes de CO<sup>2</sup> et a été construit en 66 jours. La façade extérieure est composée de panneaux préfabriqués à ossature d'acier pour un revêtement en bois Trespa composé à 70 % de fibre de bois. La structure reste non exposée avec des cloisons sèches et des revêtements en béton pour assurer une conformité aux normes incendies en vigueur.

### 3.3.9. Forté Living, Victoria Docks, Melbourne, Lendlease

Le premier des bâtiments de Lendlease était l'immeuble forté de dix étages à Melbourne, achevé en 2013 pour 32,5 m de hauteur. Ce premier bâtiment résidentiel australien CLT a nécessité le transport des sept-cent-cinquante-neuf panneaux par le biais de vingt-cinq conteneurs livrés depuis KLH en Autriche. Le CLT stocke 761 tonnes de CO<sup>2</sup>, mais aucun rapport ne fait référence à l'empreinte du transport maritime, ce qui minimiserait l'impact positif du bois.

### 3.3.10. Carbon 12, Portland, Kaiser+Path

Construit entièrement avec du CLT, Carbone 12 était l'un des plus hauts bâtiments du genre en Amérique du Nord, à son achèvement en 2018. Le développeur et l'architecte ont transcendé les codes du bâtiment bois qui limitaient leur hauteur. Le projet a laissé la porte ouverte à des bâtiments en bois plus hauts dans tout l'État. L'utilisation du CLT offre la structure visible, y compris les plafonds, planchers et poutres.



Light House, image : © Stora Enso

### 3.3.11. Light house Joensuu, Finlande, Arcadia Oy

L'immeuble en bois le plus haut de Finlande compte cent-dix-sept appartements pour étudiants qui varient de 26 à 47,5 m<sup>2</sup>. La mise en œuvre utilise du LVL et du CLT pour un total de plus de 2 000 m<sup>3</sup>. Plus de la moitié est du LVL utilisé pour les structures verticales et le reste du CLT mis en œuvre dans les planchers. Seul le rez-de-chaussée est en béton, tout le reste est en structure bois, y compris les escaliers et cages d'ascenseur. Cependant il n'y a presque aucun bois visible à l'intérieur conformément aux exigences en matière d'incendie, les surfaces sont principalement recouvertes de plaques de plâtre. Le revêtement extérieur est composé de carreaux de pierre de différentes nuances de blanc et de gris.





HoHo, image : © Cetus baudevelopment GmbH und schreinerkastler



Terrace House, photographie, © Shigeru Ban Architects

### **3.4. En Construction**

#### **3.4.1. HoHo Vienne, RLP Rudiger Lainer + Partner Architect**

À la fin de sa construction, le projet fera 84 m de haut pour devenir le nouveau plus haut bâtiment bois. Il propose une structure hybride béton-bois dont environ 75 % en bois et un noyau de service en béton. À l'aide d'un système d'empilement de modules préfabriqués, qui intègre des planchers, des colonnes et des façades en bois massif, HoHo utilisera 3600 m<sup>3</sup> de bois et éliminera 2800 tonnes de CO<sup>2</sup> dans le but de devenir un exemple pour l'évaluation TQB (Total Quality Building) du Conseil autrichien du bâtiment durable (ÖGNB). Le projet fait partie d'un plus grand plan nommé Urban Quarter, un important projet de durabilité urbaine à Seestadet, au nord de la ville. C'est également l'un des projets importants de Smart City de la capitale autrichienne.

#### **3.4.2. Terrace house, Vancouver, Shigeru Ban**

À Vancouver, Brock Commons sera bientôt rejoint par Terrace House de Shigeru Ban, une tour résidentielle haut de gamme de dix-neuf étage qui, selon son développeur, mesurera 71 m, elle ne dépassera donc pas la tour HoHo de Vienne. Terrace House comme son nom l'indique propose une succession de terrasses offrant différents types de jardins suspendus tous arborés d'une végétation luxuriante.



Sensation, photographie : © KOZ Architectes, Cmp Bois

### 3.4.3. Sensation, Strasbourg, KOZ Architectes

Reposant sur un socle en béton, les planchers, façades, noyaux d'ascenseur et escaliers sont entièrement en bois. La structure est constituée d'une façade porteuse et de planchers en CLT. Quant au bois lamellé-collé, il a été utilisé pour réaliser les portées intermédiaires. En outre, pour alléger la descente de charge, mais aussi le prix et pour économiser de la matière, l'épaisseur du CLT décroît à mesure que l'on s'élève dans les étages.



Wildspitze, image : © Stormer Murphy and Partner



Oakwood Timber Tower, image: © PLPArchitecture

### **3.5. À l'étude**

#### **3.5.1. Wildspitze, Hamburg, Störmer Murphy and Partner**

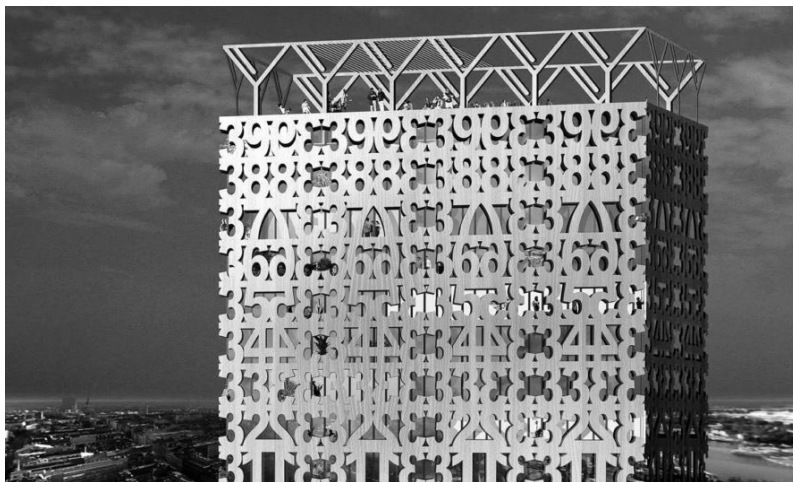
Promue comme la plus haute tour en bois d'Allemagne, la Wildspitze de Hambourg aura dix-huit étages pour 64 m et devrait être achevée en 2021. Le nom de l'immeuble fait référence à la deuxième plus haute montagne autrichienne. Elle est conçue par le cabinet hambourgeois Störmer Murphy and Partners et est actuellement décrite comme une tour entièrement en bois à l'exception d'une cage d'escalier et d'ascenseur en béton. Wildspitze pourra accueillir cent-nonante appartements ainsi que le siège de la Fondation allemande des animaux sauvages, avec un espace d'exposition multimédia dédié.

#### **3.5.2. Oakwood imber Tower, Barbican, PLP/Smith**

Conçue explicitement pour attirer l'attention des médias, Oakwood Timber Tower est un projet théorique situé dans le Barbican à Londres, elle propose quatre-vingts étages et plus de mille appartements. Le projet a réussi à susciter une attention considérable de la presse en Grande-Bretagne et à l'étranger. Le projet fait l'objet d'une recherche commune entre PLP Architecture, d'anciens ingénieurs de Ramboll, Smith and Wallwork, et la Cambridge Architecture School. La tour hybride en béton, acier et CLT vise à démontrer la faisabilité d'un gratte-ciel majoritairement bois de plus de 300 m. Les calculs de l'équipe suggèrent que la tour Oakwood nécessiterait 65 000 m<sup>3</sup> de panneaux de bois. Smith & Wallwork et son équipe émettent l'hypothèse que la structure mettra en oeuvre des méga-poutres et colonnes de 2,5 m par 2,5 m ainsi que des murs en bois massif de 1,75 m d'épaisseur.



Waterfront Stockholm, image : © Tham & Videgard Arkitekter



Tratoppen Timber Tower, image: © Ander Berensson



HSB 2023 Hagstaden Tower, image: © C.F. Moller

### 3.5.3. Waterfront, Stockholm, Tham & videgaard arkitekter

Tham & Videgard Arkitekt, l'un des bureaux suédois le plus reconnus dans les années 90 a été sollicité par l'industrie bois Folkhem pour proposer des gratte-ciel en bois, ce qui a abouti à la conception de quatre tours principalement composées de pin suédois, qui devaient normalement être construites à Frihamnen, en 2015. Depuis lors, le projet est suspendu.

### 3.5.4. Trätoppen, Stockholm, Anders Berensson arkitekten

Une autre tour en bois à Stockholm, la tour Trätoppen d'Anders Berensson Arkitekten de quarante étages, 133 m, se dresserait sur le parking Parkaden de Hans Asplund, et offrirait une façade décorée de numéros.

### 3.5.5. HSB 2023 Hagstaden Tower, Stockholm, CF Moller

Le projet est le résultat d'un concours organisé en 2013 par HSB Housing pour marquer son 100<sup>e</sup> anniversaire en 2023. En plus de la tour Hagstaden de vingt-six étages, HSB 2023 est un programme de recherche approfondi, avec une équipe de partenaires comme la KTH Royal Technical University de Stockholm, l'Université Linneas à Växjö ou encore le RISE, l'Institut suédois de recherche. Le programme est axé sur la préfabrication, du bois d'origine régionale et la réintroduction de sa connaissance dans le secteur de la construction suédoise.





Skelleftea Cultural Center, image: © White Arkitekter



I Love Nidalen, image: © SAAHA



Harvest, image : © AHA+, SAAHA

### 3.5.6. Skelleftea, Suède, White Arkitekter

Le nouveau centre culturel de Skellefteå de dix-neuf étages abritera une multitude d'organisations culturelles régionales, le théâtre régional Västerbotten, le musée Anna Nordlander, la galerie d'art Skellefteå et la bibliothèque de la ville, il devrait être achevé cette année.

### 3.5.7. I love Nydalen, Oslo, SAAHA

Le jeune cabinet Saaha situé à Oslo a adopté le CLT au cœur de sa stratégie de projets urbains pour développer deux tours en bois. I Love Nydalen est en voie de devenir une icône pour l'architecture verticale norvégienne comme témoin des projets de construction durable en cours. Organisé autour de la réhabilitation d'un ancien hall existant en une serre à ciel ouvert le projet est composé de trois nouveaux bâtiments, comprenant une tour CLT de vingt-et-un étages et deux autres blocs de logements de huit et neuf étages au nord du site. La tour en CLT sera la première à Oslo et démontrera également des stratégies de durabilité plus larges, y compris un transport axé sur le vélo pour les résidents, et l'introduction de la conception Aktiv-Hus à faible technologie dans le contexte de développement urbain.

### 3.5.8. Harvest, Oslo, AHA+SAAHA

L'autre projet CLT de Saaha, Harvest, était un concours de construction nordique. Harvest utilise également les principes Aktiv-Hus, associés à la philosophie cradle-to-cradle. Pour se démarquer de la concurrence, Saaha a fait savoir que le bois pourrait être d'origine indigène, fournissant un autre exemple de la façon dont les architectes norvégiens relèvent le défi d'utiliser le bois présent sur place et ce à des niveaux beaucoup plus ambitieux qu'il y a quelques années.



Fjordporten, image : © C.F. Moller & Reiulf Ramstad Arkitektur



Woodscraper, image : © Partner und Partner Architects



Hypérion, image : © Jean-Paul Viguier Associés

### 3.5.9. Fjordporten, Oslo, Reiulf Ramstad Arkitektur & CF Moller

Avec plusieurs années de recherche sur le CLT ainsi que des recherches sur le HSB 2023 à Stockholm, CF Møller commence maintenant à s'émanciper dans l'architecture verticale. Fjordporten, un projet hybride bois-béton qui dominera la gare Centrale d'Oslo a été développé en collaboration avec le bureau norvégien Reiulf Ramstad Arkitektur. Fjordporten mesure actuellement trente-et-un étages et respecte le modèle des projets de Stockholm, une tour en bois enrobée de verre avec un noyau en béton. Si le programme se déroule tel qu'il est actuellement conçu, les niveaux inférieurs amélioreront l'échangeur de transport en commun le plus fréquenté de la ville.

### 3.5.10. Woodscaper, Wolfsburg, Partner und Partner Architects

Conçu par Partner und Partner Architects, spécialistes du concept cradle-To-cradle, le projet est financé par la Fondation allemande pour l'environnement. À ses débuts, Woodscaper est surtout un exercice de recherche mettant l'accent sur les matériaux naturels, l'ACV et l'économie circulaire. La recherche est menée par la Detmolder School for Architecture and Inner Architecture de l'Université d'Ostwestfalen-Lippe.

### 3.5.11. Hypérion, Bordeaux, Jean-Paul Viguier & Associés

Hyperion, conçu par le studio parisien Jean-Paul Viguier & Associés, regroupe trois blocs résidentiels, de part et d'autre d'un bloc central de dix-huit étages, deux blocs de neuf et sept niveaux. Les trois tours en bois font partie d'un plan plus large du quartier Saint-Jean-Belcier à Bordeaux.



Silva, image : © Studiobellecour



La Ville Multi-Strate, image : © Jacques Ferrier Architects



HAUT, image : © TeamV

### 3.5.12. Silva, Bordeaux, BelleCour Architectes

Silva est un projet collaboratif entre BelleCour Architectes et Art and Build. Le site à usage mixte comprendra cent-quinze unités résidentielles, plus soixante-neuf logements abordables ainsi que des commerces et un parking intégré à plusieurs étages. Le projet Silva utilisera un système CLT préfabriqué développé par Intregal Bois et Sacba.

### 3.5.13. La Ville Multi-Strate, Paris, Jacques Ferrier Architects

La Ville Multi-Strate met en valeur les jardins en toiture qui seraient reliés d'un bâtiment à l'autre par un réseau de passerelle. Les balcons seront également arborés de végétation avec comme objectif de ramener le « vert » dans la ville. Les blocs de dix étages sont conçus par Jacques Ferrier Architects, ils comportent des bureaux, des appartements et des magasins. Le projet réalisé en CLT devrait sortir de terre en 2022.

### 3.5.14. Haut, Amsterdam, Team V

Une fois terminé, HAUT sera le plus haut bâtiment en bois des Pays-Bas à 73 m pour vingt-et-un étages en CLT. Il a été conçu par Team V Architecture, Lingotto, Nicole Maarsen et ARUP pour l'ingénierie structurelle. Avec cinquante-cinq appartements de tailles différentes, l'utilisation du CLT est calculée pour séquestrer 3000 tonnes de CO<sup>2</sup>. Les autres caractéristiques durables comprennent des façades photovoltaïques ainsi que la réutilisation des eaux usées, le projet cible une certification BREEAM. À sa base, un jardin d'hiver urbain est développé pour que les résidents cultivent leur propre nourriture, tout en prolongeant le parc voisin qui comprend également l'Innovation Lab. Le projet serait alors une démonstration mettant en évidence la conjonction de la nutrition, de l'énergie et de la construction.



Oakwood Timber Tower 2, image: © PLPArchitecture



River Beach Tower, image: © Perkin+Will

#### 3.5.15. Provast, Pays-Bas, PLP/Smith and wallwork

Les ingénieurs de PLP Architecture, Smith & Wallwork et le Center for Natural Material Innovation de l'Université de Cambridge ont travaillé sur une deuxième tour de bois, cette fois aux Pays-Bas, une proposition de 130 m de haut et de trente-cinq étages. Le projet de recherche spéculative prévoit une structure en façade sous la forme de colonnes en CLT espacées de 3,6 m. La tour de forme ovale occuperait environ 24 m par 48 m d'espace au sol. Les premières recherches suggèrent que Provast utiliserait 11 500 m<sup>3</sup> de panneaux de bois massif.

#### 3.5.16. River beach tower, Chicago, Perkins & Will

Les concepteurs Perkins et Will se sont associés à des chercheurs de l'Université de Cambridge et des ingénieurs de Thornton Tomasetti pour explorer le concept d'un gratte-ciel en bois massif. Le projet cherche à prouver qu'une tour structurellement saine pouvait être à la fois en bois et suffisamment sûre pour usage résidentiel.





Framework Building, image : © Lever architecture



Toronto Tree Tower, image: © Penda Architecture

### 3.5.17. Framework Building, Portland, Lever Architects

Le projet comprend onze niveaux pour soixante unités abordables. Il met en œuvre des panneaux de CLT pour les planchers pouvant atteindre 40 m de long, reposant sur un système poteaux/poutres en bois lamellé-collé pour la structure verticale. Framework sera construit au moins avec 50 % de bois d'origine locale et vise à développer les entreprises rurales de production de bois. Framework a remporté le prix du concours « Tall Wood » du département américain de l'Agriculture en 2015, le projet devrait être construit d'ici peu.

### 3.5.18. Toronto tree tower, Canada, Penda Architects

Un gratte-ciel de CLT de dix-huit étages et 62 m dans le centre-ville de Toronto. Le projet cherche à devenir un arbre vertical, il met en avant de la végétation sur tous les balcons et autour du projet, il optimisera leur croissance pour ramener la forêt dans la ville au sens littéral.



W350 Tower, image : © Sumitomo forestry, Nikken Sekkei

### 3.5.19. W350 Tower, Tokyo, Sumitomo forestry and Nikken Sekkei

La plus haute tour en bois de l'histoire concerne ce projet pharaonique à Tokyo, Japon. W350 s'élèverait à 350 m, un symbole pour célébrer le 350<sup>e</sup> anniversaire de Sumitomo Forestry qui aura lieu en 2041. Actuellement budgété à 4,8 milliards d'euros, le W350 est une collaboration entre le laboratoire de recherche de Tsukuba et le studio de Tokyo Nikken Sekkei, les premiers communiqués de presse indiquent que la tour devrait contenir 90 % de bois pour laisser les noyaux d'ascenseur en structure mixte acier-bois.







## Bibliographie :

Amram Morales Sabogl, Sabogam. « *Tall Mass Timber Building* ». Virginia Polytechnic Institute, 2017.

Beiser, Vince. « *The world in a grain: The story of sand and how it transformed civilization* ». Riverhead Books, 7 aout2018.

Cornille, Didier. « *Tous les gratte-ciel sont dans la nature* ». Hélium, 2013.

Demesmaecker P., Vannerom A., « *TOTEM le guide: Une méthodologie belge pour évaluer les impacts environnementaux des bâtiments* »

Denoël, Jean-François, Bernard Espion, Amande Hellebois, et Michel Provost. « *Histoire du béton armé : Patrimoine, durabilité et innovations* », s. d.

Développement & conseil. « *L'acier dans la construction au regard du développement durable* ». Pour le compte du Ministère de l'Économie des finances et de l'industrie, s. d.

« *Energie-Climat : 100 % d'énergie renouvelable d'ici 2050* ». WWF, 2011.

Green Michael. « *The case for tall wood buildings* ». 2<sup>e</sup> éd., 2011.

————— « *Why we should build wooden skyscrapers* ». Conférence TED. New York, 2013.





GRID-Geneva, et United Nations Environment programme. « *UNEP 2019, Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources* ». Genève Suisse, s. d.

Hartmann, Gérard. « *L'acier historique* », s. d.

Keeping, Miles, et David Shiers. « *Sustainable building design* ». Wiley-Blackwell, 2017.

Kernéis, Hubert. « *Le Moniteur : Entrepreneurs & Installateurs* ». Le Moniteur, mai 2014.

Kibert, Charle J. « *Sustainable construction: Green Building Design and Delivery, 4th Edition* ». 4<sup>e</sup> éd. Wiley, 2016.

Kolb Joseph, « *Bois, systèmes constructifs* », Presse Polytechnique et Universitaire Romande.

Kottas, Dimitri. « *Le Métal* ». Links, 2012.

Krier Speaks. « *Krier Speaks, Technical & Practrice* », 8 mai 8apr. J.-C.

Les grands ateliers de L'Isle-d'Abeau. « *Les aciers dans la construction* ». France, 2006.

Lopez Moreno Eduardo, Oyeyinka Oyebanji, et Gora Mboup. « *State of the World's Cities: Overview and key findings* ». UN Habitat, 2011 2010.



OECD Publishing. « *OECD (2018), Global Material Resources Outlook to 2060: Economic driver and environmental consequences* ». Paris, s. d.

Oona, Horx-Strathern, Christiane Varga, et Georg Guntschnig. « *The future of Timber Construction a study about changes, trends and technologies of tomorrow* », juin 2017.

Ozelton, E.C., et J.A. Baird. « *Timber designers' manual* ». 3<sup>e</sup> éd. Wiley-Blackwell, 2006.

Puech Jean-Marie. « *Mise en valeur de la forêt française et développement de la filière bois* », 2008.

Ramage Michael, Robert Foster, Simon Smith, Kevin Flanagan, et Ron Bakker. « *Super Tall Timber: design research for the next generation of natural structure* ». The journal of architecture, 2017.

« *Rapport biennal du Centre international de Recherche sur le Cancer* ». France : Organisation mondiale de la Santé, 2009 2008.

Solidarités internationales. « *Baromètre de l'eau, de l'hygiène et de l'assainissement* », mars 2019.

Stungo, Naomi. « *The new wood architecture* ». Laurence King Publishing, 2001.

Sudres, Mathieu. « *Caractères des structures en bois dans l'histoire de l'architecture* ». École Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse, 2018.



Sullivan, Louis Henry. « Pour un art du gratte-ciel ». Allia, s. d.

Sumitomo, Forestry. « *Changing Cities into Forests: Creating Environmentally-Friendly and Timber-Utilizing Citie* », 8 février 2018.

Texier Annick, Philippe Dillmann, Maxime L'Héritier, Arnaud Timbert, et Jean-Marie Welter. « *Le métal dans l'architecture* ». Éditions du Patrimoine., 2007.

Trégouët, Bruno. « *Commissariat général au développement durable ; chiffres & Statistiques n° 164* », octobre 2010.

T.S. Ashton, « *Iron and Steel in the industrial revolution* » Manchester University Press, 1924

Wells, Matthew. « *Designing in Cross-Laminated Timber: Simplicity and Second-order Effects* ». *Techniker*, s. d., 64.



## Sitographie :

Apeal statistiques : <https://www.apeal.org/statistics/>

Allix Grégoire, « *Il existe très exactement 1478 gratte-ciel de plus de 200 m dans le monde* » : [https://www.lemonde.fr/economie/article/2019/01/14/la-frenesie-de-gratte-ciel-ne-faiblit-pas-sur-la-planete\\_5408812\\_3234.html](https://www.lemonde.fr/economie/article/2019/01/14/la-frenesie-de-gratte-ciel-ne-faiblit-pas-sur-la-planete_5408812_3234.html)

BeSteel, « *Résistance au feu de l'ossature en acier* » : <https://be-steel.eu/fr/wikisteel/resistance-au-feu/>

Carbone4, « *Le CLT : Un système de construction innovante permettant de réduire l'empreinte carbone de la construction* » : <http://www.carbone4.com/le-clt-un-systeme-de-construction-innovant-permettant-de-reduire-lempreinte-carbone-de-la-construction/>

Carigliano Sam, « *Acier, Bois et béton : Une comparaison* » : <https://skyciv.com/fr/technical/commonly-used-materials-in-structural-engineering/>

Chauvot Myriam, « *Les déchets de bois ne trouvent pas preneurs* » : <https://www.lesechos.fr/2017/10/les-dechets-de-bois-ne-trouvent-pas-preneurs-184431>

Commissariat général du développement durable, « *Observation et statistiques n° 164, octobre 2010* » : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-10/Chiffres%20et%20stats%20164%202008%20Déchets%20déblais%20BTP.pdf>





Courrier international, « *Les îles englouties de l'Indonésie* » : <https://www.courrierinternational.com/article/2003/11/27/les-iles-englouties-de-l-indonesie>

CTBUH, « *Tall buildings in Numbers: Tallest 20 in 2020 - Then and Now* » : <https://www.skyscrapercenter.com/year-in-review/2019>

Daunay Julie, Dugast César, « *Le bâtiment, un secteur en première ligne des objectifs de neutralité carbone de la France en 2050* » : <http://www.carbone4.com/article-batiment-snbc/>

De Cuyper K., « *Gestion durable de l'eau* » : <https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact13&art=200&lang=fr>

Didelon Clarisse, « *Une course vers le ciel. Mondialisation et diffusion spatio-temporelle des gratte-ciel* » : <https://mappemonde-archive.mgm.fr/num27/articles/art10301.pdf>

Doaré Gwenola, « *Dossier : Le bois lamellé-croisé CLT* » : <http://www.habitatnaturel.fr/dossiers/11-Le-bois-lamellecroise--CLT/28-Nurholz-panneau-massif-sans-colle/>

Ecoconso, « *L'énergie grise des matériaux de construction n° 155* » : <https://www.ecoconso.be/fr/L-energie-grise-des-materiaux-de>

Febelcem, « *Présentation du secteur* » : <https://www.febelcem.be/fr/infos-economiques/presentation-du-secteur/>



Fourthdoor, « *Overview of CLT tall towers and larger scale housing, office and related projects as of early 2018* » : [http://www.fourthdoor.co.uk/further/further\\_3/timber\\_towers.php](http://www.fourthdoor.co.uk/further/further_3/timber_towers.php)

France 24, « *L'Allemagne ferme sa dernière mine de charbon, fin d'une époque dans la Ruhr* » : <https://www.france24.com/fr/20181221-europe-allemande-ruhr-industrie-fermeture-derniere-mine-charbon-houille>

Herart Pascal, « *Pénurie de sable, un enjeu planétaire environnemental et économique* » : <https://information.tv5monde.com/info/penurie-de-sable-un-enjeu-planetaire-environnemental-et-economique-185813>

Hofmann, Alan. « *Moholt 5050 Studentenwohnheim in Trondheim 5x8 Geschosse international umgesetzt* ». Internationales Holzbau-Forum IHF 2016 : [http://www.forum-holzbau.com/pdf/36\\_IHF\\_2016\\_Hofman.pdf](http://www.forum-holzbau.com/pdf/36_IHF_2016_Hofman.pdf).

INRS, « *Journée sur le formaldéhyde dans les industries du bois* » : <http://www.inrs.fr/footer/actes-evenements/journee-formaldehyde-industrie-bois-2014.html>

Ineris, « *Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôts (DRA-03)* » : <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/10.pdf>

Lehne J., Preston F., « *Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete* » : <https://reader.chathamhouse.org/making-concrete-change-innovation-low-carbon-cement-and-concrete#>



Le Moniteur, « *Réhabilitation et cycle de vie : l'acier indéfiniment* » : <https://www.lemoniteur.fr/article/rehabilitation-et-cycle-de-vie-l-acier-indefinement.1238619>

Lycée Pierre-Adrien, « *Burj Khalifa : La plus haute tour du monde, et de loin...* » : <http://lycee-pierreadrienparis.org/spip.php?article373>

Moraillon Simon, « *Le charbon européen c'est fini, l'acier évitera-t-il le même destin ?* » : <https://www.letemps.ch/economie/charbon-europeen-cest-fini-lacier-eviteratil-meme-destin>

Nunes Philippe, « *Béton bas carbone : de quoi parle-t-on ?* » : <https://www.construction21.org/france/articles/fr/beton-bas-carbone-de-quoi-parle-t-on.html>

Observatoire de la côte Aquitaine « *Le sable, une ressource essentielle en voie de disparition* » : <http://theconversation.com/le-sable-une-ressource-essentielle-en-voie-de-disparition-122094>

ONU, « *Hausse de la production mondiale de bois grâce aux marchés du logement et de l'énergie verte* » : <http://www.fao.org/news/story/fr/item/459955/icode/>

Planétoscope, « *Production mondiale de béton* » : <https://www.planetoscope.com/matieres-premieres/1374-production-mondiale-de-beton.html>

PLP Architecture, « *Oakwood Timber Tower London, UK* » : <http://www.plparchitecture.com/oakwood-timber-tower.html>



Service public de Wallonie, « *Les carrières en Wallonie, un monde à redécouvrir* » : <http://environnement.wallonie.be/publi/dppgss/carrieres.pdf>

Service public de Wallonie, « *La sidérurgie : la production et la transformation de l'acier* » : <http://environnement.wallonie.be/enviroentreprises/pages/etatenviindustrie.asp?doc=syn-met-tec>

Souchu Philippe, « *Durabilité et recyclage du béton ou le cycle bouclé de la vie du béton* » : <http://doc.lerm.fr/durabilite-et-recyclabilite-du-beton-ou-le-cycle-boucle-de-la-vie-du-beton/>

Souchu Philippe, « *La durabilité à très long terme des bétons : entre utopie et nécessité...* » : <http://doc.lerm.fr/la-durabilite-a-tres-long-terme-des-betons-entre-utopie-et-necessite/>

Statista, « *Production d'acier et consommation de ferraille de ce matériau au monde 2005-2017* » : <https://fr.statista.com/statistiques/570803/production-mondiale-d-acier-et-consommation-de-ferraille-acier/>

Totem, <https://www.totem-building.be>

UN Environment, « *Rising demand for sand calls for resource governance* » : <https://www.unenvironment.org/news-and-stories/press-release/rising-demand-sand-calls-resource-governance>

Vinci Léonard, « *Le bois prend de l'altitude* » : <https://leonard.vinci.com/le-bois-prend-de-laltitude/>

Woodeum, « *Innovation bois massif* » : <http://www.woodeum.com/faq/>

World Steel Association, « *Raw materials, steel recycling* » : <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/raw-materials.html>



