



HAL
open science

Comparaison des systèmes de contreventement d'un IGH en bois

Edgar Manin

► **To cite this version:**

Edgar Manin. Comparaison des systèmes de contreventement d'un IGH en bois. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2024. dumas-04938870

HAL Id: dumas-04938870

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04938870v1>

Submitted on 10 Feb 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright



L'école de l'aménagement durable des territoires

ENTPE



Travail de fin d'études

Échange académique à l'École Nationale des Travaux Publics de L'État,
pour le diplôme d'ingénieur de l'École des Mines de Saint-Étienne

Année 2023-2024

Voie d'approfondissement :
Bâtiment

Soutenu le 02/09/2024

Devant le jury composé de :

- Président du Jury : Antonin Fabbri
- Maître de TFE : Paul Barrère
- Expert : Sébastien Bouillon

Par

Edgar Manin

**Comparaison des systèmes de contreventement d'un IGH en
bois**

**Organisme d'accueil
Setec Bâtiment**



**setec
bâtiment**

Notice analytique

AUTEUR			
Nom	Manin		
Prénom	Edgar		
ORGANISME D'ACCUEIL			
Nom de l'organisme et Localité	Setec Bâtiment - 42-52 Quai de la Rapée 75012 Paris		
Nom du Tuteur	Barrère Paul		
ANALYSE DU TFE			
Titre (français)	Comparaison des systèmes de contreventement d'un IGH en bois		
Titre (anglais)	Comparison of bracing Systems for a Wooden High-Rise Building		
Résumé (français)	<p>Dans le cadre du changement climatique, le stage s'est orienté vers l'adaptation tout bois d'un immeuble en béton existant de 53 mètres, dont l'usage est mixte (bureaux et logements). L'objectif était de comparer différents systèmes de contreventement du bâtiment tout bois. En utilisant le logiciel Robot Structural Analysis, j'ai construit quatre modèles 3D fonctionnels pour évaluer l'efficacité des solutions proposées. Les résultats montrent que le contreventement par diagonales de façade est le plus efficace et économique, tandis que le CLT est le moins performant. Les perspectives incluent l'optimisation de l'espace inter-étage et la prise en compte des coûts élevés du bois. Ce travail a renforcé mes compétences en ingénierie et m'a permis de mieux comprendre les structures bois.</p>		
Résumé (anglais)	<p>In the context of climate change, the internship focused on adapting an existing 53-meter concrete building, with mixed use (offices and residential), to a fully wooden structure. The objective was to compare different bracing systems for the all-wood building. Using Robot Structural Analysis software, I constructed four functional 3D models to evaluate the effectiveness of the proposed solutions. The results show that facade diagonal bracing is the most efficient and cost-effective, while CLT is the least performing. Future work includes optimizing the inter-floor space and addressing the high costs of wood. This project enhanced my engineering skills and deepened my understanding of wooden structures.</p>		
Mots-clés (français, 5 maxi)	Structure bois, Contreventement, Lamellé-collé, CLT, IGH		
Mots-clés (anglais, 5 maxi)	Timber structure, Bracing, Glulam, CLT, High-Rise Building		
Termes géographiques (français)	France		
COLLATION			
	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.
	68	7	24

Déclaration de travail personnel

Je déclare que ce rapport constitue l'aboutissement d'un travail personnel et ne peut être suspecté de plagiat.

Le travail présenté distingue explicitement ce que j'ai produit de ce que j'ai emprunté à d'autres. A ce titre, les citations sont clairement identifiables et les sources (écrits, images) qui ont alimenté ma réflexion sont référencées.

Sommaire

Notice analytique.....	1
Déclaration de travail personnel.....	2
Sommaire.....	3
Liste des illustrations	5
Remerciements.....	7
Introduction.....	8
1. Présentation de la société	9
1.1 Le groupe Setec.....	9
1.2 Setec Bâtiment	10
2. Les possibilités d'adaptation tout bois du projet M1 Lyon	11
2.1 Présentation du projet M1 Lyon.....	11
2.1.1 Le bâtiment existant.....	11
2.1.2 Cadre de l'étude	11
2.1.1 Les objectifs de l'adaptation tout bois	12
2.2 Le besoin en constructions respectueuses de l'environnement.....	13
2.3 Les possibilités actuelles offertes par le bois d'ingénierie	14
2.3.1 Rappels sur le matériau bois	14
2.3.2 Le bois lamellé collé et le bois lamellé croisé au cœur des structures bois actuelles	18
2.4 Etat de l'art sur les constructions bois de grande hauteur	20
2.4.1 Anciennes réalisations.....	20
2.4.2 Constructions récentes de d'immeubles de grande hauteur en bois	21
3. Etude des contreventements en bois appliqués à M1 Lyon.....	29
3.1 Rappels sur le bâtiment en béton.....	29
3.2 Prédimensionnement commun aux différents modèles en bois	30
3.2.1 Hypothèses de prédimensionnement	30
3.2.2 Solution retenue pour les planchers	32
3.2.3 Hauteur inter-étage et pré dimensionnement des poteaux.....	35
3.3 Choix des solutions de contreventements.....	37
3.3.1 Solution 1 : contreventement par voiles en CLT.....	37
3.3.2 Solution 2 : contreventement par diagonales en façade	38
3.3.3 Solution 3 : contreventement par résille extérieure	39
3.4 Etude des différentes solutions.....	41
3.4.1 Modélisation du bâtiment réel en béton	41
3.4.2 Modélisation de la solution 1 : contreventement par voiles en CLT	43

3.4.3	Modélisation de la solution 2 : contreventement par diagonales en façade.....	46
3.4.4	Modélisation de la solution 3 : contreventement par résille extérieure.....	50
4.	Comparaison des bâtiments	53
4.1	Comparaison des modèles	53
4.1.1	Hauteur finale des bâtiments.....	53
4.1.2	Masse totale des bâtiment.....	53
4.1.3	Efficacité du contreventement	54
4.1.4	Impact sur l'environnement.....	55
4.1.1	Coût des bâtiments.....	57
4.2	Pistes de développement	59
4.2.1	Réponse au séisme.....	59
4.2.2	Optimisation des sections des porteurs verticaux avec la hauteur.....	59
4.2.3	Collaboration avec l'architecte pour un tramage plus simple.....	59
5.	Conclusion.....	60
	Références bibliographiques.....	61
	Annexes.....	62

Liste des illustrations

Figure 1 : Réalisations majeures du groupe Setec. (source : Setec)	9
Figure 2 : Organigramme de Setec Bâtiment. (source : auteur).....	10
Figure 3 : <i>M1 Lyon</i> , vue d'ensemble à gauche, bloc logements à droite. (source: https://www.lyon-partdieu.com/)	11
Figure 4 : vue en plan et en élévation de la superstructure du bâtiment étudié. (source: auteur)	12
Figure 5 : Emissions et absorptions de CO ₂ eq visées par la SNBC de 1990 à 2050. (source: MTES).....	13
Figure 6 : Evolution des seuils d'émissions RE2020 pour la structure d'un bâtiment. (source: auteur).....	14
Figure 7 : Poutre en bois massif supportant des poutres acier ayant plastifié durant un feu à San Francisco (1906).....	17
Figure 8 : poutres courbes en bois lamellé collé dans la Fondation Louis Vuitton (2012). (source : auteur)	18
Figure 9 : BLC horizontal à gauche, BLC panaché à droite (sources : Boise Cascade, Swedish Wood).....	19
Figure 10 : exemple de panneau de CLT 5 plis. (source: masstimbervservices.com).....	19
Figure 11 : Pagode en bois massif du temple d'Horyu-Ji, Japon (711 ap. J-C). (source : Wikipédia)	20
Figure 12 : Fermes en lamellé d'un hall à l'exposition universelle de Bruxelles (1910). (source : VALENTINE).....	20
Figure 13 : bâtiment de 31 m en bois datant de 1918 à Eslov, Suède. (source : Håkan Dahlström).....	21
Figure 14 : Contreventement par voiles CLT dans <i>Origine</i> , Québec (2017). (sources :Stéphane Groleau, Nordic Structures)	22
Figure 15 : Contreventement par diagonales en façade dans Mjøstårnet, Norvège, (2019). (source : Moelven Limtre AS).....	23
Figure 16 : complexe de plancher Trä8 d'épaisseur optimale. Source: Moelven	24
Figure 17 : tour Rocket&Tigerli à Winterthur en Suisse (2027) (source : Schmidt Hammer Lassen).....	25
Figure 18 : Plancher mixte bois - béton utilisé dans la tour Rocket&Tigerli. (source: Implenia)	26
Figure 19 : <i>River Beech Tower</i> à <i>Chicago, USA</i> . (source: Perkins&Will).....	26
Figure 20 : Système de contreventement de la River Beech Tower. (source: Perkins&Will).....	27
Figure 21 : résille de façade dans la River Beech Tower. (source : CTBUH).....	27
Figure 22 : Plans d'étages courants de bureau à gauche et de logement à droite. (Source: Setec).....	29
Figure 23: coupes transversales des planchers CLT de la partie logement (en haut) et de la partie bureaux (en bas). (source: auteur).....	32
Figure 24 : minute d'un étage courant de logement, éléments légendés en cm. (source : auteur).....	33
Figure 25 : Minute d'un étage courant de bureaux et sections des éléments de structure associés. (source: auteur)	35
Figure 26 : Comparaison des hauteurs d'inter-étage entre le bâtiment en béton et le bâtiment en bois. (source: auteur)	36
Figure 27 : Vue en plan d'un étage courant de bureaux de la solution béton (gauche) et CLT (droite) (source : auteur)	37
Figure 28 : vue en plan des emplacements des poutres diagonales de façade sur un étage courant de bureau. (source : auteur).....	38
Figure 29 : choix des trames du contreventement par diagonales en façade n'impactant pas le passage des voitures. (source : auteur).....	39
Figure 30 : emprise de la résille de façade sur un étage courant de bureau. (source: auteur).....	39
Figure 31 : Décalage des trames de poutres d'un étage à l'autre. (source: auteur)	40
Figure 32 : élargissement ou suppression de la résille (en bleu) au R+0. (source: auteur)	40
Figure 33 : Résille de façade (en bleu) laissant entrer la lumière naturelle. (source: auteur).....	41
Figure 34 : Vue d'ensemble du modèle béton. (source: auteur)	42
Figure 35 : vues en plan respectives d'étage courant de logement (gauche) et de bureau (droite) dans le modèle béton. (source: auteur).....	42

Figure 36 : Déplacement latéral du bâtiment en béton (cm) sous une charge de vent ELS. (source : auteur)	43
Figure 37 : Vue d'ensemble de la solution CLT. (source: auteur)	44
Figure 38 : vues en plan respectives d'étage courant de logement (gauche) et de bureau (droite) dans le modèle CLT. (source : auteur)	44
Figure 39 : Contraintes normales de membrane dans les voiles de refend sous un cas simple de vent ($1 \cdot w$). (source : auteur)	45
Figure 40 : Déplacement latéral (en cm) sous une charge de vent ELS selon $Y+$. (source : auteur)	46
Figure 41 : Vue d'ensemble du modèle à diagonales en façade. (source: auteur)	47
Figure 42 : vues en plan respectives d'étage courant de logement (gauche) et de bureau (droite) dans le modèle à diagonales de contreventement. (source : auteur)	47
Figure 43 : Efforts axiaux maximaux (en kN) dans les treillis de contreventement sous $1 \cdot W$, selon $Y+$. source : auteur	48
Figure 44 : déplacement latéral maximal (en cm) sous une charge de vent ELS selon $Y+$. (source : auteur)	49
Figure 45 : Vue d'ensemble du modèle de résille en façade. (source: auteur)	50
Figure 46 : vues en plan respectives d'étage courant de logement (en haut) et de bureau (en bas) dans le modèle résille (source : auteur)	51
Figure 47 : Efforts axiaux maximaux (en kN) dans la résille sous $1 \cdot W$, selon $Y+$. source : auteur	51
Figure 48 : déplacement latéral maximal (en cm) de la résille sous une charge de vent ELS selon $Y+$. (source : auteur)	52
Figure 49 : hauteurs finales des bâtiments présentées dans leur ordre d'apparition. (source : auteur.)	53
Figure 50 : répartition des masses de structure (G), des masses liées au complexe acoustique / protection incendie (G') et des cloisons / gaines (Q). Source : auteur.	54
Figure 51 : Comparaison des déplacements rapportés à la proportion de contreventement dans chaque bâtiment. Source: auteur	54
Figure 52 : bilans carbone des différentes solutions pour 1 m^2 d'étage de logement. (source : auteur)	55
Figure 53 : bilans carbone des différentes solutions pour 1 m^2 d'étage de bureaux. (source : auteur)	55
Figure 54 : Volumes de bois nécessaires à la construction du bâtiment, par bloc. Source: auteur	56
Figure 55 : coût d'un étage type par solution. (source: auteur)	58
Figure 56 : répartition des coûts pour 1 m^2 de SHOB d'étage courant de bureau. (source: auteur)	58
Figure 58 : mur mitoyen en CLT 9 plis, résistant au feu 2 heures, <i>Origine</i> , Canada (source : cecobois)	62
Figure 59 : Continuité des poteaux d'un étage à l'autre dans <i>Origine</i> . (source: Nordic structures)	62
Figure 60 : Vérification du plancher CLT de la partie logement avec CLTdesigner. (source : auteur)	64
Figure 61 : Vérifications à l'ELS vibratoire d'une poutre de logement pour 8 Hz (en haut) et 6 Hz (en bas). (source: auteur.)	65
Figure 62 : vérification ELU d'un poteau supportant une descente de charges de 15 étages. (source: auteur)	66
Figure 63 : Impact sur les circulations au niveau R+0 de la solution 1	66
Figure 64 : Vérification ELU d'une poutre diagonale de contreventement classe de service 3. (source: auteur)	68

Remerciements

Je souhaiterais remercier dans un premier temps l'équipe de Setec Bâtiment pour leur intégration que j'ai reçue lors de ce stage, en particulier M. Paul Barrère pour le suivi et l'apprentissage continu qu'il m'a donné. J'aimerais également remercier M. Adnane Berrazeg pour m'avoir transmis sa passion pour la structure, mais aussi toutes les personnes qui grâce à leur expertise et leur bienveillance m'ont permis d'avancer sur le sujet complexe du bois dans la construction.

Un grand merci également aux membres du jury pour m'accorder leur temps et leur expertise dans l'évaluation de ce travail de fin d'études.

Enfin je tiens à exprimer ma gratitude envers mes amis et ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours. Une pensée particulière pour mon père qui aurait été fier de me voir achever mes études d'ingénierie et entrer dans la vie active.

Introduction

Face au dérèglement climatique, la France a adopté une Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) pour réduire ses émissions de gaz à effet de serre. Concernant le secteur du bâtiment, l'objectif est d'émettre au maximum 5 MtCO₂eq en 2050 [1]. Or le marché de la construction neuve n'est pas près de s'arrêter car en 2020, le quart du parc de logements de la France de 2050 n'était pas construit. Deux dynamiques qui semblent contraires vont pourtant devoir s'articuler, en construisant neuf tout en respectant les seuils d'émissions imposés par la réglementation environnementale 2020 (RE2020) France, entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2022.

Le bois est un matériau de structure biosourcé qui contribue à réduire l'empreinte carbone d'un projet. En effet son analyse de cycle de vie (ACV) dynamique lui confère une émission finale équivalente en CO₂ négative. Autrement dit, tout au long de sa vie le bois de construction absorbe plus de CO₂ qu'il n'en émet. Le terme dynamique désigne un calcul carbone favorisant les phases du cycle de vie proche, plus que celles dans 100 ans, car d'ici là les paradigmes auront évolué. Le bois est donc de choix dans le respect de la RE2020 qui se base justement sur ce type d'ACV. De plus, le béton armé et l'acier utilisés majoritairement depuis le 20^{ème} siècle sont bien plus émetteurs de gaz à effets de serre que le bois à quantités égales. A titre indicatif les émissions équivalentes respectives 1m³ de bois et de béton sont -270 et +200 kg eq. CO₂.

L'idée de départ du sujet de stage au sein du département structure de Setec Bâtiment était de s'intéresser à l'emploi du bois pour un bâtiment existant dont le dernier niveau habitable est de 28 à 55m. Les charges latérales liées au vent sont importantes, d'où la nécessité de trouver un contreventement bois satisfaisant pour le projet choisi. Comme il s'agissait de remplacer uniquement la superstructure, nous n'étudierons pas l'infrastructure dans ce TFE. Il est à noter que cette étude s'affranchit de la doctrine pompier de Paris publiée le 20 juillet 2021 [2] qui contraint fortement l'usage du bois dans les bâtiments de grande hauteur.

Dans le cadre de ce TFE, j'ai voulu étudier l'impact du choix de contreventement dans un bâtiment entièrement en bois sur les sections de ses éléments, sa rigidité, son poids et la géométrie de ses façades et comparer mes résultats à ceux du bâtiment en béton d'origine.

Ma démarche a d'abord été de consulter les solutions existantes et les projets futurs sur les constructions de grande hauteur en bois. Puis je me suis interrogé sur la façon d'appliquer ces techniques du bois sur le bâtiment dimensionné en béton en m'appuyant sur ses plans architecte et structure. J'ai alors produit des minutes, ce qui consiste à dessiner les trames structurelles de chaque solution sur les plans puis effectuer un calcul statique pour pré-dimensionner les éléments porteurs sous charges verticales (poids propre, exploitation). L'évaluation du contreventement s'est faite ensuite en construisant quatre modèles 3D différents sur le logiciel Robot Structural Analysis (RSA) développé par Autodesk. Ceux-ci m'ont permis de dimensionner les éléments au vent et aux actions verticales. J'ai finalement pu comparer le comportement mécanique et les avantages/ inconvénients des modèles.

En premier lieu nous présenterons un état de l'art des constructions bois actuelles et à venir ainsi que les exigences posées par le bâtiment réel sur lequel s'effectue l'étude. Puis, nous étudierons les différents contreventements adoptés pour chaque modèle. Enfin nous analyserons leurs limites écologiques, économiques et sécuritaires ainsi que leurs pistes d'amélioration.

1. Présentation de la société

1.1 Le groupe Setec

La Société d'Etudes Techniques et Economiques (Setec) fut créée en 1957 par Henri Grimond et Guy Saias. En 2022, cette entreprise d'ingénierie pluridisciplinaire rassemblait 3500 collaborateurs dans le monde (2750 en France, 750 à l'international), pour un chiffre d'affaires de 434 millions d'euros. Le groupe est entièrement détenu par les ingénieurs de ses 40 sociétés, dont Setec TPI (génie civil), Setec ITS (ouvrages de mobilité) et Setec Bâtiment.

Son domaine de compétences est varié. En transport et en infrastructures elle a assuré notamment la maîtrise d'œuvre du tunnel sous la Manche (1987 – 1993), du viaduc de Millau (2000-2005) et des lignes 14 et 15 du Grand Paris (projet actuel, avec 15km d'extension et 20km de double voies). Dans l'énergie et l'industrie, le groupe Setec a également participé aux projets du HL-LHC du CERN, du barrage d'Assiout sur le Nil, de la centrale nucléaire de Flamanville.

Ses réalisations dans les domaines du bâtiment et du développement urbain sont des projets complexes, comme la fondation Louis Vuitton, le Louvre Abu Dhabi, ou le tribunal de grande instance de Paris.



Figure 1 : Réalisations majeures du groupe Setec. (source : Setec)

Dans l'ordre d'apparition : Tunnel sous la manche (2^e au Grand Prix National de l'ingénierie, 2010), Viaduc de Millau (Prix Européen du design en acier ECCS, 2005), Fondation Louis Vuitton (Grand Prix National de l'ingénierie, 2012), Tribunal de Grande Instance (Grand Prix national de l'ingénierie, 2017). (source : Setec).

1.2 Setec Bâtiment

Setec Bâtiment est la société du groupe spécialisée dans la réalisation de bâtiments. Ses activités se font principalement en maîtrise d'œuvre, maîtrise d'œuvre (MOE) d'exécution et assistance à la maîtrise d'ouvrage (AMO) grâce à ses 270 collaborateurs présents sur 6 sites en France, notamment à Paris, Toulouse, Lyon etc.

L'entreprise assure la maîtrise d'œuvre des premières phases de conception jusqu'au lancement des études d'exécution. Ensuite, elle effectue le suivi des chantiers et son rôle de maîtrise d'œuvre d'exécution à travers des missions de DET (Direction de l'Exécution des contrats de Travaux) et la délivrance de visas.

Lors de mon stage j'ai été accueilli dans le département structure qui fait partie des départements techniques de Setec Bâtiment.

L'organigramme de l'entreprise permet de visualiser les différents services qu'elle regroupe.

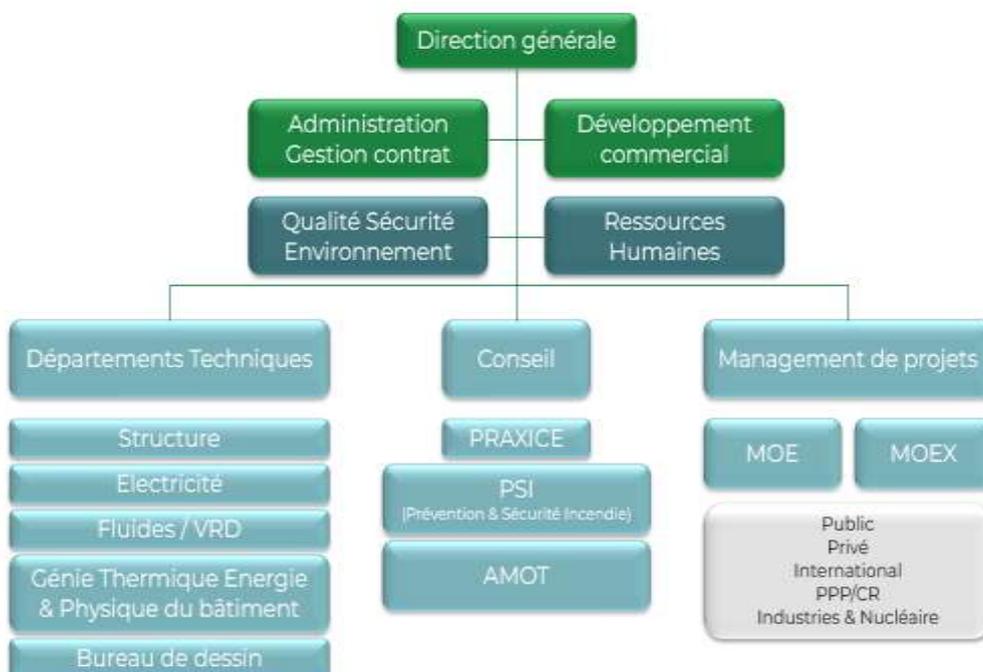


Figure 2 : Organigramme de Setec Bâtiment. (source : auteur)

2. Les possibilités d'adaptation tout bois du projet M1 Lyon

2.1 Présentation du projet M1 Lyon

2.1.1 Le bâtiment existant

L'étude que j'ai menée a porté sur M1 Lyon, un bâtiment à usage mixte en cours de construction dans le quartier d'affaires de la Part Dieu à Lyon, voir Figure 3 ci-dessous. Le projet est porté par le promoteur DCB International, pour une superficie totale de 31500 m². Le groupe d'architectes KPF / Soho Atlas a conçu ce bâtiment de 53 mètres par rapport au niveau de la rue Garibaldi en contrebas. Les travaux ont commencé en 2022 pour une livraison prévue en 2026.



Figure 3 : M1 Lyon, vue d'ensemble à gauche, bloc logements à droite.
(source: <https://www.lyon-partdieu.com/>)

Posé sur un socle de commerces, une première partie de 7 étage est destinée à des bureaux (dernier étage à 28m). Une seconde partie de 7 étages sert d'immeuble d'habitations (plancher bas du dernier étage habitable à 49m). Sa géométrie est complexe puisqu'il comporte un atrium au centre contenant les ascenseurs de la partie bureaux et une irrégularité en élévation liée au bloc d'habitations lui-même en forme de « L ». De plus, sa structure aussi est irrégulière puisqu'elle est faite de poteaux poutres jusqu'au dernier niveau de bureaux et est ensuite faite de voiles porteurs pour la partie d'habitations. Ceux-ci sont supportés par des poutres de reprise à l'étage de transition entre les deux blocs. L'ensemble est en béton armé C45.

L'antenne lyonnaise Setec gl ingénierie a réalisé les études de chauffage, ventilation et climatisation (CVC). Le département structure de Setec Bâtiment a réalisé les études de structure du bâtiment en béton armé, de la verrière de l'atrium et des cages d'ascenseur en structure métallique du même lieu. Le service a également étudié la réponse au séisme qui a été dimensionnante. En effet, le site est classé en zone de sismicité faible (zone 2). De plus, les études géotechniques ont montré l'existence d'une poussée ascendante du sol sur les fondations. Ceci est dû à la hauteur de la nappe qui se situe au-dessus de tous les niveaux enterrés lorsqu'elle est en hautes eaux.

2.1.2 Cadre de l'étude

Au vu de la complexité du projet, plusieurs choix posant des limites d'étude ont été faits afin de pouvoir se concentrer sur l'étude du contreventement qui constitue à elle seule un travail complexe.

Bâtiment étudié

Le premier choix porte sur l'étendue de la structure étudiée. Le premier choix a été de ne pas étudier l'infrastructure inondable qui subit une poussée. Dans ce TFE on considèrera que le sol est rigide et stabilisé. Une piste de développement éventuelle pourrait étudier l'impact de cette poussée sur la superstructure bois qui est plus légère que celle en béton. L'édifice étant situé en zone sismique, ses grandes dimensions et son irrégularité en plan font qu'un joint sépare l'édifice en deux blocs indépendants. Un choix a alors été fait de n'étudier que la superstructure d'un des deux blocs. La Figure 4 ci-dessous montre la partie qui nous intéresse à gauche de la séparation tracée en rouge. En plan le bâtiment étudié a une forme de U, comme le montre la partie colorée en beige. Sur la même figure, le périmètre du bloc de logement situé au-dessus du bloc de bureaux est représenté par le contour bleu en forme de « L ».

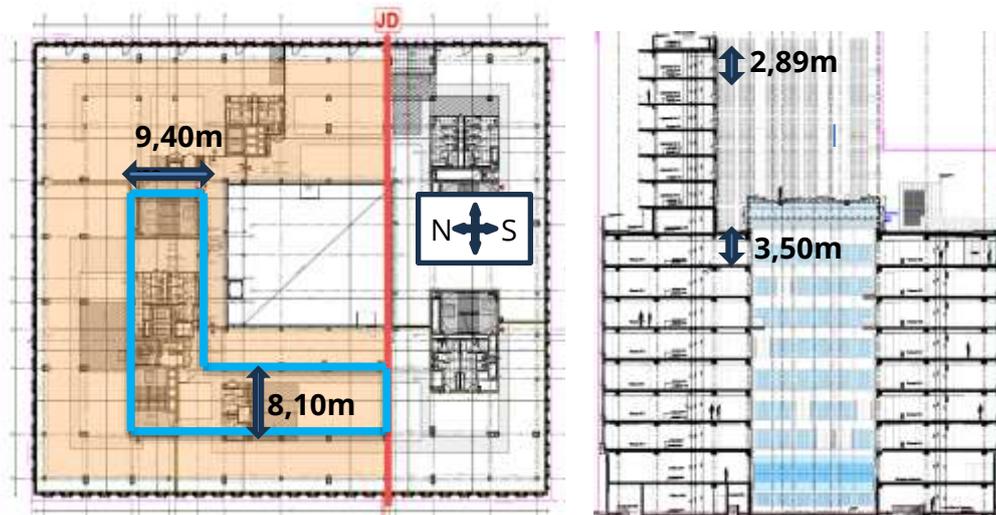


Figure 4 : vue en plan et en élévation de la superstructure du bâtiment étudié. (source: auteur)

Séisme et comportement au feu

La réponse au séisme et le comportement au feu pourront aussi faire l'objet d'un approfondissement, mais ne feront pas l'objet de cette étude. Les seules charges latérales considérées ici sont donc celles liées au vent.

2.1.1 Les objectifs de l'adaptation tout bois

Le but de l'étude est de concevoir le même bâtiment en remplaçant le béton par du bois. Un des défis est de conserver les portées existantes de poteaux-poutre dans les parties logement et de bureau. On voit sur la figure précédente qu'elles sont au maximum de 9,40m.

On pourra alors comparer les adaptations bois et la version initiale en béton à trames égales. Néanmoins, comme nous le verrons plus tard la hauteur finale du bâtiment sera changée car nous souhaitons également conserver la même hauteur sous plafond. Pour le bâtiment en béton, celle-ci est de 2,89m pour les logements et de 3,50m pour les bureaux.

La suite de cette partie est consacrée à un rappel des enjeux amenant à employer le bois dans la construction neuve ainsi que d'un état de l'art des constructions en bois de grande hauteur de la dernière décennie.

2.2 Le besoin en constructions respectueuses de l'environnement

Le dernier rapport de l'IPCC (Intergouvernemental Panel on Climate Change) [3] continue d'alerter sur le changement climatique. Une des cause de ce changement est l'émission de gaz à effet de serre liée à l'activité humaine. Les températures globales ont augmenté de 1,1°C entre 1850-1900 et 2011-2020. Les projections pour 2021-2100 prévoient une augmentation de 1,0°C à 1,8°C dans un scénario de faibles émissions et de 3,3°C à 5,7°C dans un scénario de fortes émissions.

Cette hausse des températures impactera 3,3 à 3,6 milliards de personnes qui vivent en insécurité alimentaire et hydrique, surtout en Afrique et en Asie. Cela entrave les objectifs de développement durable et peut causer de nombreuses pertes humaines. L'Homme n'est pas le seul concerné puisque des pertes parfois irréversibles dans les écosystèmes terrestres ou marins et les systèmes cryosphériques sont aussi à prévoir.

En conséquence la France vise la neutralité carbone d'ici 2050, conformément à la loi Energie – Climat, en suivant la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) dont les objectifs apparaissent sur la Figure 5 ci-dessous.

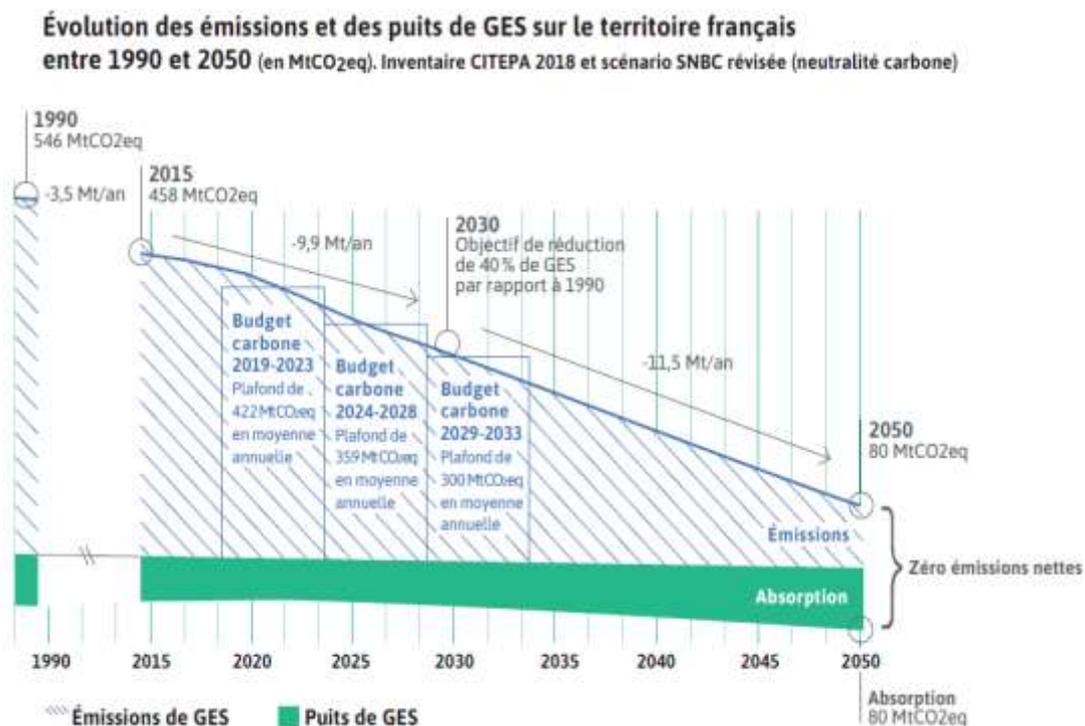


Figure 5 : Emissions et absorptions de CO₂eq visées par la SNBC de 1990 à 2050. (source: MTES)

Le secteur du bâtiment représente environ 25% des émissions de gaz à effet de serre au niveau national, dont 18% lié à l'exploitation des bâtiments selon un dossier de concertation du gouvernement de 2023 [4].

La réglementation environnementale 2020 (RE2020) établie par le ministère de la transition écologique a pour vocation de réduire les émissions de ce secteur. Elle évalue les performances environnementales des bâtiment à partir d'indicateurs, dont $I_{c_{\text{construction}}}$. Celui-ci prend en compte les émissions liées à la phase chantier ($I_{c_{\text{chantier}}}$) et les émissions liées aux composants du bâtiment ($I_{c_{\text{composants}}}$, dont le gros œuvre et les corps d'état). On peut consulter les seuils d'émissions réglementaires par typologie de bâtiment dans le Guide RE2020 du Cerema

méditerranée [5]. La structure d'un immeuble tertiaire représenterait 30% du $I_{c_{\text{construction}}}$ selon le manifeste bas carbone Setec [6].

On peut voir l'impact de la réglementation sur les émissions de construction des bâtiment de 2022 à 2031 (Figure 6) :

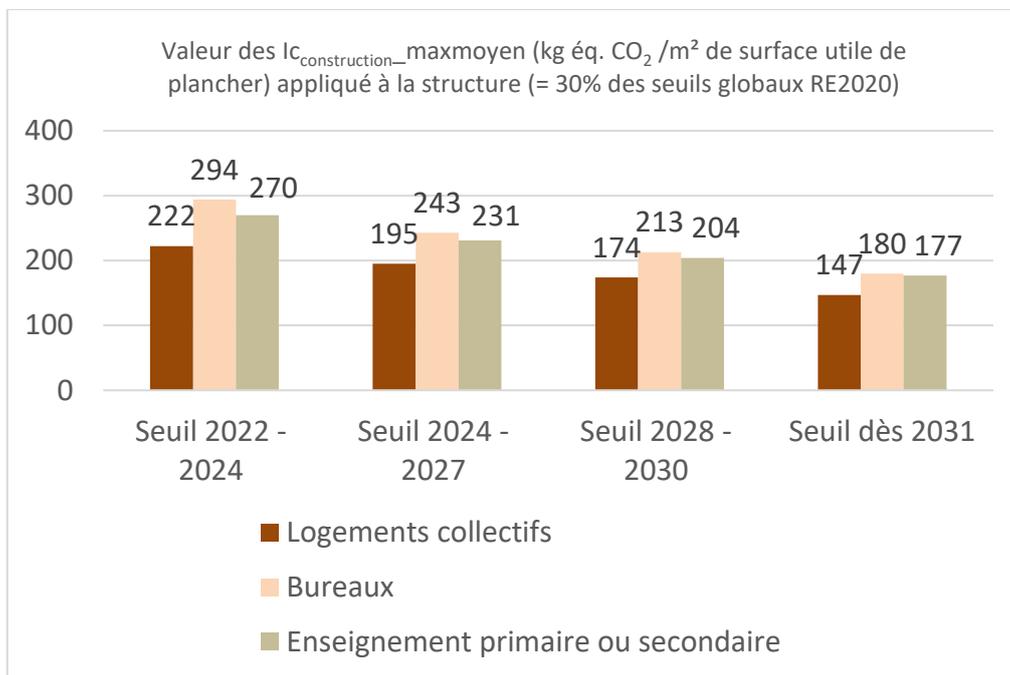


Figure 6 : Evolution des seuils d'émissions RE2020 pour la structure d'un bâtiment. (source: auteur)

Le choix des matériaux est alors déterminant dès la phase de conception pour estimer l'impact carbone du futur bâtiment construit.

La base de données INIES permet de tirer des valeurs moyennes d'émissions par matériau en ACV dynamique sur 50 ans. En moyenne, un m^3 de béton classique représente 200 $kgCO_2eq$ contre -290 $kgCO_2eq$ pour un m^3 de bois de charpente. Le bois est considéré comme un puits de carbone pour son empreinte carbone négative.

Cependant, le dernier rapport de l'IPCC affirme que les puits de carbone naturels (terrestres et océaniques) absorberont une proportion décroissante des émissions de CO_2 avec le réchauffement continu. Ces chiffres sont donc susceptibles d'évoluer à la baisse. De plus, le béton est meilleur que le bois sur le plan de la sécurité incendie, de l'acoustique et de la résistance mécanique. La comparaison d'impact environnemental doit donc se faire à performance égale, car le rajout de matériaux palliant les faiblesses du bois augmente son empreinte carbone finale.

2.3 Les possibilités actuelles offertes par le bois d'ingénierie

2.3.1 Rappels sur le matériau bois

Le bois est un matériau biosourcé qui séquestre le gaz carbonique (CO_2) absorbé par photosynthèse lors de la croissance de l'arbre. Le tronc et les branches sont sollicités naturellement par le vent et la gravitation comme des consoles. La structure interne du bois composée de fibres de cellulose est alors orientée principalement dans sa direction longitudinale, ce qui lui confère une résistance élevée en flexion, traction et de compression. Toutefois, le bois est plus faible lorsqu'il est sollicité dans une direction perpendiculaire au sens

de ses fibres. On peut le constater en consultant la norme française NF EN 338 [7] entrée en vigueur en 2016 et qui classe les résistance du bois. Le Tableau 1 ci-dessous rappelle les propriétés de résistance mécanique d'un bois résineux dont la classe de résistance en essai de flexion est de 24 N/mm², aussi appelé C24. Il souligne également le contraste élevé entre la résistance axiale et la résistance transversale.

Tableau 1 : NF EN 338 - Propriétés de résistance d'un résineux C24 en N/mm².

Flexion	Traction axiale	Traction transversale	Compression axiale	Compression transversale	Cisaillement
24	14,5	0,4	21	2,5	4,0

Comparaison du bois avec d'autres matériaux de construction

Il peut être intéressant de comparer les propriétés structurelles du bois avec celles d'autres matériaux de construction comme l'acier S-275 (S pour « structural », 275 étant la résistance minimale à la limite d'élasticité exprimée en méga Pascal noté MPa), ou le béton armé C-25 (C pour « concrete » (béton) et 25 est la résistance en compression du béton après 28 jours, exprimée en MPa). Le bois lamellé collé GL24h (GL pour « glued laminated », 24 comme résistance à la flexion en MPa et h pour homogène) peut aussi être placé dans cette comparaison visible dans le Tableau 2 ci-dessous. Les valeurs sont tirées de la NF EN 338 pour le bois massif et de la NF EN 14080 pour le lamellé. Celles de l'acier et du béton sont issues d'une étude comparative menée par l'université polytechnique de Madrid en 2020 [8]. Les valeurs de contrainte de compression admissibles σ_d sont calculées à partir des coefficients de sécurité des différents Eurocodes (1,1 pour l'acier, 1,5 pour le béton, 1,3 pour le bois massif et 1,25 pour le lamellé) qui viennent réduire la résistance à la compression σ du matériau.

Tableau 2 : Comparaison des propriétés structurelles du bois avec d'autres matériaux de construction.

Matériau	Masse volumique	Module d'Young E	σ	σ_d	<i>Résistance Poids</i>
	kg/m ³	10 ³ MPa	MPa	MPa	m
S-275	7870	210	275	250	3177
Béton C25	2500	25	25	17	1000
Bois C24	420	11	21	16	5000
GL24h	420	11,5	24	19	5714

On comprend avec le tableau ci-dessus que le bois a un excellent ratio résistance poids, meilleur que les autres matériaux de structure. Cela est un atout pour les projets localisés dans des zones où la portance du terrain est faible. En effet, pour une même réaction du sol on pourra construire plus d'étage en bois qu'en béton armé.

Le bois peut être également être compétitif par rapport au béton s'il est employé dans des poteaux travaillant en compression. En effet il tolère les mêmes contraintes et est bien plus léger. Il faut toutefois rester vigilant car les poteaux peuvent être sollicités par une combinaison de compression + flexion qui pénalise fortement le bois dans les vérifications à l'Eurocode 5.

Déformations liées au fluage

Le bois présente un module d'Young plus faible que les autres matériaux ce qui le rend plus souple. Cela se traduit par un phénomène de fluage, où le bois se déforme progressivement au cours du temps sous une charge constante. Il est particulièrement significatif pour des structures aux charges permanentes importantes, ce qui peut entraîner des tassements différentiels entre les zones plus ou moins comprimées de la structure, mais aussi des déformations dans les planchers etc. L'Eurocode 5 permet de prendre en compte le fluage à long terme en utilisant un coefficient multiplicateur dans le calcul des déformées, noté k_{def} . Ce facteur dépend des classes d'exposition aux intempéries du matériau. Ses valeurs sont disponibles en annexes Tableau 12. Il est alors possible de vérifier que les flèches finales des éléments respectent les états limites de service (ELS).

Humidité du bois

Une autre particularité du bois est sa sensibilité à l'humidité. C'est un matériau hygroscopique qui a la capacité d'absorber ou de restituer une certaine quantité d'eau en fonction de l'humidité de l'air ambiant. Celle-ci peut entraîner des changements dimensionnels du bois qui peuvent affecter la stabilité de la structure, en gonflant ou en se rétractant. L'Eurocode 5 propose différentes classes de service, allant de 1 pour une humidité de l'air ne dépassant pas 12% à 20°C et pour une humidité de l'air ne dépassant 65% que quelques jours par an, à 3 pour des humidités excédant 20% au sein du bois avec une humidité ambiante de plus de 85% quelques jours par an. Un coefficient de sécurité noté k_{mod} est alors utilisé dans le calcul des résistances mécaniques de dimensionnement. Il dépend de ces classes de service et de la durée du chargement. Il permet d'abaisser ces propriétés pour tenir compte de la modification du bois avec le temps. Ses valeurs sont disponibles en annexes Tableau 14.

Au-delà de 20% d'humidité du bois le risque de développement fongique est non négligeable. Le bois peut alors être attaqué par des champignons et des insectes xylophages qui peuvent gravement endommager le matériau. Il convient alors de le protéger correctement de ces différentes détérioration pour qu'il soit le plus durable possible.

Nécessité de dispositions acoustiques

En matière de performance acoustique, le bois nécessite souvent des dispositions supplémentaires pour assurer une isolation efficace, notamment dans un bâtiment à usage résidentiel où un plancher bois transmet plus facilement les bruits d'un étage à l'autre qu'une dalle en béton. Un complexe acoustique doit alors être rajouté ce qui ajoute une charge permanente supplémentaire sur les planchers, un coût et un impact carbone additionnels.

Protection au feu

De même, la protection au feu du bois doit être assurée du fait de son caractère combustible au sens de la norme NF P 02.507. Cela ne signifie pas que le bois est faible structurellement dans un incendie. Contrairement à l'acier qui plastifie à haute température et conduit à la ruine de la structure comme lors de l'effondrement des Twin Towers en 2001, le bois carbonise son enveloppe extérieure. Cette couche a une conductivité thermique augmentée ce qui ralentit sa combustion. La Figure 7 ci-dessous témoigne des performances structurelles du bois en cas d'incendie lors du feu de San Francisco en 1906.

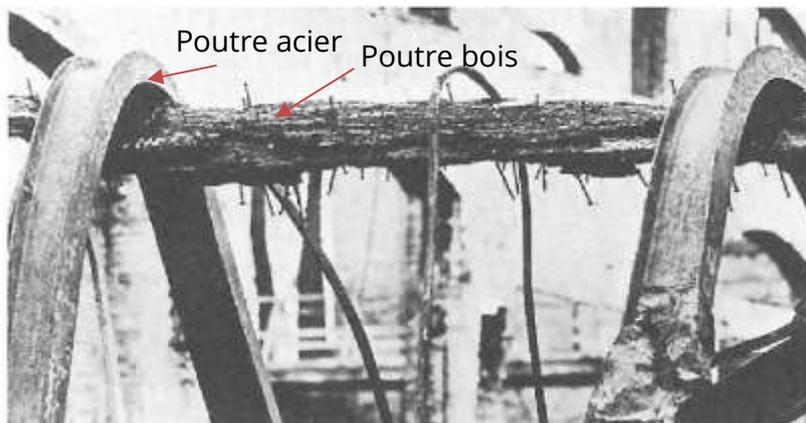


Figure 7 : Poutre en bois massif supportant des poutres acier ayant plastifié durant un feu à San Francisco (1906).

La doctrine pompier élaborée en 2021 par la brigade de sapeurs de Paris, le laboratoire central de la préfecture de police et le service des architectes de sécurité [2] définit des règles communes prescriptives pour les constructions bois. Elle ne concerne que la préfecture de Paris mais dans les fait elle est suivie en province par les autres préfectures.

La doctrine concerne tous les bâtiments combustibles dont le plancher bas du dernier niveau est à plus de 8 m du sol. Les mesures de prévention incendie sont ensuite graduées en fonction de la hauteur.

Les circulations verticales (noyaux) doivent être incombustible quelle que soit la hauteur du bâtiment, ce qui n'est pas compatible avec une solution tout bois.

Notre bâtiment a une hauteur supérieure à 28m, ce qui rend obligatoire la présence d'un système d'extinction automatique à eau (SEAE) ou sprinklage dans l'intégralité des parties de bâtiment comprenant des éléments structurels en bois. En effet, la doctrine considère que freiner en amont le développement de l'incendie est prioritaire. A cela s'ajoute une protection partielle par flochage ou encapsulage de toutes les parois bois avec des matériaux qui ne contribuent pas à la combustion pendant la durée réglementaire, ici de 2h car le bâtiment dépasse 50m ce qui le place en catégorie IGH.

Les deux parties du bâtiment (résidentiel et bureaux) doivent être isolées l'une de l'autre d'après la doctrine, avec un isolement coupe-feu 3h.

La propagation du feu par la façade est également à considérer. Tout d'abord il faut limiter la réaction au feu des matériaux composant la façade. Pour notre bâtiment, il faut employer des matériaux en façade classés A2-s3,d0. Selon la norme européenne EN 13501-1, cela signifie que le matériau est légèrement combustible (A2) sans contribuer de manière significative à l'incendie, que sa production de fumée n'est pas contraignante (s3) mais qu'en revanche aucune gouttelette ou particule enflammée ne se forme lorsqu'il brûle (d0). Le bois ne rentre pas dans

cette catégorie car il est combustible. Il peut au mieux être classé B s'il est traité avec retardateur de flamme mais il ne sera jamais A2. De plus, la doctrine préconise de mettre en œuvre un C+D supérieur ou égal à 1 ou 1,3m selon que la façade a une énergie de combustion notée M supérieure ou inférieure à 130 MJ/m². Autrement dit, dans le cas général la somme de la distance verticale de séparation entre deux étages notée C et de la distance horizontale entre la faces intérieure et extérieure de l'enveloppe (saillies incluses) notée D doit au minimum être supérieure à 1m pour limiter la propagation de l'incendie d'un à l'autre.

Ainsi, la doctrine présente de fortes contraintes pour un projet tout bois comme le nôtre. On gardera de cette publication la nécessité de protéger le bois avec des matériaux incombustibles pour une durée de 2h, qui seront pris en compte dans le bilan carbone du bâtiment.

2.3.2 Le bois lamellé collé et le bois lamellé croisé au cœur des structures bois actuelles

Comme on l'a vu précédemment, le BLC est obtenu par collage de lamelles de bois massif dont le fil est généralement parallèle. Il permet la fabrication d'éléments aux sections variées (rectangulaires, en T, I, L, cylindriques et même creuses). Ses dimensions peuvent atteindre 225 mm de large (largeur du bois de sciage limitante, rarement 260 mm), 2,8 m de haut (usinage limitant) [9], 30m de long (transport des éléments limitant). Il est possible d'ajouter les éléments pour obtenir des sections ou des portées plus importantes. Ils peuvent aussi être faits sur mesure, notamment les poutres courbes qui nécessitent des lamelles plus fines suivant leur rayon de courbure. Son utilisation est universelle, allant du bâtiment résidentiel au pont, en passant par la charpente de toiture. Il est employé dans les poutres et les poteaux d'une structure. Il est intéressant d'un point de vue architectural par les portées importantes et les formes qu'il permet de réaliser, comme dans la Fondation Louis Vuitton visible Figure 8 ci-dessous.



Figure 8 : poutres courbes en bois lamellé collé dans la Fondation Louis Vuitton (2012).
(source : auteur)

Ce matériau est couvert par l'Eurocode 5, ce qui est intéressant pour l'assurabilité d'un projet. La classe mécanique des lamelles (notée Txx) suit la norme NF EN14080 [10]. Elle peut être constante ou variable dans la hauteur de la section. On parlera respectivement de lamellé

homogène (GLxxh) ou de lamellé panaché (GLxxc), voir Figure 9. Ce dernier permet d'optimiser la section d'une poutre en plaçant les lamelles les moins résistantes au cœur de la section, là où les contraintes de flexion sont les moins importantes.



Figure 9 : BLC horizontal à gauche, BLC panaché à droite (sources : Boïse Cascade, Swedish Wood)

Un autre matériau à base de bois utilisé dans les structure qui est en plein essor est le CLT, (Cross Laminated Timber) ou lamellé croisé. Introduit dans les années 1990, on l'utilise dans les voiles porteurs, de refend et dans les planchers. Il est obtenu par empilement alterné à 0 et 90° de plis de bois massif de 20 à 40 mm, pour des épaisseurs allant de 6 à 28 cm. On peut voir l'alternance des plis sur la Figure 10 ci-dessous. Une de ses qualités est son comportement bi directionnel. En effet, le bois a une résistance particulièrement faible lorsqu'il est sollicité par un effort de direction perpendiculaire au sens de ses fibres. L'empilement croisé permet aux murs CLT de reprendre des efforts gravitaires verticaux et des efforts de vent horizontaux par cisaillement, mais aussi aux planchers de jouer le rôle de diaphragme de contreventement en étant sollicités latéralement dans leur plan. Les portées permises par le CLT vont jusqu'à 6 m. Au-delà, le critère vibratoire du plancher est difficile à respecter. Il n'est pas encore couvert par l'Eurocode 5 ce qui peut affecter les polices d'assurances. Du progrès est donc à faire sur le plan normatif concernant le CLT.



Figure 10 : exemple de panneau de CLT 5 plis. (source: masstimberservices.com)

On pourrait s'interroger sur la durabilité de tels matériaux au regard de l'exploitation forestière. Les essences utilisées dans les lamelles sont principalement les résineux (douglas, épicéa, sapin, pin sylvestre, mélèze). Les feuillus autres que le peuplier comme le chêne ou le hêtre peuvent être employés à condition de fournir une justification. Selon le manuel du bois lamellé [11], le BLC français est issu à 98% de forêts européennes (essentiellement scandinaves, allemandes et françaises) gérées durablement et ayant un accroissement net estimé à 645 millions de m³ par an, soit 510 000 hectares. A ce sujet une écocertification est possible avec le référentiel PEFC (Pan European Forest Certification) ou FSC (Forest Stewardship Council) pour toute ou partie du bois utilisé.

Le bois d'ingénierie est économe en énergie lors de sa fabrication, contrairement à l'acier qui nécessite des fours chauffant à plus de 1600 °C. Sa recyclabilité est simple, à l'inverse de celle

du béton armé, à condition qu'il ne contienne pas de métaux ou de composés organochlorés. Il est donc clair que l'utilisation du bois d'ingénierie dans le projet M1 Lyon apporterait une plus-value environnementale certaine.

2.4 Etat de l'art sur les constructions bois de grande hauteur

2.4.1 Anciennes réalisations

Construire en bois massif sur des hauteurs dépassant 28 mètres se faisait déjà 1000 ans auparavant avec les pagodes, dont certaines tiennent encore debout au Japon, un pays connu pour ses séismes à fortes magnitudes et son climat subtropical plus humide que la France. La plus ancienne d'entre elle serait celle du temple Horyu-Ji, reconstruite en 711 après J-C après un incendie [12]. L'édifice culmine à 32,5 mètres de haut (Figure 11).



Figure 11 : Pagode en bois massif du temple d'Horyu-Ji, Japon (711 ap. J-C). (source : Wikipédia)

Le bois massif offre des possibilités limitées dans une structure car les sections permises par la découpe d'un tronc ne dépassent pas le mètre. Les chargements et les portées le sont aussi en conséquence, ce qui a amené la recherche à développer une forme de bois plus intéressante que le bois massif, le lamellé collé (BLC). Il a été développé initialement par l'entreprise allemande d'Otto Hetzer au début du 20^{ème} siècle, par collage de lamelles de bois massif. L'avantage de cette technique est qu'elle permet d'atteindre des sections plus importantes. En 1910 ils parviennent même à construire un hall dont les arcs en lamellé portaient sur 43 mètres, pour des sections de 300 x 3000 mm, visibles sur la Figure 12 ci-dessous.



Figure 12 : Fermes en lamellé d'un hall à l'exposition universelle de Bruxelles (1910). (source : valentine)

Le bois a été pendant longtemps un matériau de choix avant l'apparition du béton et de l'acier. Durant la première guerre mondiale des entrepôts de céréales ont été construits en Suède, utilisant une technique de poteaux-poutres en bois qui était la solution la plus rapide à mettre en œuvre et la moins chère à cette époque. Un de ces entrepôts situé à Eslöv, datant de 1918

a été converti en bâtiment d'habitation en 2008 par l'architecte Curt Salomon-Sörensen et culmine à 31 mètres [13]. On peut voir sur Figure 13 ci-dessous les poteaux bois traversant l'intérieur d'un appartement dont l'architecte a conservé une certaine esthétique.



Figure 13 : bâtiment de 31 m en bois datant de 1918 à Eslov, Suède.
(source : Håkan Dahlström)

2.4.2 Constructions récentes de d'immeubles de grande hauteur en bois

Les réalisations faites à partir des matériaux présentés dans la section précédente se sont multipliées ces dernières années. Cette partie présente pour chaque bâtiment une particularité du contreventement qui a servi de source d'inspiration pour l'adaptation bois du projet M1 Lyon.

Définition d'un immeuble en bois

Le CTBUH (Council on Tall Buildings and Urban Habitat) définit un immeuble en bois comme un édifice dont les porteurs de charges primaires sont uniquement en bois [14]. Les autres matériaux sont tolérés seulement dans sa structure au niveau des connexions. L'usage du béton est donc possible dans les dalles à condition qu'elles soient portées par des poutres en bois. Néanmoins, si le noyau est en béton alors le bâtiment est considéré comme ayant une structure mixte.

Les bâtiments en bois de grande hauteur sont aujourd'hui contreventés principalement suivant deux méthodes.

Contreventement par voiles de refend : l'exemple d'Origine

La première méthode utilise des voiles en CLT (Cross Laminated Timber ou bois lamellé croisé) qui reprennent les efforts horizontaux du vent transmis par les planchers CLT qui jouent le rôle de diaphragmes. La transmission de ces charges se fait par cisaillement des voiles de refend.

Un bâtiment utilisant ce type de contreventement est l'immeuble de 12 étages *Origine* construit à Québec au Canada. Première mondiale d'un bâtiment de 41m intégralement en bois, il est l'œuvre du groupe NEB constitué de Nordic Structures (bureau d'études), EBC (entreprise travaux) et Synchro Immobilier. L'ensemble des 890 m² a été dessiné par le cabinet Yvan Blouin Architecte. Les étages font 3m de haut pour une hauteur libre de 2,6m. Le bâtiment a vu le jour notamment grâce au financement fédéral de l'Initiative de démonstration de bâtiments bois de grande hauteur (IDBBGH). Une telle dynamique serait souhaitable en France si l'on souhaite développer ce type de bâtiment. L'article du Centre d'Expertise sur la construction commerciale en bois (cecobois) donne des informations précises sur le sujet [15].

Sa structure se décompose en un socle de 4,3m en béton armé puis 36,6 m de structure bois. Elle a été vérifiée conformément à la norme de calcul des charpente bois (CSA O86). Voici une description des différents systèmes présents dans le bâtiment :

Les charges gravitaires sont portées par des murs en CLT d'épaisseurs allant de 291 mm dans les étages inférieurs à 175 mm dans les derniers étages, de deux axes de poutres lamellé de 279 x 502 mm supportées par des poteaux lamellé de 456 x 456 mm à 279 x 279 mm dans les derniers étages. Les portées maximales sont de 7m pour les poutres et de 5,7m pour le plancher CLT. Ce dernier est épais de 175 mm et s'appuie soit sur les poutres soit sur des lambourdes fixées aux voiles par vis auto-taraudeuses. Cela permet d'assurer la continuité des voiles et d'éviter la compression perpendiculaire aux fibres. De même, l'assemblage poteau-poutre a été conçu pour éviter ce phénomène en assurant une transmission d'effort continue de poteau à poteau sans comprimer les poutres, voir Figure 58 en annexes.

Les charges de vent issues de la façade transitent par le plancher qui joue le rôle de diaphragme puis par cisaillement par les murs CLT que l'on peut voir sur la Figure 14 ci-dessous. Certains voiles ont uniquement le rôle de refend. Leur épaisseur est donc réduite (3 plis, 78 mm pour ceux placés sur certaines façades). D'autres sont doublement sollicités lorsqu'ils sont porteurs et utilisés en refend, comme dans les cages d'ascenseur et d'escalier. Cela mène à des sections conséquentes dans les 3 premiers étages avec des voiles de 291 mm d'épaisseur (9 plis). Plus haut, les charges gravitaires sont moins importantes ce qui permet de réduire les sections (175 mm, 5 plis). Ainsi, l'épaisseur du mur CLT peut être grandement réduite si son seul but est de contreventer sans transmettre des charges gravitaires. Toutefois, l'épaisseur totale des murs reste importante une fois la protection incendie et l'isolation ajoutées. Dans cet exemple un mur mitoyen porteur a une épaisseur de 485 mm, voir Figure 57 en annexes. Ceci réduit directement la surface utile de plancher du projet.



Figure 14 : Contreventement par voiles CLT dans *Origine*, Québec (2017). (sources :Stéphane Groleau, Nordic Structures)

Contreventement par diagonales en façade : l'exemple de Mjøstårnet

Une autre façon de contreventer un bâtiment en bois est l'utilisation de poutres en façade formant un treillis avec les poteaux de rive. On pourrait assimiler ce treillis à une super poutre verticale agissant en console sous les efforts latéraux de vent. On retrouve cette technique dans le Mjøstårnet, Figure 15.



Figure 15 : Contreventement par diagonales en façade dans Mjøstårnet, Norvège, (2019).
(source : Moelven Limtre AS)

On peut trouver des caractéristiques techniques sur ce bâtiment dans le rapport communiqué lors de la World Conference on Timber Engineering d'Oslo de 2023 [16]. Construit sur la rive du lac Mjøsa à Brumundall en Norvège par l'entreprise HENT, à partir des plans du cabinet VOLL architects et des études structure de Moelven Limtre AS, le bâtiment de 85,4m est le plus haut bâtiment bois au monde actuellement. Sa structure de 18 étages a été dimensionnée en respectant l'Eurocode 5.

Les charges gravitaires sont supportées par une ossature poteaux-poutres en lamellé collé panaché GL30c. Les poutres ont des portées maximales de 6,5 mètres, pour des sections au maximum de 625 x 585mm. La largeur de poutre est plus importante que la hauteur, ce qui optimise la hauteur inter-étage. Les poteaux intérieurs atteignent aux rez-de-chaussée des sections de 725 x 810mm.

Les planchers des 10 premiers étages sont des complexes préfabriqués en bois d'épicéa d'une épaisseur totale de 439mm. Ils portent au maximum sur 7,1 mètres. L'ensemble est un sandwich composite, fait de solives en lamellé panaché GL28c de 66 x 360mm d'entraxe 60cm, placées entre deux panneaux de bois. La panneau de bois inférieur de classe C24 comble les vides laissés par les solives. Des lambourdes de 148 x 48mm sont fixées sous les solives ce qui ajoute une résistance supplémentaire dans la partie tendue des sections travaillant en flexion. La face supérieure du sandwich est en bois lamifié croisé (LVL-C) épais de 31mm et assure un rôle de porte-à-faux en transmettant la charge du complexe de plancher vers les poutres principales. Le complexe s'intègre ainsi entre les poutres principales et seule la couche de LVL dépasse de celles-ci ce qui minimise l'épaisseur totale du plancher. Celui-ci est visible sur la Figure 57 ci-dessous.

Structure	Width (mm)	Height (mm)
Joist	66	360
LVL-C top flange	31	-
C3 at the bottom	148	48



Figure 16 : complexe de plancher Trä8 d'épaisseur optimale. Source: Moelven

Les niveaux suivant sont constitués d'une dalle en béton de 30 cm. Elles sont supportées par une ossature bois donc le bâtiment est considéré en bois par le CTBUH. Le rôle de ces dernières est d'assurer un critère de confort concernant l'accélération latérale du bâtiment sous un chargement de vent. Elles apportent de l'inertie par leur masse plus importante qu'un plancher bois ce qui réduit le ressenti de mal de mer des résidents dans les derniers niveaux. Les balcons sont aussi préfabriqués et faits en CLT. Ils sont fixés à la façade et suspendus aux poteaux par des tirants en acier. Un revêtement en polyuréthane protège la face supérieure des intempéries.

Les charges de vent sont reprises uniquement par les treillis de façade, les cages en CLT n'ont que la fonction de porteurs verticaux. Les treillis ont été préfabriqués sous forme de portiques de 5 étages. Les diagonales ont ensuite été rajoutées. Ils recouvrent chaque façade du bâtiment. Pour éviter des assemblages trop complexes, les diagonales transférant les charges de vent de deux façades différentes sont connectées sur des files de poteaux différentes. Les diagonales ont des sections de 625 x 990mm en lamellé panaché GL30c et les poteaux d'angle en lamellé homogène GL30h ont des sections qui atteignent 625 x 1485mm sur les façades les plus élancées. De telles dimensions d'éléments ont été possibles grâce à l'emploi du lamellé collé. Les assemblages jouent un rôle important dans la transmission des efforts de vent. Les ferrures en acier S355 ont une résistance à la traction de 700 MPa. L'effort de traction maximal dimensionnant dans un assemblage de la structure est de 5000 kN. Il se situe au niveau des ancrages des diagonales dans le sol, lorsque la façade la plus large de la tour est exposée au vent. Les assemblages les plus sollicités sont faits de quatre plaques d'acier épaisses de 12mm qui s'insèrent dans les poutres. Elles sont ensuite connectées au bois par 100 goujons de 12mm de diamètre. L'intérêt est d'avoir un assemblage incorporé au sein du bois car l'acier constitue un point sensible en cas d'incendie. Les éléments acier (plaques et goujons) sont donc placés au cœur de la section bois au minimum à une distance égale à l'épaisseur de carbonisation atteinte au bout de la durée réglementaire, ici 85mm pour 120 minutes de combustion. En effet, d'après les études au feu chaque face exposée verrait son épaisseur réduite de 91 mm au bout de 120 min d'incendie. De plus, la température n'excède pas 250°C dans les connexions ce qui est structurellement acceptable.

La pergola située au sommet est une structure qui rajoute de la hauteur sans pour autant servir d'étage habitable. L'enjeu était alors de minimiser sa prise au vent. Elle est faite de poutres en lamellé croisé GL30c fait à partir de bois de pin. Leurs sections sont rectangulaire-creuses.

L'aspect tubulaire permet de réduire le phénomène de rétraction lié à l'humidité qui aurait sévit sur des sections pleines. Ces poutres ont été fabriquées en assemblant 4 éléments en lamellé collé puis en effectuant un congé sur chaque angle afin de rendre les éléments plus aérodynamiques.

Au total 4000m³ de bois ont été utilisés, essentiellement de l'épicéa classé pour les porteurs de charge et les planchers. Or le lamellé collé vient en partie de Norvège et du reste de la Scandinavie, il paraît assez logique qu'un tel projet ait vu le jour du fait de la proximité immédiate du matériau, bien que le volume total de bois employé soit important.

Contreventement par structure « tube - in - tube », l'exemple de Rocket&Tigerli

Une façon de rigidifier une tour face aux charges latérales est d'adopter une structure dite « tube in tube ». On pourrait faire l'analogie avec un bambou, qui est une structure très rigide car c'est un tube dont l'enveloppe extérieure est renforcée. Ce type de structure possède deux parties rigides qui sont son enveloppe externe et son noyau. Au centre du noyau se trouvent les circulations verticales. Entre le noyau et l'enveloppe se trouve une structure poteaux-poutres avec plancher diaphragme qui relie les deux tubes.

Un projet de tour de 32 étages et 100m en bois est en cours en Suisse à Winterthur. Les travaux réalisés par WaltGalmarini démarreront en septembre 2024 pour une livraison prévue en 2027. La tour Rocket&Tigerli est à usage mixte (résidentiel, hôtel, commerces). Commandée par le promoteur Implenla les 26 000 m² ont été dessinés par les cabinets Schmidt Hammer Lassen Architects de Copenhague et Cometti Truffer Hodel Architects de Lucerne. La partie études a été menée par l'Institut Fédéral de Technologie de Zurich (ETH). Sa structure est de type tube-in-tube [17]. On peut la voir sur la Figure 17 ci-dessous.



Figure 17 : tour Rocket&Tigerli à Winterthur en Suisse (2027)
(source : Schmidt Hammer Lassen)

Une méthode innovante de plancher composite bois béton est employée dans cette structure. On peut voir sur la Figure 18 ci-dessous que la partie inférieure sollicitée en traction est en bois, tandis que la partie supérieure sollicitée en compression est en béton. Ainsi, les matériaux sont disposés dans l'épaisseur du plancher de sorte qu'ils soient les plus performants possibles. Le sandwich peut être rempli de matériaux répondant aux exigences physiques du bâtiment. Le

bois et le béton sont reliés par des tubes en acier. On peut également remarquer sur la même figure la présence de tube de sprinklage. Les bâtiment étant classés IGH dès 30m en Suisse, la protection incendie est assurée en partie par cette méthode.



Figure 18 : Plancher mixte bois - béton utilisé dans la tour Rocket&Tigerli. (source: Implenia)

Le complexe est 35% plus léger qu'une dalle en béton traditionnelle ce qui économise les quantités de béton employé dans les fondations de la tour. Elle permet aussi de minimiser la distance inter-étage qui est de 3,2m, contre 3,7m pour un scénario tout bois. Pour une même hauteur le bâtiment fait 32 étages contre 29 étages pour la solution bois. De plus, la structure composite du plancher permet notamment le passage de réseaux et du sprinklage,

Néanmoins cette structure demande une disposition particulière des unités d'habitations autour du noyau central ainsi qu'une régularité des trames de poteaux. C'est pourquoi nous ne retiendrons pas cette méthode de contreventement car trop complexe à appliquer à notre projet dont les trames étaient déjà définie et que la volonté était de les conserver.

Concept de tour de 244m en bois à Chicago

Un autre projet intéressant est celui de la River Beech Tower de 244 m (80 étages) à Chicago. Ce projet de recherche mené par l'université de Cambridge, les ingénieurs de Thornton Tomasetti et les architectes Perkins&Will a pour but de concevoir une tour de 80 étages réalisable, dont la superstructure est faite entièrement en bois [18] visible Figure 19 ci-dessous.



Figure 19 : River Beech Tower à Chicago, USA. (source: Perkins&Will)

La structure d'une telle tour est complexe, puisque à une telle hauteur, les efforts latéraux de vent prédominent sur les efforts gravitaires, et ceci d'avantage pour une tour en bois qui est légère. On peut apercevoir les différents éléments structuraux du contreventement sur la Figure 20 ci-dessous :

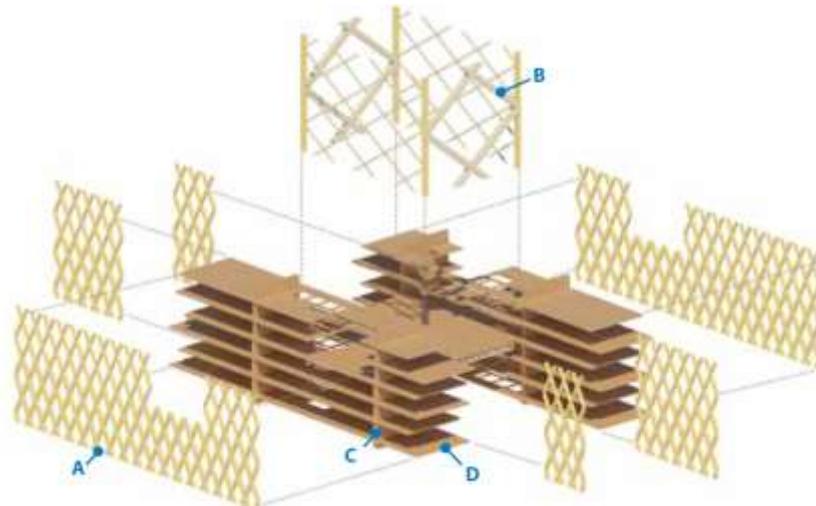


Figure 20 : Système de contreventement de la River Beech Tower. (source: Perkins&Will)

La tour est composée de deux bâtiments érigés en parallèle. L'élancement de chaque bâtiment est tel que d'après le papier de recherche, une solution bois serait impossible pour contreventer une telle hauteur. C'est pourquoi un premier élément structural fait à partir de croix de Saint-André vient relier les deux blocs au niveau de l'atrium. Ce sont des éléments bois en forme de croix qui reprennent les efforts de vent horizontaux agissant sur les deux bâtiments en les transmettant jusqu'en bas de la tour par traction. On peut les voir en B sur la Figure 20 et sur l'image au centre en Figure 19. Ces éléments sont faits à partir d'une technique de bois présente aux Etats Unis, le PSL (Parallel Strand Lumber). A la différence du LVL, elle utilise des morceaux de bois plus long ce qui lui confère une meilleure résistance pour des grandes portées comme celle-ci. Des voiles en CLT sont également présents au centre de chaque bâtiment et viennent compléter le contreventement dans la même direction que les croix de Saint-André de l'atrium. Ils sont visibles en C sur la figure ci-dessus. Ainsi, les deux bâtiments n'agissent plus que comme une seule et unique tour de section transversale bien plus importante ce qui augmente sa rigidité.

Le contreventement dans la direction perpendiculaire à la précédente se fait à l'aide d'une résille en bois faite de LVL, placée en façade de chaque bâtiment. On peut la voir en A sur la figure ci-dessus ainsi que sur la Figure 21 ci-dessous.



Figure 21 : résille de façade dans la River Beech Tower. (source : CTBUH)

La tour a donc une structure « tube-in-tube » puisqu'elle est rigidifiée au niveau de son enveloppe et au niveau de son noyau. L'intérêt d'une telle résille est qu'elle utilise des éléments travaillant axialement lors du contreventement. En effet, un système de portique classique subit des moments au niveau des connexions qui sont pénalisant pour une structure bois. L'objectif est ici de solliciter la résille dans le sens des fibres du bois, là où il est le plus performant, tout en s'en servant comme porteur de charge verticales. Cette forme triangulaire maximise l'apport de lumière naturelle par rapport à un tramage rectangulaire de poteaux-poutres en bois qui serait moins performant mécaniquement, conduisant à des sections plus importantes et moins de visibilité sur l'extérieur. Les sections des éléments sont progressivement réduites avec la hauteur du bâtiment par soucis d'économie de matière.

Bilan de l'état de l'art pour le projet M1 Lyon

Au terme de cet aperçu des nombreuses possibilités offertes par le bois d'ingénierie, nous pouvons retenir plusieurs points que l'on pourra appliquer par la suite au projet M1 Lyon.

Tout d'abord les matériaux disponibles comme le lamellé ou le CLT limitent les portées et donc le tramage du bâtiment en bois. Les réalisations présentées précédemment allaient au maximum jusqu'à 5,7m de portée pour du CLT et 7m pour des poutres lamellé. Ces mêmes matériaux ont des dimensions limités par leur fabrication, comme les panneaux de CLT qui font au maximum 29cm d'épaisseur dans le cas de l'immeuble Origine.

Ensuite le bois est très performant lorsqu'il travaille axialement en traction / compression, notamment en étant employé en tant que poteau, résille ou diagonale de treillis de façade. Il est moins bon en flexion, ce qui entraîne des sections bien plus importantes pour les éléments porteurs de type poutre par rapport au matériau béton.

Le complexe de plancher peut avoir une épaisseur importante d'autant plus qu'il faut rajouter une couche d'isolation acoustique pour palier à la densité plus faible du bois qu'une dalle béton traditionnelle. De plus, la façon d'assembler le complexe aux poutres principales est déterminante dans la gestion de la distance inter-étage. La technique utilisée dans le Mjøstårnet étant complexe, on étudiera dans la suite de ce TFE un plancher CLT et non un sandwich composite de panneaux / solives.

Enfin, le bois étant un matériau particulièrement sensible à son environnement, on prendra en compte sa localisation dans le bâtiment afin de lui appliquer les classes de service et facteurs de modification et de fluage nécessaires, selon l'Eurocode 5.

3. Etude des contreventements en bois appliqués à M1 Lyon

3.1 Rappels sur le bâtiment en béton

On étudie la superstructure du bâtiment M1 Lyon qui est en béton armé dans le projet existant. Les vues en plan d'étages courants de bureau (R+0 à R+8) et de logements (R+9 à R+15) rappelle les trames à conserver (notées en rouge) sur la Figure 22 ci-dessous. La partie délimitée en bleue sur la même figure correspond à l'emprise du bloc résidentiel sur le bloc de bureaux (les images ne sont pas aux mêmes échelles). On voit aussi sur la même figure les voiles placés au niveau des cages d'escalier et d'ascenseur.

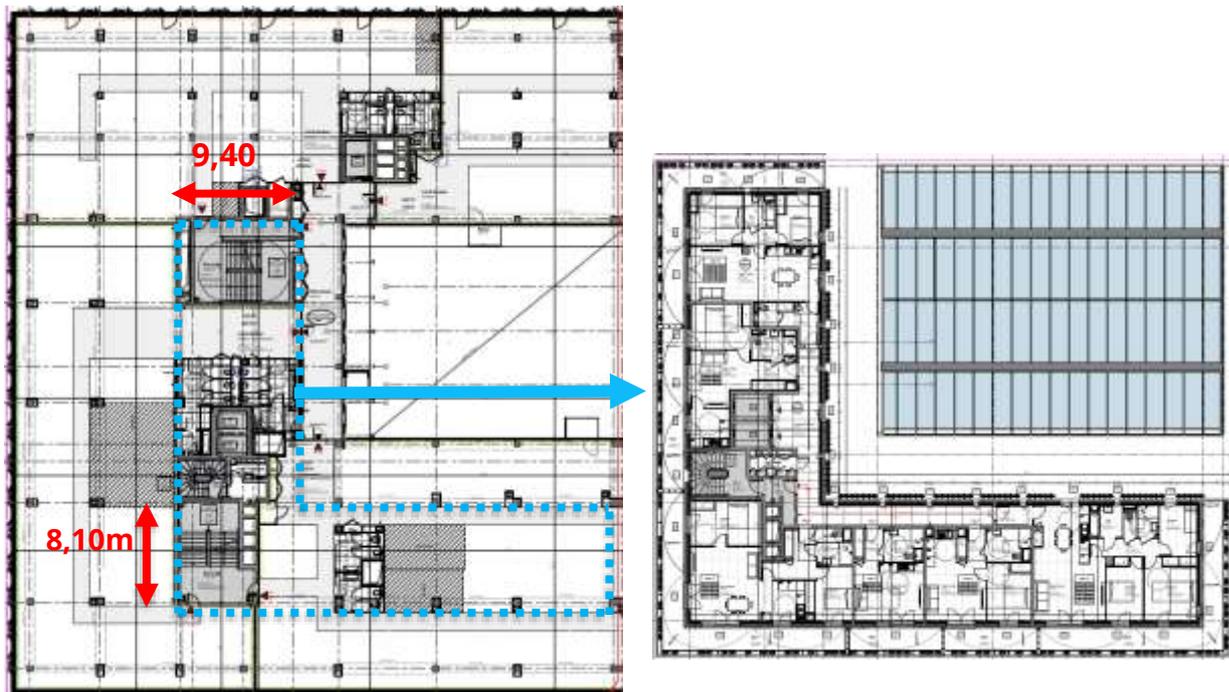


Figure 22 : Plans d'étages courants de bureau à gauche et de logement à droite. (Source: Setec)

En utilisant les plans structure de mes collègues, j'ai pu rassembler les données concernant les dimensions des éléments porteurs en béton avant de me lancer dans le prédimensionnement en bois. Les portées entre deux poteaux successifs sont souvent de 8,10m et au maximum de 9,40m. Tous les éléments sont supposés en béton C45/55, leurs dimensions sont les suivantes :

Tableau 3 : dimensions des éléments en béton du projet M1 Lyon. (source: Setec)

Bloc résidentiel - Inter étage 2,89m.	
Éléments	Dimensions (cm)
Poutres d'allège	20 x 70ht
Dalles pleines	20
Voiles	20
Bloc de bureaux - Inter étage 3,50m.	
Poutres courantes	70 x 60 ht
Dalles pleines	30
Voiles	30

3.2 Prédimensionnement commun aux différents modèles en bois

L'objectif de cette section est de définir les trames de poteaux-poutres et les épaisseurs de planchers qui seront communes aux différentes propositions de contreventement dans la suite de ce rapport.

3.2.1 Hypothèses de prédimensionnement

Normes de conception

Je me suis basé sur la norme européenne de conception et calcul des structures en bois, l'Eurocode 5 [19] entrée en vigueur en novembre 2005, ainsi que sur son annexe nationale de mai 2010 [20]. Celle-ci donne les règles communes de calcul des bâtiments en bois. Elle tient compte des caractéristiques du matériau notamment sa déformation liée au fluage et la modification de ses propriétés mécaniques suivant l'humidité. Comme on l'a vu en 2.3.1, les facteurs k_{def} et k_{mod} ont été introduits par cette norme pour tenir compte de ces faiblesses du matériau. Les matériaux employés utilisent les classes mécaniques de la norme NF EN 14080 [21] pour le lamellé collé et de la norme NF EN 338 [7] pour le bois du CLT.

Charges permanentes

Les hypothèses de chargements de long terme sur les étages courants de logements et de bureaux sont détaillées dans Tableau 4 et Tableau 5 ci-dessous.

Tableau 4 : Charges permanentes sur le bloc logements

Type	Symbole	Valeur	Unité
Poids propre du CLT (16 cm, C24)	g_s	0.79	kN/m ²
Poids propre du faux plafond, du complexe acoustique et de la protection incendie	g_s'	2.50	kN/m ²
Poids propre des façades (sur poutres de rive)	g_f	10.5	kN/m
Poids propre des balcons appliqué sur les poutres de rive (328.5 daN· m ⁻² avec bande portée de 2.10 m)	g_b	6.90	kN/m

Tableau 5 : Charges permanentes sur le bloc de bureaux

Type	Symbole	Valeur	Unité
Poids propre du CLT (20 cm, C24)	g_s	0.98	kN/m ²
Poids propre du faux plafond, du complexe acoustique et de la protection incendie	g_s'	2.50	kN/m ²
Poids propre des façades (sur poutres de rive)	g_f	12.5	kN/m

Le complexe de chape sèche acoustique est constitué de laine de roche, de plaques de fibre-gypse et de nid d'abeille rempli de béton cellulaire. Les épaisseurs et les poids propres des planchers CLT sont explicitées plus loin en partie 3.2.2.

Charges d'exploitation

De même, les chargements liés à l'exploitation du bâtiment et à la présence de cloisons (moyen terme selon l'annexe nationale à l'Eurocode 5) doivent être prises en compte. J'ai utilisé les valeurs issues de l'annexe nationale de l'Eurocode 1 [22], disponibles en annexes Tableau 15.

Les charges d'exploitation appliquées sur les étages courants de logements et de bureaux sont détaillées dans les Tableau 6 et Tableau 7 ci-dessous.

Tableau 6 : charges d'exploitation sur le bloc logements.

Type	Symbole	Valeur	Unité
Charge d'exploitation catégorie A	q	1.50	kN/m ²
Charge d'exploitation des balcons catégorie A appliqué sur les poutres de rive (3.50 kN·m ⁻² avec bande portée de 2.10 m)	q	7.35	kN/m
Cloisons	q'	1.00	kN/m ²

Tableau 7 : charges d'exploitation sur le bloc bureaux.

Type	Symbole	Valeur	Unité
Charge d'exploitation catégorie B	q	1.50	kN/m ²
Cloisons	q'	1.00	kN/m ²

Charges climatiques

En appliquant les parties 1-3 et 1-4 de l'Eurocode 1 au bâtiment, on peut déterminer l'intensité des charges liées à la neige et au vent sur celui-ci en fonction de sa localisation, de ses dimensions globales et de son environnement proche.

L'immeuble se trouve à Lyon à une altitude inférieure à 200m. Il est donc en région de vent 2 et en région de neige A2, où vitesse de référence du vent est de 24 m/s. La rugosité du terrain est de IV car le quartier d'affaires est très urbanisé. D'après les hypothèses de calcul de mes collègues sur le bâtiment existant, il n'y a pas d'effet de masque des éventuels bâtiments rapprochés et les différents coefficients de direction, de saison et de terrain sont tous pris égaux à 1 ($c_{dir}=c_{season}=c_0=1$). En utilisant un outil de calcul développé par un collègue qui tient compte de tous les paramètres décrits dans l'Eurocode 1, j'ai obtenu les valeurs suivantes de charges de vent visibles dans le Tableau 8 :

Tableau 8 : charges de vent sur les façades du bâtiment.

Direction	Valeur (partie logement)	Valeur (partie bureaux)	Unité
Ouest / Est	136	188	daN/m ²
Nord / Sud	120	195	daN/m ²

Les différences de valeurs pour chaque façade viennent de la largeur de celles-ci qui diffère et donc leur prise au vent.

La charge de neige retenue pour le bâtiment est de 47 daN/m^2 , appliquée sur les surfaces de toiture, situées au R+9 et au R+15.

Matériaux

Les poutres et poteaux utilisent du lamellé collé homogène GL24h à GL28h. Les planchers et voiles sont en CLT de classe C24. Leurs classes de service ont été prises en compte selon leur position dans le bâtiment. Les poteaux de façade sont en classe 3 car situés en extérieur et donc sujets à de fortes humidités. Les poutres de plancher sont en classe 1 car abritées à l'intérieur du bâtiment.

3.2.2 Solution retenue pour les planchers

Je propose dans cette partie une première approche de dimensionnement des éléments de planchers et de poteaux-poutres, avant même de démarrer la modélisation.

Calcul des planchers en CLT

Le plancher est un élément du contreventement puisqu'il transfère les charges de vent aux éléments de stabilisation. Les trames existantes des poteaux étant de 8,10m, les solutions actuelles en CLT ne permettent pas de couvrir cette distance. Il a donc été choisi de placer des poutres secondaires à mi travée des poutres principales tous les 4,05m, afin de pouvoir y poser le CLT. Toutefois, les trames du bâtiment existant ne sont pas identiques ce qui a conduit à une portée au maximum de 4,40m qui a été dimensionnante.

Les vérifications des planchers et des voiles en CLT ont été menées à l'aide du logiciel de calcul CLT Designer développé par l'institut d'ingénierie du bois de l'université de technologie de Graz en Autriche. En appliquant les hypothèses de chargement des étages courants de logement et de bureau, on obtient des épaisseurs respectives de 16 et 20 cm. Ceci s'explique notamment par la charge d'exploitation plus importante dans les bureaux que dans les logements. La vibration est le critère dimensionnant des planchers. En effet, la vérification du plancher de la partie logement disponible Figure 59 en annexe montre que le taux de travail en flexion n'est que de 30% pour un panneau de 16 cm lorsque toutes les vérifications vibratoires sont réussies. En réduisant l'épaisseur du panneau, celui-ci ne les vérifiait plus. On peut voir l'alternance des plis à 0 et 90° des différents planchers sur la Figure 23 ci-dessous (lamelles de 40 et 20mm pour le 16cm et 5 lamelles de 40 pour le 20 cm).

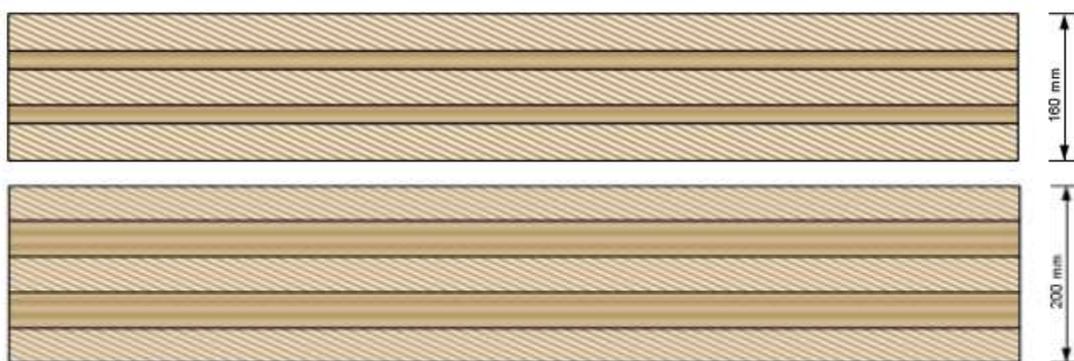


Figure 23: coupes transversales des planchers CLT de la partie logement (en haut) et de la partie bureaux (en bas). (source: auteur)

Calcul des poutres de plancher

Les poutres ont également été dimensionnées aux charges gravitaires. J'ai pour cela réalisé des minutes ou schémas de principe de structure faisant apparaître les différents éléments sur le plan de l'architecte. Cela m'a permis de déterminer les éléments ayant les plus grandes bandes portées et éventuellement la présence de charges additionnelles liées à une façade ou à un balcon. La minute d'un étage de courant de logement est représentée en Figure 24 ci-dessous.

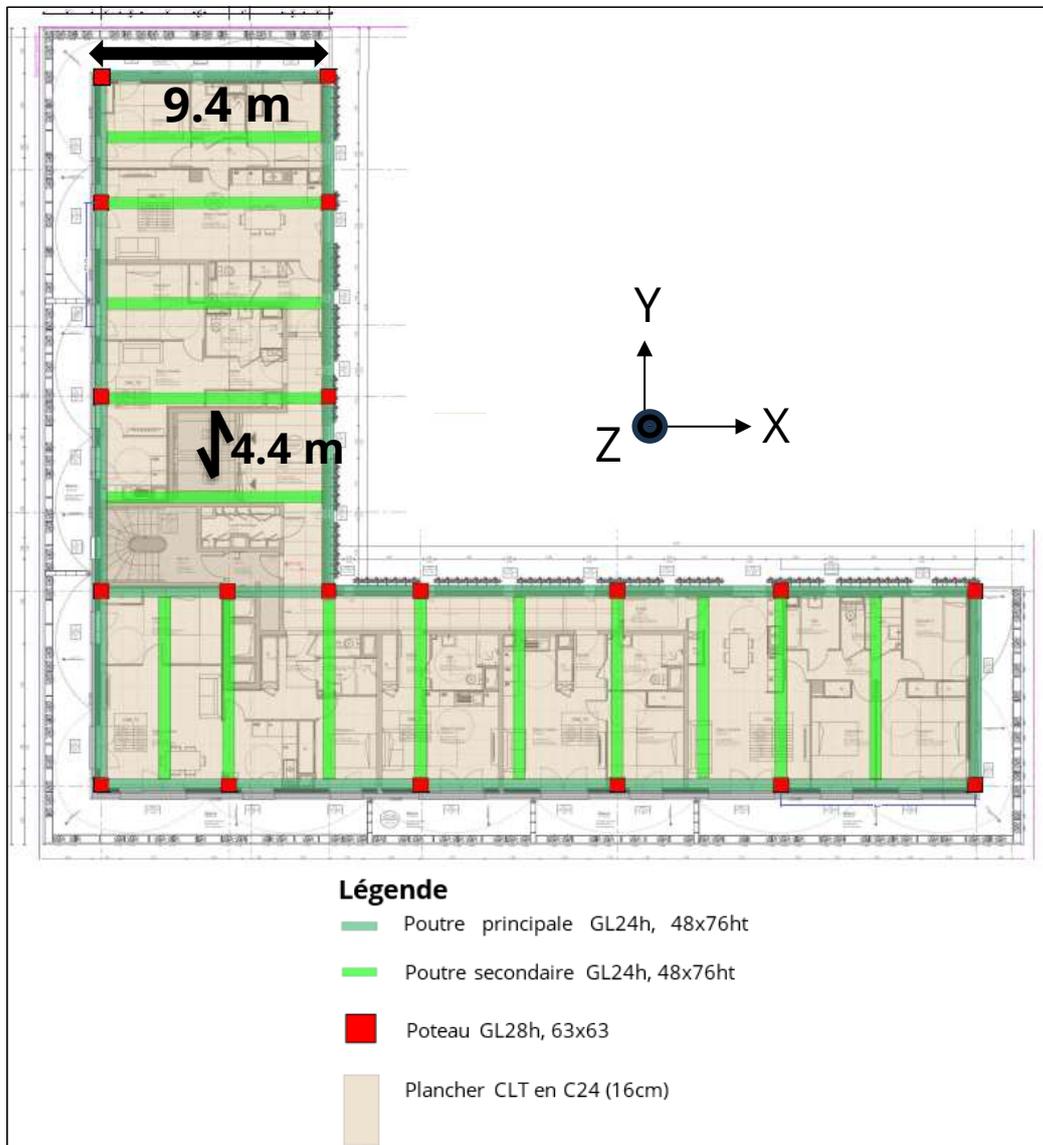


Figure 24 : minute d'un étage courant de logement, éléments légendés en cm. (source : auteur).

Une fois ces éléments identifiés, j'ai proposé des premières sections surdimensionnées et ai effectué une première vérification en contraintes selon l'Eurocode 5. Si le rapport entre la contrainte de calcul et la contrainte admissible était très inférieur à 1, alors je réduisais la section pour augmenter le taux de travail, afin d'économiser de la matière

Le critère dimensionnant pour les poutres a été comme pour le plancher CLT un critère vibratoire. En effet, l'Eurocode 5 exige pour les vérifications aux états limites de service (ELS), qui sont des vérifications liées au confort d'usage, que la fréquence propre de la poutre soit supérieure à 8 Hz. Or cette fréquence f peut s'exprimer à partir de la flèche court terme de la poutre δ , sous une combinaison de charges permanente et d'exploitation, par l'équation simplifiée $f = \frac{18}{\sqrt{\delta}}$.

Ce critère est très pénalisant pour des poutres de grande portée. En effet pour une charge q uniformément répartie, la théorie de la résistance des matériaux (RDM) donne l'expression de la flèche qui s'écrit $u = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$ où I est le moment quadratique d'inertie de la poutre, L est sa longueur et E est le module d'élasticité du bois. Cela signifie que la fréquence propre est inversement proportionnelle au carré de la longueur de la poutre. Ainsi plus la poutre a une portée importante et plus on aura du mal à respecter le critère des 8 Hz. En conséquence, j'ai fait le choix de dimensionner les poutres à un critère ELS vibratoire de 6 Hz dans un souci de réduction des sections, étant donné les taux de travail faibles obtenus en contraintes de flexion. En effet, si l'on dimensionnait la poutre de la partie logement la plus grande (9,4 m de portée) à un critère de 8 Hz (cf feuille de calcul en annexes, Figure 60), on obtiendrait une section de poutre de 48 x 92 cm, avec un taux de travail en flexion à l'Etat Limite Ultime (ELU) de ruine de la structure à 39%. Dimensionner à 6 Hz réduit de 16 cm la hauteur de la poutre par rapport au critère des 8 Hz, pour un taux de travail en flexion à l'ELU de 57%. Le gain de hauteur est donc non négligeable. La même démarche a été adoptée pour le calcul des poutres d'un étage courant de bureaux dont la minute est visible sur la Figure 25 ci-dessous :

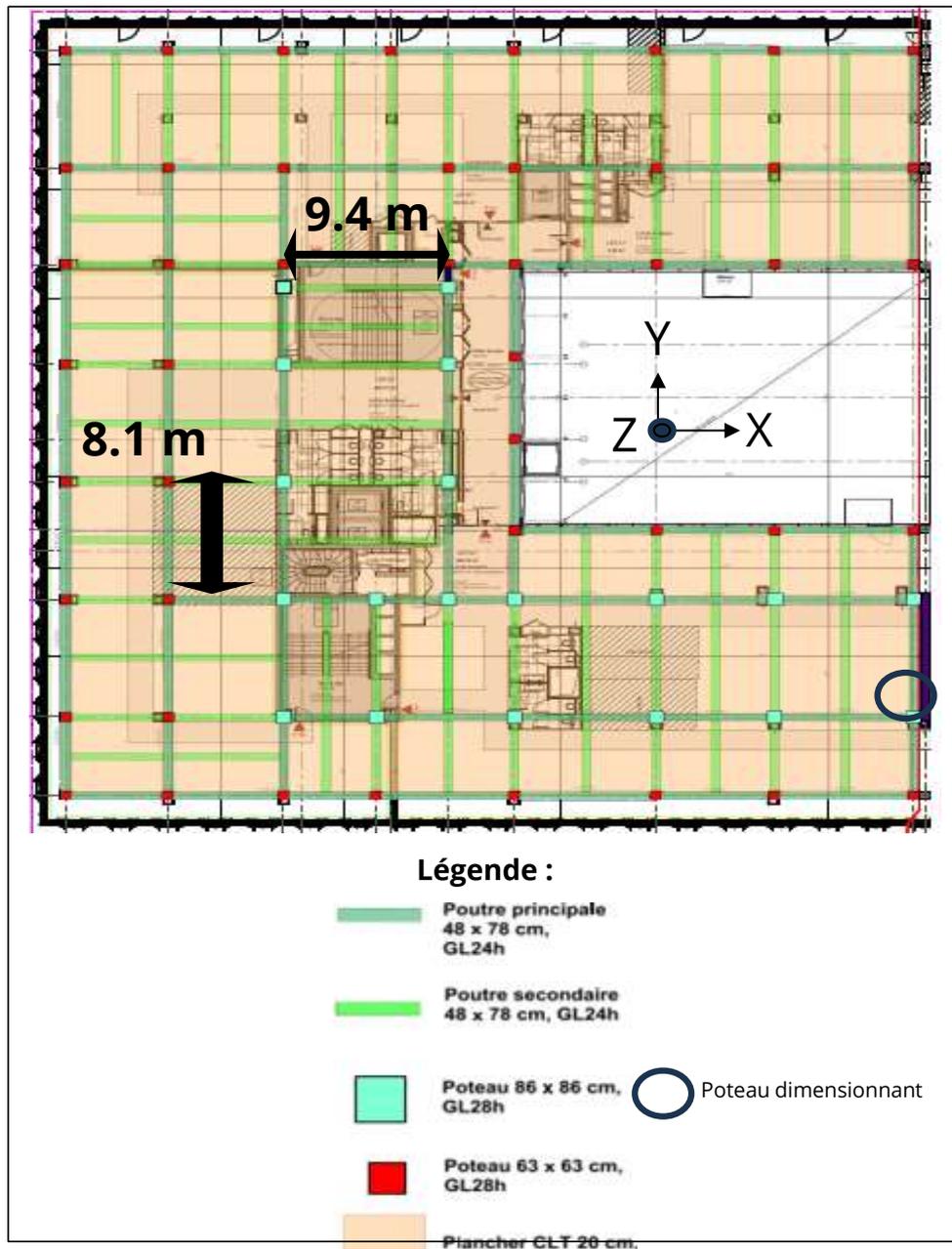


Figure 25 : Minute d'un étage courant de bureaux et sections des éléments de structure associés.
(source: auteur)

3.2.3 Hauteur inter-étage et pré dimensionnement des poteaux

Calcul de la hauteur inter-étage

On a pu déterminer dans la partie précédente les hauteurs de poutres et les épaisseurs de plancher. Comme on souhaite conserver la hauteur sous plafond du bâtiment en béton, la hauteur inter-étage augmente pour deux raisons : les sections de poutres sont plus grandes et le plancher s'appuie sur la face supérieure des poutres. Le schéma de la Figure 26 ci-dessous montre cette différence de 33 cm par étage de logement et de 44 cm par étage de bureaux.

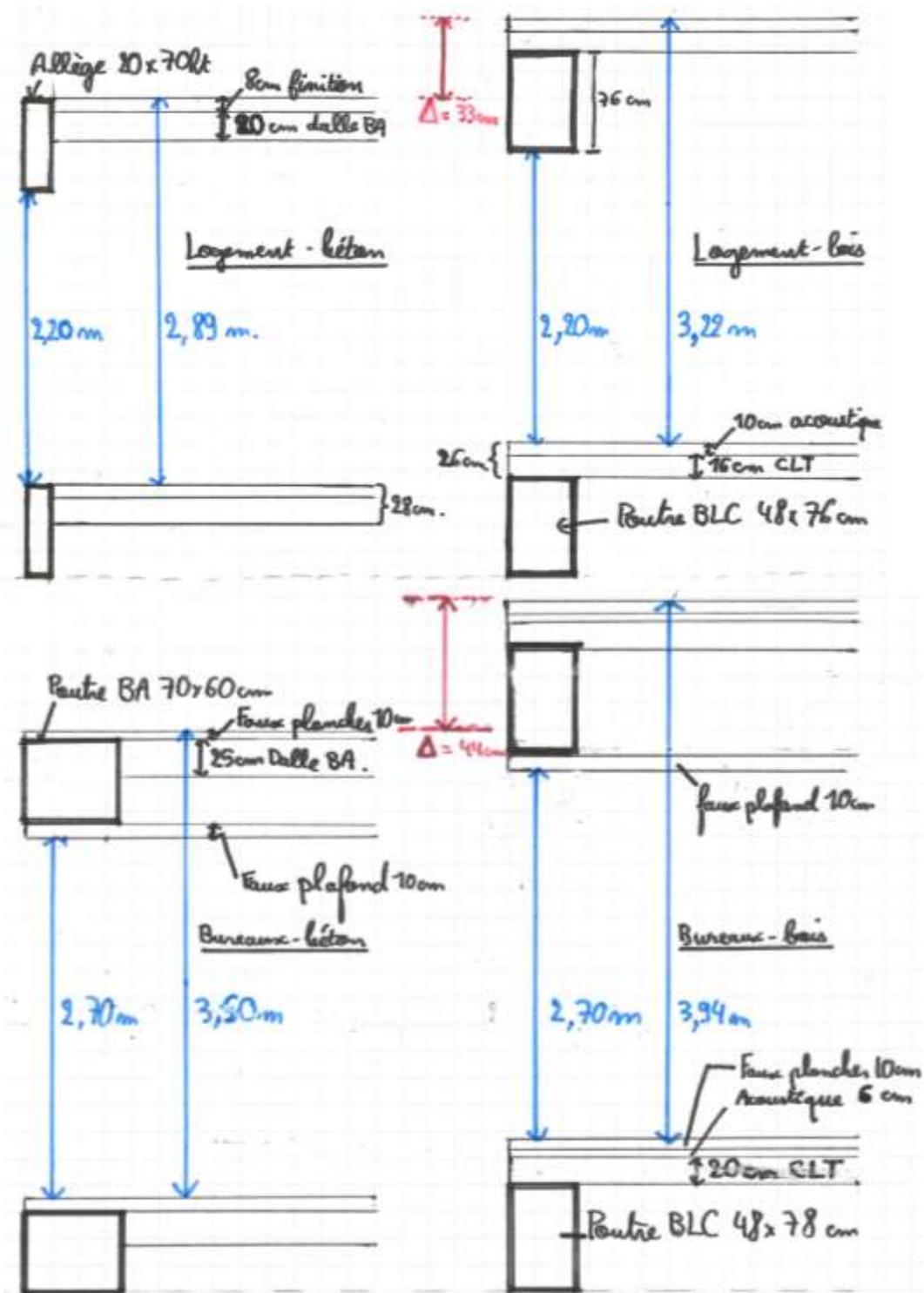


Figure 26 : Comparaison des hauteurs d'inter-étage entre le bâtiment en béton et le bâtiment en bois. (source: auteur)

La conséquence d'une telle augmentation par niveau est que la hauteur totale du bâtiment en est de 58m. Cela signifie que l'on perd l'équivalent de 2 étages de logements en béton (2.89m chacun), ce qui constitue une perte économique à la vente du bâtiment qui comporterait deux étages de plus pour la même hauteur en béton.

Nous entrons dans la catégorie IGH de sécurité incendie car la hauteur du dernier plancher bas habitable se situe à $58 - 3.22 = 54.78\text{m} > 50\text{m}$.

Calcul des poteaux

En connaissant la hauteur inter-étage, on peut faire le calcul des poteaux par descente de charges. Les poteaux dimensionnants sont ceux de classes de service 3 (k_{mod} le plus faible entraînant une résistance à la compression la plus faible), du R+0 qui supportent une descente de charge de 15 étages. Leur hauteur est de 3.94 m. On peut voir un de ces poteaux sur la figure précédente, entouré d'un cercle. A L'ELU la charge de compression atteint 9789 kN. La section est alors de 86 x 86 cm pour les poteaux à la verticale des 15 étages pour un taux de travail de 98%. Ces dimensions sont du même ordre de grandeur que les bâtiments présentés dans l'état de l'art. Les autres dimensions des poteaux sont visibles sur les minutes ci-dessus, une feuille de calcul de vérification d'un poteau du R+0 est disponible en annexes Figure 61.

3.3 Choix des solutions de contreventements

3.3.1 Solution 1 : contreventement par voiles en CLT

Le principe de cette solution consiste à placer des voiles de refend en CLT aux emplacements existants des voiles de la solution béton. Les trames de poteaux-poutres utilisées dans le prédimensionnement précédent sont inchangées. On peut voir les voiles CLT sur la Figure 27 ci-dessous, en couleur bleue.

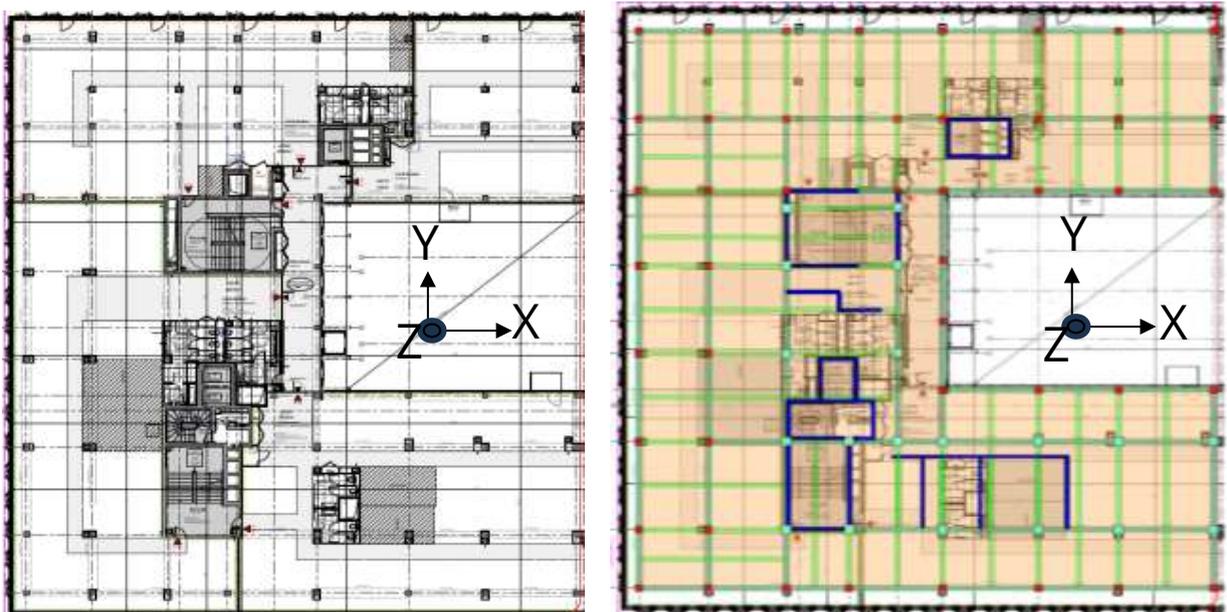


Figure 27 : Vue en plan d'un étage courant de bureaux de la solution béton (gauche) et CLT (droite) (source : auteur)

Ils forment ainsi les cages d'ascenseur et d'escalier, mais aussi certains murs de séparation de logements et les gaines techniques.

Une des contraintes de la solution est d'assurer la continuité des voiles depuis le niveau 0. En effet la solution béton permettait la reprise de certains voiles des 7 étages du bloc logement dans un niveau intermédiaire, à l'aide de poutres de reprise. Envisager la même chose en bois n'est pas possible à cause de la compression transversale et du cisaillement que subiraient les poutres de reprise. Cette continuité peut se faire en fixant des lambourdes le long des voiles pour supporter le plancher.

Une attention particulière a été accordée à ce que les voiles situés au RDC ne gênent ni les circulations de personnes, ni la circulation des véhicules dans l'entrée du parking souterrain voir Figure 62 en Annexes.

3.3.2 Solution 2 : contreventement par diagonales en façade

Le contreventement de cette solution se fait grâce à des poutres lamellé-collé placées en façade que l'on peut voir en jaune sur la Figure 28 ci-dessous.

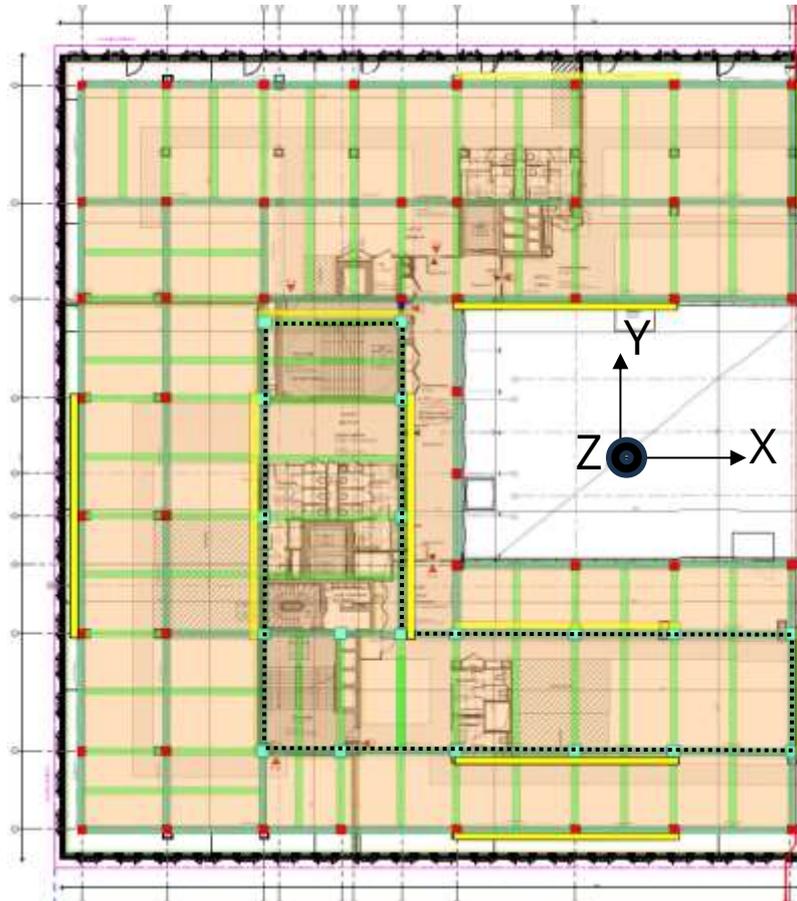


Figure 28 : vue en plan des emplacements des poutres diagonales de façade sur un étage courant de bureau. (source : auteur)

Les diagonales présentes à l'intérieur de l'étage courant de bureau sont issues des treillis de façade de la partie résidentielle dont on voit l'emprise en pointillés noir sur la figure ci-dessus. Les treillis sont répartis de manière symétrique dans le plan du bâtiment mais également en élévation. Les trames des diagonales se veulent les plus régulières, avec une élévation de 3 étages pour une à deux trames de poteaux. La vue en élévation de la Figure 29 ci-dessous explique ce principe de conception. Un autre objectif a été de placer les diagonales de sorte que les poteaux d'angles ne soient sollicités que par un seul treillis, pour que les ferrures d'assemblages ne soient pas trop complexes.

Une réflexion a été menée sur l'impact des diagonales sur les circulations et le niveau R+0 a ici aussi été limité, ce qui a conditionné le choix de la direction de départ des diagonales depuis leurs points d'accroche dans le sol. On peut voir les treillis situés sur les différentes façades sur la même figure ci-dessous.

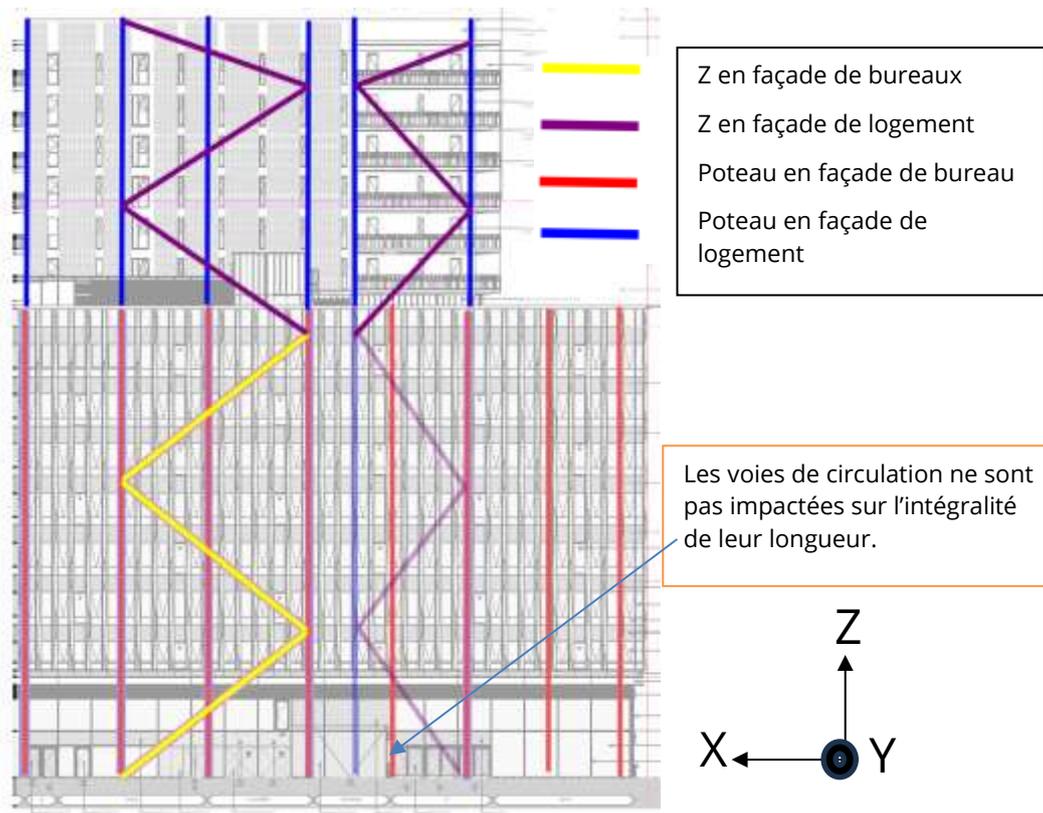


Figure 29 : choix des trames du contreventement par diagonales en façade n'impactant pas le passage des voitures. (source : auteur)

3.3.3 Solution 3 : contreventement par résille extérieure

La conception de cette solution prévoit de placer des trames de résille triangulaire en fonction des trames de base des poteaux de façade. On peut voir l'emplacement de la résille en bleu sur la vue en plan de la Figure 30 ci-dessous.

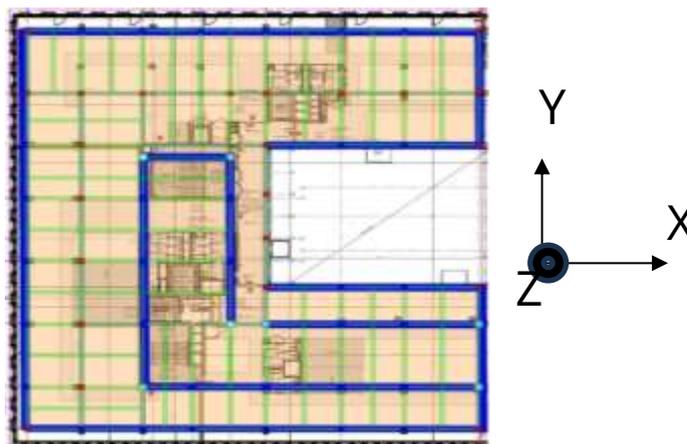


Figure 30 : emprise de la résille de façade sur un étage courant de bureau. (source: auteur)

Il a fallu faire attention au tramage des poutres d'un étage à l'autre. En effet, comme les poutres aboutissent aux sommets des triangles, cela induit un décalage des poutres secondaires d'une demi-trame lorsqu'on change d'étage. Cela a nécessité une vérification supplémentaire par rapport aux sections issues du prédimensionnement puisque les bandes portées d'un étage sur deux était changée. Finalement les sections utilisées initialement étaient correctes et ont pu être réutilisées. On peut voir ce décalage sur la Figure 31 ci-dessous.

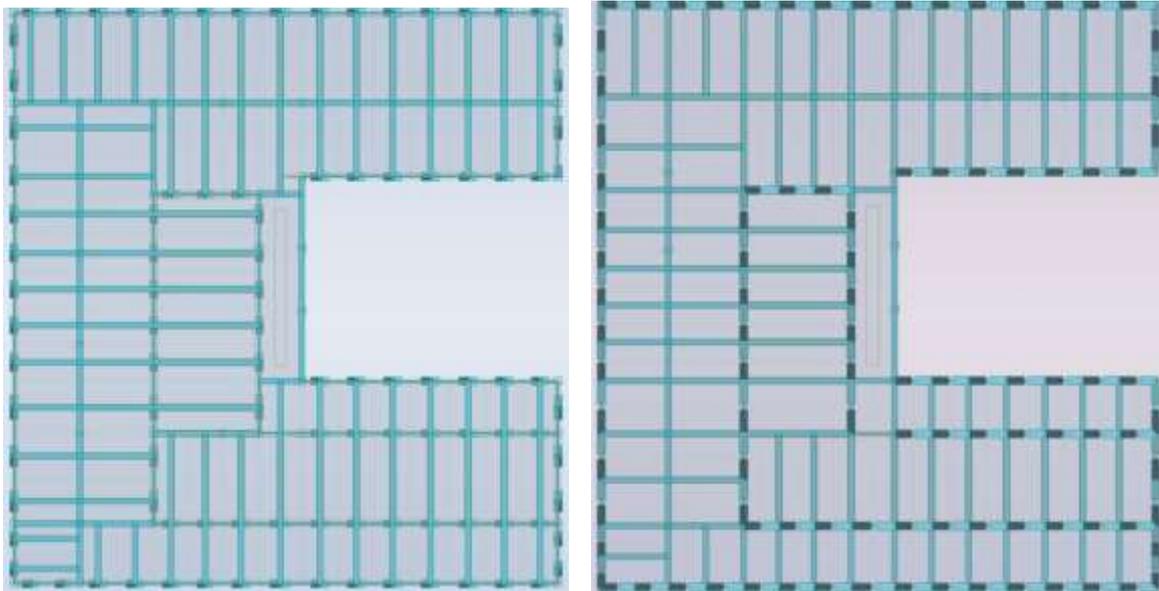


Figure 31 : Décalage des trames de poutres d'un étage à l'autre. (source: auteur)

Comme pour la solution par diagonales en façade, on doit assurer la continuité du contreventement issu des façades du bloc résidentiel jusqu'en bas de la tour. Ceci a un impact sur les circulations, puisque la résille qui contrevente les 15 étages traverse certains couloirs du bloc de bureaux. Une étude a été réalisée sur la largeur de passage permise par un triangle de résille. Celle-ci correspond à une unité de passage (1 UP). Or certaines circulations servant à l'évacuation des occupants requièrent 3 à 4 UP. La résille a été supprimée et remplacée par des poteaux ou élargie à ces endroits notamment au R+0, comme on peut le voir sur la Figure 32 ci-dessous.

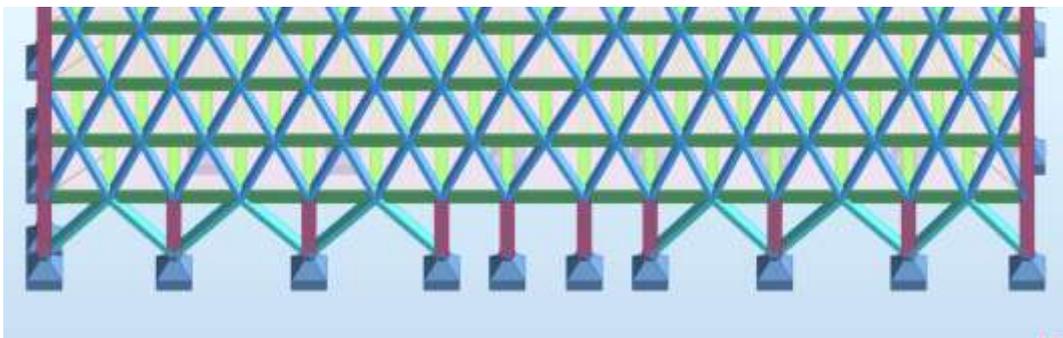


Figure 32 : élargissement ou suppression de la résille (en bleu) au R+0. (source: auteur)

L'absence de résille au niveau de l'atrium est volontaire et est due à la présence des gaines d'ascenseurs du bloc de bureaux.

L'impact sur la façade du bâtiment n'est pas moindre, c'est pourquoi les sections des éléments sont optimisées pour laisser entrer la lumière naturelle, avec une largeur supérieure à la hauteur comme on peut le voir sur la Figure 33 ci-dessous.

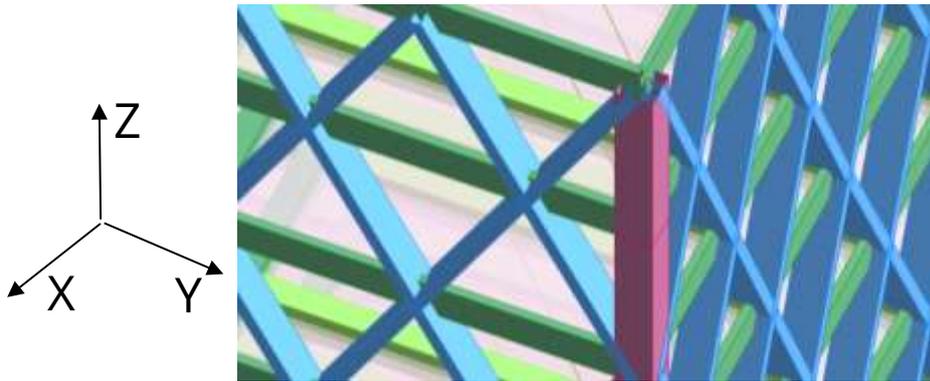


Figure 33 : Résille de façade (en bleu) laissant entrer la lumière naturelle. (source: auteur).

3.4 Etude des différentes solutions

Cette partie présente les différents modèles de contreventement que j'ai pu réaliser grâce au logiciel Robot Structural Analysis d'Autodesk (noté par la suite RSA).

Hypothèses de modélisation

Les poutres sont modélisées par des éléments finis 1D, les voiles par des éléments finis 2D, les planchers par des diaphragmes rigides.

Les encastremements étant difficiles pour des éléments bois, les éléments présentent des relâchements au niveau des liaisons.

3.4.1 Modélisation du bâtiment réel en béton

Présentation du modèle

La construction du modèle s'est faite à partir des plans structure de Setec bâtiment dont j'ai réutilisé les lignes de construction pour les trames des différents éléments. Les sections ont également été tirées directement des plans.

Hypothèses

Par soucis de simplicité, le matériau employé dans toute la structure est du béton C45 dont on a divisé le module d'élasticité par 2 pour tenir compte de la fissuration, selon l'Eurocode 8 lié au séisme. On prendra donc un module égal à 17 000 MPa.

Les voiles sont respectivement de 20 et 30 cm pour la partie logement et bureau, de même pour les épaisseurs moyennes de dalles qui sont de 20 et 24 cm.

Vues du modèle

Une vue d'ensemble du bâtiment sur la Figure 34 ci-dessous permet de visualiser les trames de poteaux-poutres ainsi que les voiles en béton (en gris).

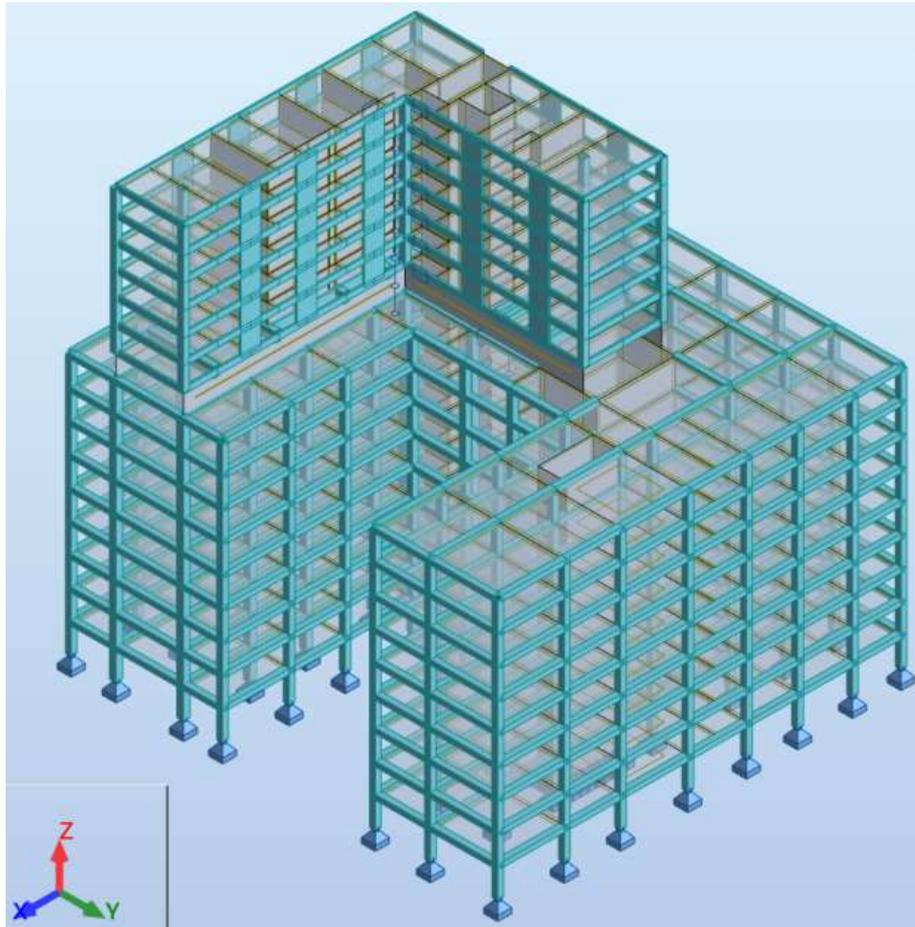


Figure 34 : Vue d'ensemble du modèle béton. (source: auteur)

Des vues plus détaillées des étages courants sont présentées Figure 35 :

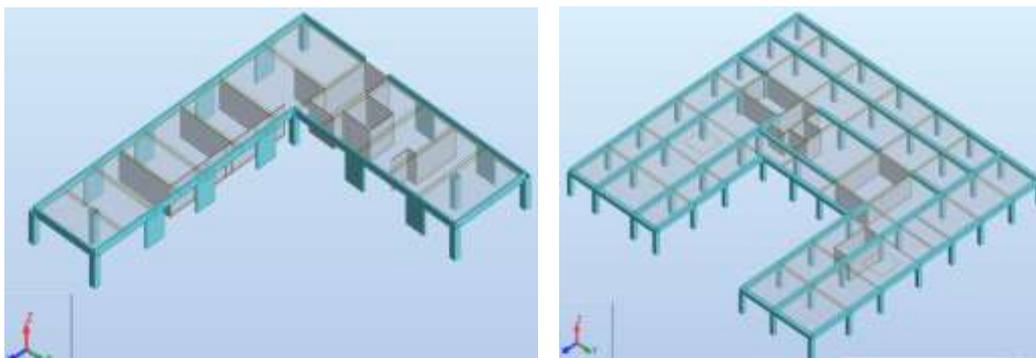


Figure 35 : vues en plan respectives d'étage courant de logement (gauche) et de bureau (droite) dans le modèle béton. (source: auteur)

Résultats en effort

La structure ayant déjà été vérifiée par l'étude précédente de mes collègues, j'ai préféré m'intéresser au déplacement du bâtiment.

Résultats de comportement au vent

En appliquant les charges de vent définies dans le Tableau 8 (combinaison ELS $1*w + 1*G + 0.7*Q$) aux poutres de rive, le bâtiment se déplace au maximum de 1,3 cm au dernier étage, comme on peut le voir sur la Figure 36 ci-dessous.

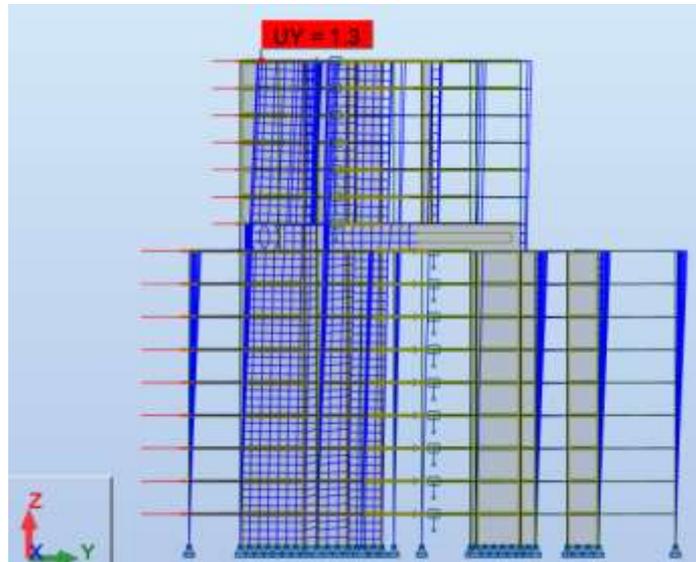


Figure 36 : Déplacement latéral du bâtiment en béton (cm) sous une charge de vent ELS.
(source : auteur)

En adoptant le critère $H/500$ où H est la hauteur totale du bâtiment qui est ici de 51.73 mètres, le déplacement horizontal maximal vérifie $1.3 < 10.3$ cm.

3.4.2 Modélisation de la solution 1 : contreventement par voiles en CLT

Hypothèses

Le bois utilisé dans les lamelles des panneaux CLT est de classe mécanique C24. Pour les modéliser sur RSA, j'ai utilisé les propriétés mécaniques homogénéisées sur l'épaisseur totale du sandwich [23]. Celles-ci tiennent compte de l'orthotropie du CLT. Les modules d'élasticité longitudinaux respectifs de panneaux de 20 et 28 cm sont 6600 et 6150 MPa, contre 11 000 MPa pour du C24 massif d'après la NF EN 338 [7].

Les voiles de façade du bloc résidentiel n'ont pas été conçus car ils auraient constitué une obstruction importante lors de leur prolongement par continuité dans la partie bureaux. Des trumeaux de 20 cm d'épaisseur et 2,4m de largeur, assimilés à des éléments finis 1D ont été utilisés en remplacement. Cette section particulière leur confère une meilleure rigidité de flexion que les autres types de poteaux employés dans la structure, afin de participer au contreventement.

Vues du modèle

Une vue d'ensemble du bâtiment sur la Figure 37 ci-dessous permet de visualiser les trames de poteaux-poutres ainsi que les voiles CLT dont la continuité est assurée jusqu'au R+0.

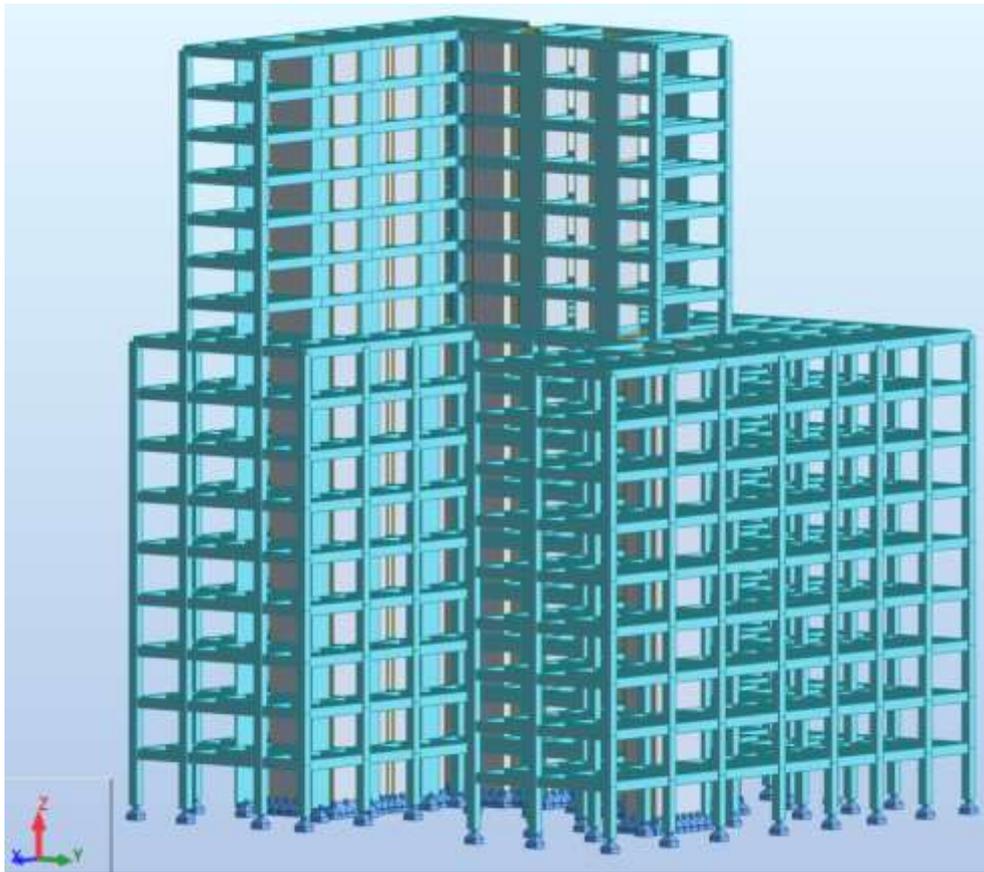


Figure 37 : Vue d'ensemble de la solution CLT. (source: auteur)

Des vues plus détaillées des étages courants sont présentées

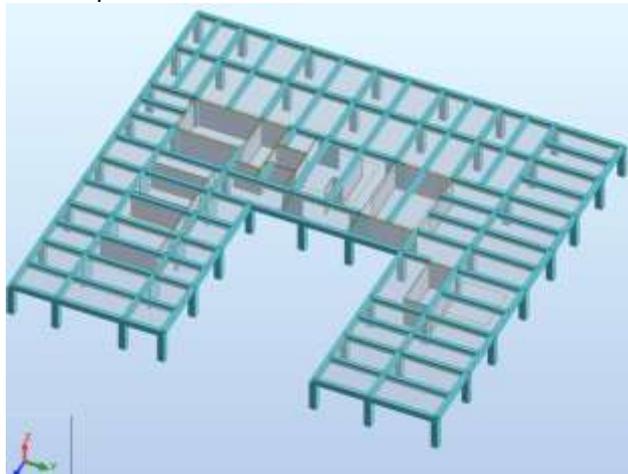
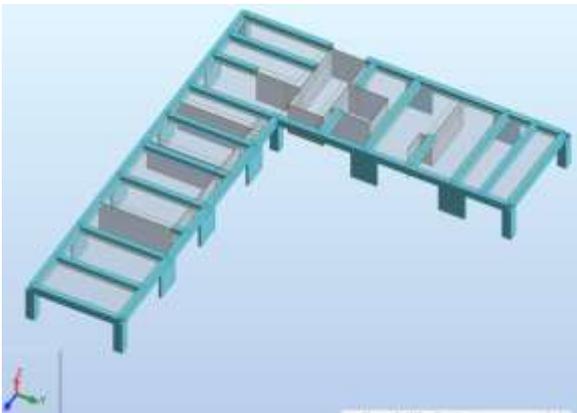


Figure 38 ci-dessous.

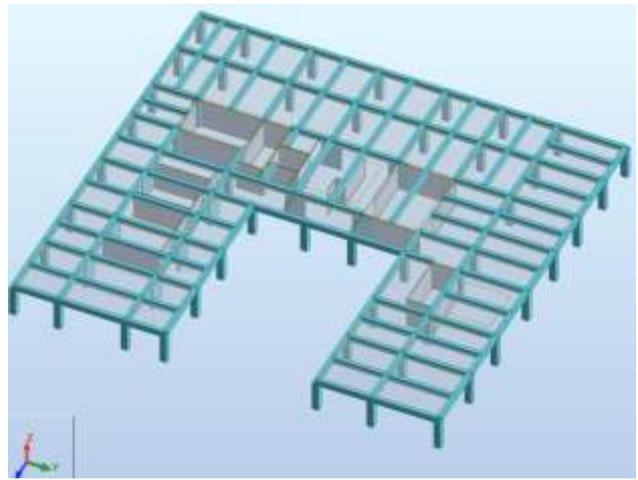
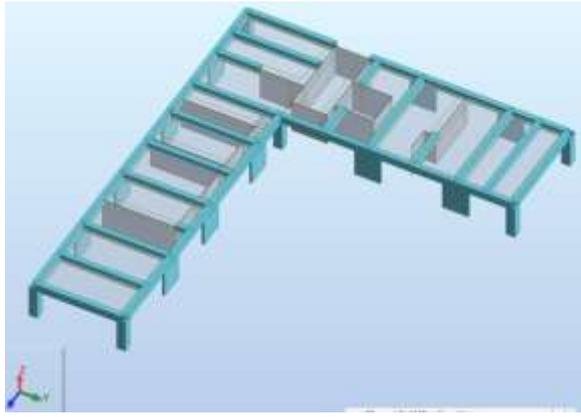


Figure 38 : vues en plan respectives d'étage courant de logement (gauche) et de bureau (droite) dans le modèle CLT. (source : auteur)

Résultats en efforts

Sur RSA il est possible de visualiser l'effort normal de membrane par unité de longueur (N_{yy}) résultant des charges gravitaires et de la surcharge liée au vent visible sur la Figure 39 ci-dessous.

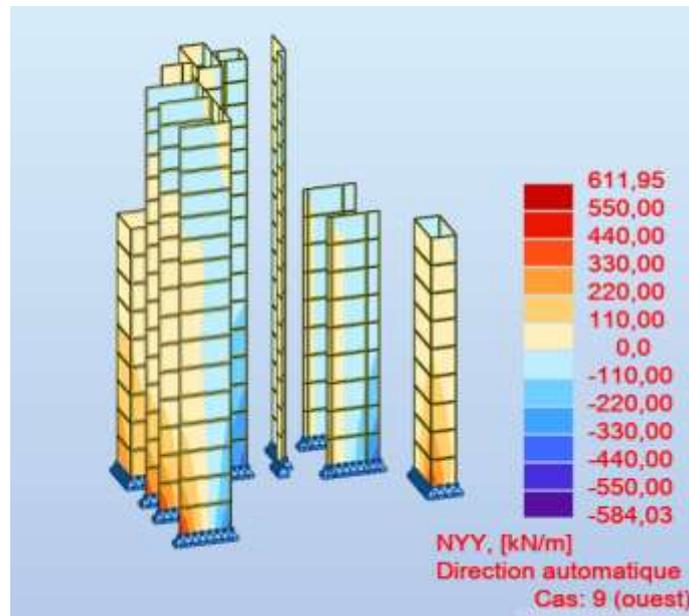


Figure 39 : Contraintes normales de membrane dans les voiles de refend sous un cas simple de vent (1*w).
(source : auteur)

Une manière de connaître cet effort est de réaliser une coupe sur panneau avec le logiciel, qui donne l'effort global sur la section (équivalent de l'hypothèse de Saint Venant pour les poutres), puis de diviser cette valeur par la longueur du voile pour obtenir N_{yy} . La méthode est la même pour obtenir l'effort de cisaillement par unité de longueur N_{xy} .

Le tableau suivant récapitule les sollicitations et taux de travail calculés avec CLTdesigner en fonction des cas de charge appliqués :

Tableau 9 : Vérifications aux ELU du voile CLT de 28cm le plus sollicité au R+0. Efforts en kN/m.

Cas ELU	k_{mod}	N_{yy}	N_{xy}	Flexion + compression	Voilement	Cisaillement net
1.35*G + 1.5*Q	0.8	750	0	35%	38%	-
1.5*W	1.1	+ - 500	110	-	-	21%
1.35*G + 1.05*Q + 0.75*S	0.9	657	0	27%	30%	-
1.35*G + 1.05*Q + 0.75*S	1.1	1157	110*	92%	100%	24%
*748 kN en tête de mur						

Le murs sont bien vérifiés pour ces efforts à l'ELU, un exemple de vérification au cisaillement sous CLT designer est visible Figure 63 en annexe

Résultats en déplacement

Comme en témoigne la Figure 40 ci-dessous, la structure contreventée par des voiles CLT se déplace six fois plus la structure en béton pour la même combinaison ELS ($1*w + 1*G + 0.7*Q$).

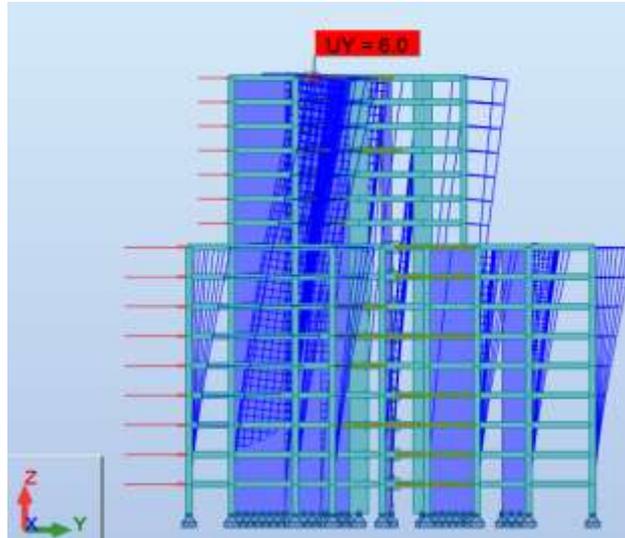


Figure 40 : Déplacement latéral (en cm) sous une charge de vent ELS selon Y+. (source : auteur)

En se basant sur un critère de déplacement de $H / 500 = 11,6$ cm, la déformée totale du bâtiment reste correcte.

3.4.3 Modélisation de la solution 2 : contreventement par diagonales en façade

Hypothèses

Dans ce modèle, une attention particulière a été placée sur les poutres diagonales, pour qu'elles n'induisent pas de flexion dans les poutres de plancher. Pour cela j'ai appliqué des relâchements aux nœuds d'intersection dans le modèle RSA.

Vues du modèle

Une vue d'ensemble du bâtiment sur la Figure 41 Figure 37 ci-dessous permet de visualiser les trames de poteaux-poutres ainsi que les diagonales en façade dont la continuité est assurée jusqu'au R+0.

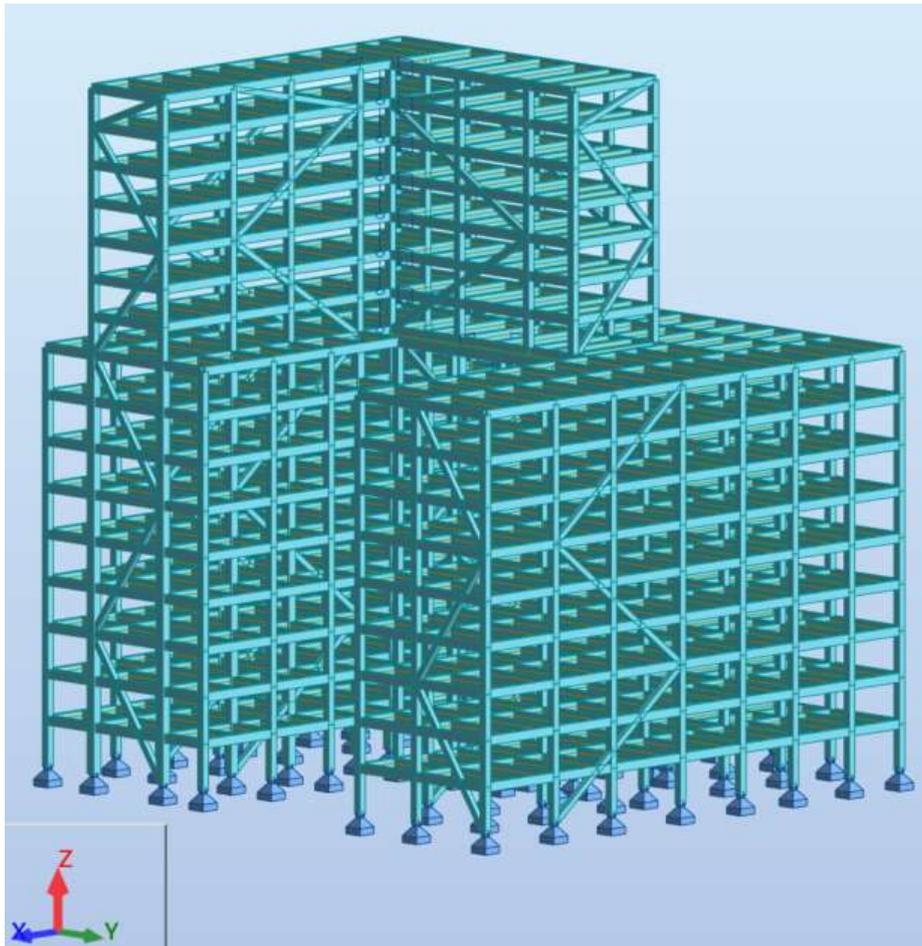


Figure 41 : Vue d'ensemble du modèle à diagonales en façade. (source: auteur)

Des exemples d'étages courants sont visibles sur la Figure 42 ci-dessous.

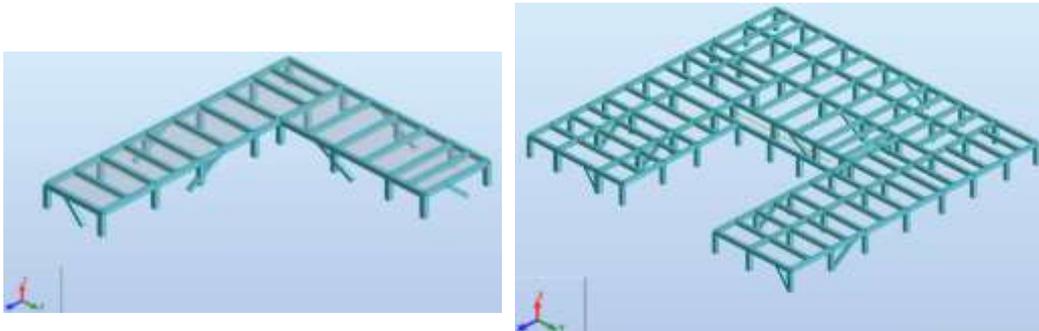


Figure 42 : vues en plan respectives d'étage courant de logement (gauche) et de bureau (droite) dans le modèle à diagonales de contreventement. (source : auteur)

Résultats en efforts

Les diagonales de contreventement assurent bien leur fonction, comme le montre la Figure 43 ci-dessous avec les zones tendues (jaune) et comprimées (bleu) du treillis.

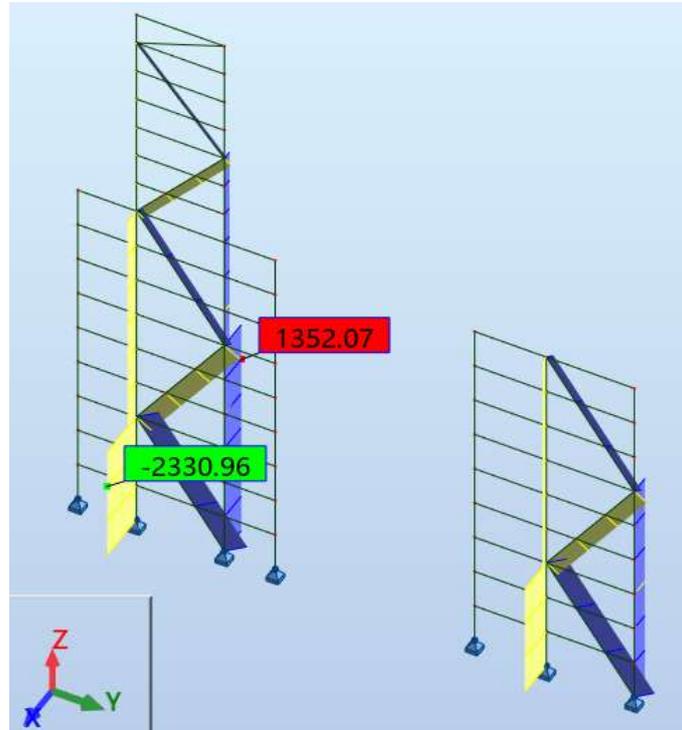


Figure 43 : Efforts axiaux maximaux (en kN) dans les treillis de contreventement sous 1*W, selon Y+.
source : auteur.

Les éléments dimensionnants des treillis sont les poutres et poteaux situées au R+0 qui reprennent les efforts latéraux de l'ensemble des étages supérieurs. On peut voir que sous la seule action du vent (1*W) les poteaux encaissent au maximum 1352 kN de compression additionnelle. On retrouve le même ordre de grandeur que dans le Mjøstårnet.

Les vérifications des taux de travail des porteurs dimensionnants donnent en compression + flexion :

- Poutre treillis 50 x 50 cm en GL28h :
 - o $N = 2672 \text{ kN}$ à l'ELU $1.35G + 1.05Q + 1.5W$: 56%.
- Poteau 80 x 80 cm en GL28h :
 - o $N = 9507 \text{ kN}$ à l'ELU $1.35G + 1.5Q$: 86 %
 - o $N = 8188 \text{ kN}$ à l'ELU $1.35G + 1.05Q + 1.5W$: 63 %

Le détail d'une vérification d'une diagonale de classe de service 3 est disponible Figure 64 en annexe. Les éléments sont bien vérifiés à l'ELU.

Résultats en déplacement

Comme en témoigne la Figure 44 ci-dessous, la structure contreventée par des diagonales en façade se déplace huit fois plus la structure en béton pour la même combinaison ELS ($1*w + 1*G + 0.7*Q$). Néanmoins, ce résultat se discute dans la mesure où le volume de bois employé dans le contreventement est moins important. Il pourrait être intéressant de comparer les différentes solutions à volume égale de contreventement dans un travail complémentaire.

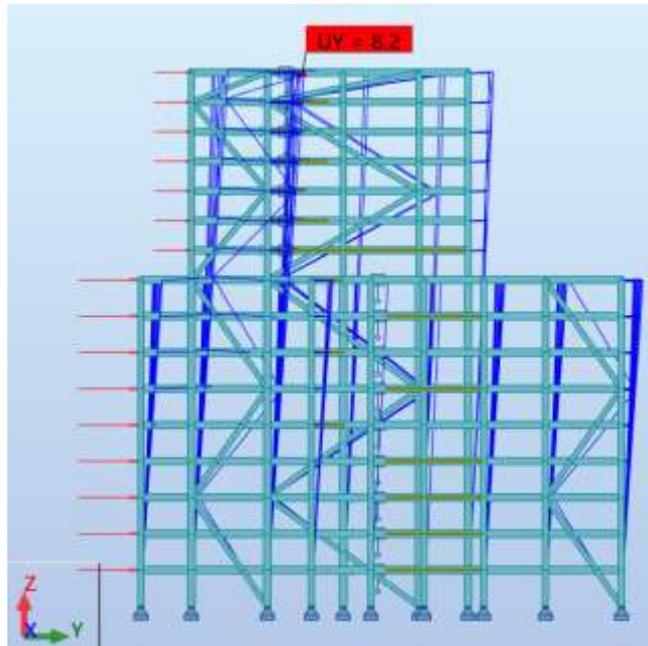


Figure 44 : déplacement latéral maximal (en cm) sous une charge de vent ELS selon Y+.
(source : auteur)

Le déplacement latéral atteint $8.2 \text{ cm} < H/500 = 11.6 \text{ cm}$ ce qui est légèrement plus important que la solution CLT.

3.4.4 Modélisation de la solution 3 : contreventement par résille extérieure

Hypothèses

Les principes et principales hypothèses ont été définies lors de la conception dans la partie 3.3.3.

Vues du modèle

Une vue d'ensemble du bâtiment sur la Figure 41 Figure 37 ci-dessous permet de visualiser les trames de résille dont la continuité est assurée jusqu'au R+0.

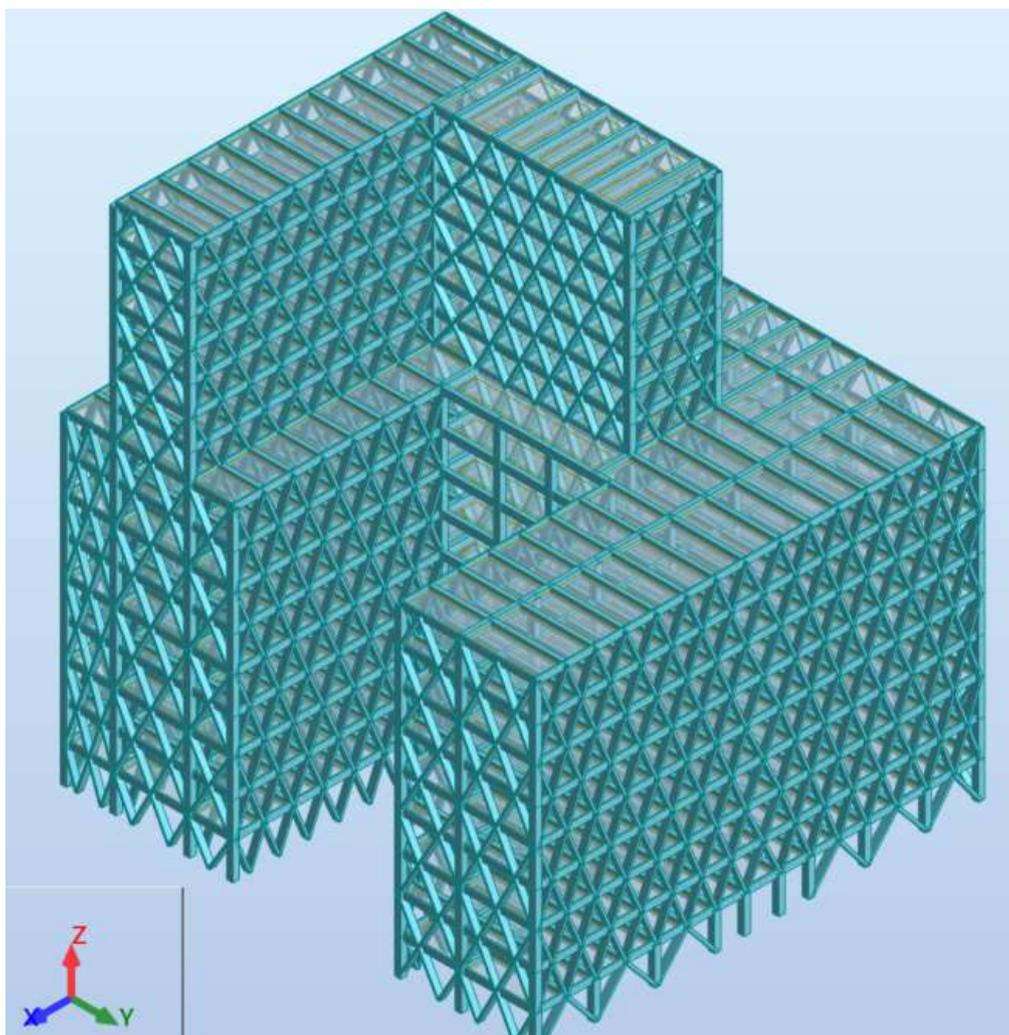


Figure 45 : Vue d'ensemble du modèle de résille en façade. (source: auteur)

Il s'agit du modèle le plus complexe, avec le plus grand nombre de nœuds (1821) pour 5300 éléments. On comprend l'intérêt d'utiliser un logiciel de calcul qui effectue les vérifications de toutes les pièces de la structure, cela représenterait beaucoup de temps pour une personne humaine.

Des exemples d'étages courants sont visibles Figure 46 ci-dessous.

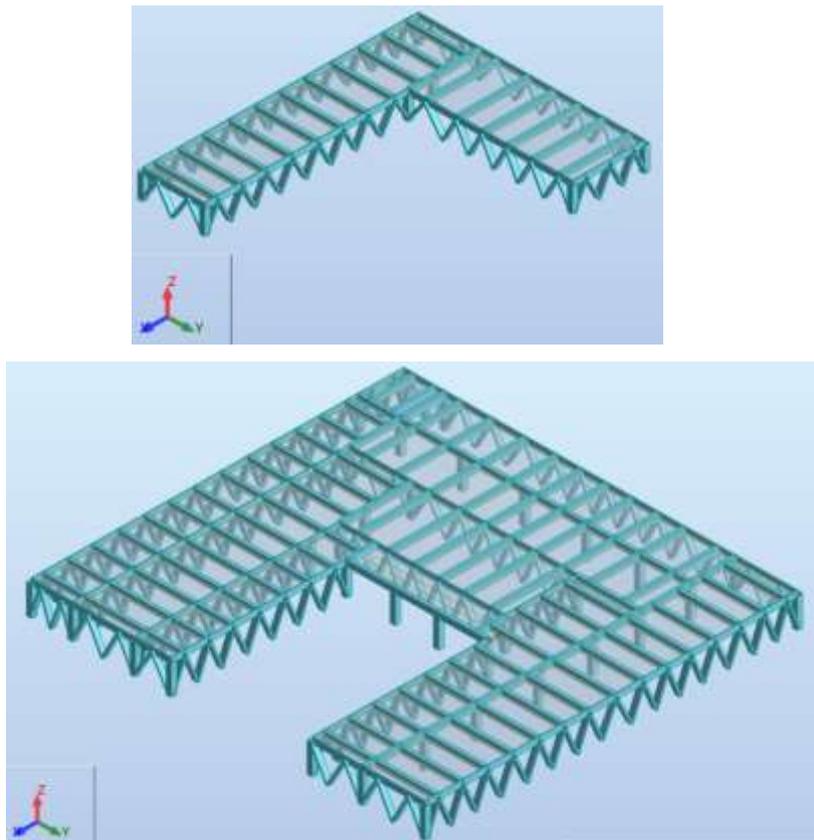


Figure 46 : vues en plan respectives d'étage courant de logement (en haut) et de bureau (en bas) dans le modèle résille (source : auteur)

Résultats en efforts

La résille assure bien sa fonction de contreventement, comme le montrent les zones tendues (jaune) et comprimées (bleu) visibles sur la Figure 47 ci-dessous.

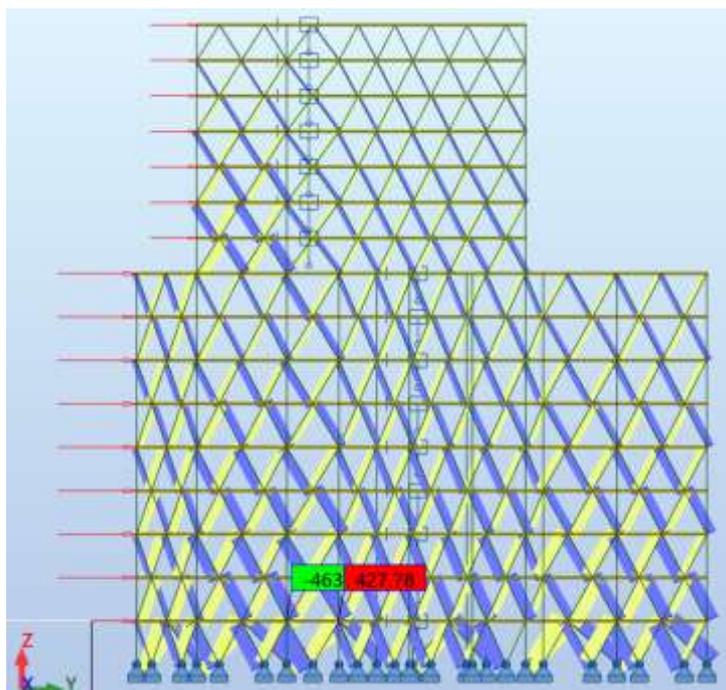


Figure 47 : Efforts axiaux maximaux (en kN) dans la résille sous 1*W, selon Y+. source : auteur.

Les vérifications des taux de travail des porteurs dimensionnants donnent en compression + flexion :

- Poutre de la résille 24 x 70 cm en GL28h :
 - o sous $N = 1732 \text{ kN}$ à l'ELU $1.35G + 1.5Q$: 81%
 - o sous $N = 926 \text{ kN}$ à l'ELU $1.35G + 1.05Q + 1.5W$: 42 %.
- Poteau 70 x 70 cm en GL24h :
 - o sous $N = 5631 \text{ kN}$ à l'ELU $1.35G + 1.5Q$: 75 %

Les sections des éléments de la résille sont donc dimensionnées par les efforts gravitaires. Les poteaux et bracons substituant la résille au R+0 au niveau des ouvertures ont également été vérifiés mais ne sont pas dimensionnants.

Résultats en déplacement

Comme en témoigne la Figure 48Figure 44 ci-dessous, la structure est nettement plus rigide que celle des deux autres solutions en bois, avec un déplacement de 1.2 cm sous la combinaison ELS ($1*w + 1*G + 0.7*Q$). Ce déplacement est du même ordre de grandeur que la solution béton. Nous respectons le critère $H/500$.

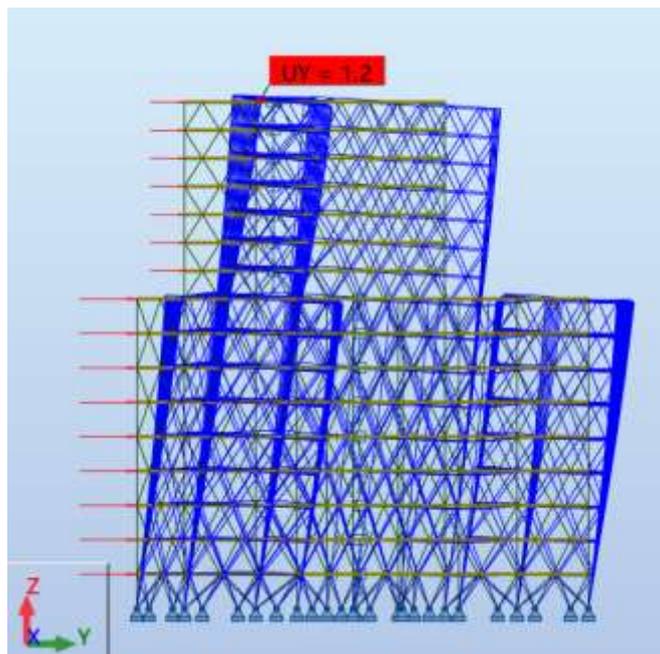


Figure 48 : déplacement latéral maximal (en cm) de la résille sous une charge de vent ELS selon Y+.
(source : auteur)

4. Comparaison des bâtiments

On trouvera dans cette partie une comparaison des différentes solutions à partir de critères comme la hauteur finale de bâtiment, le déplacement maximal du dernier étage lié au vent, les masses totales, l'empreinte carbone et le coût de la structure.

4.1 Comparaison des modèles

4.1.1 Hauteur finale des bâtiments

La hauteur des bâtiments est régulée par le Plan Local d'Urbanisme (PLU). Elle joue également un rôle important dans son intégration dans le paysage urbain, le montant des charges de copropriété... En conservant le même nombre d'étages, les solutions bois font toutes 58m, soit 6.27m de plus que le bâtiment existant en béton. La forme globale du bâtiment ne change pas significativement. On peut voir les différentes hauteurs des modèles sur la Figure 49 ci-dessous.

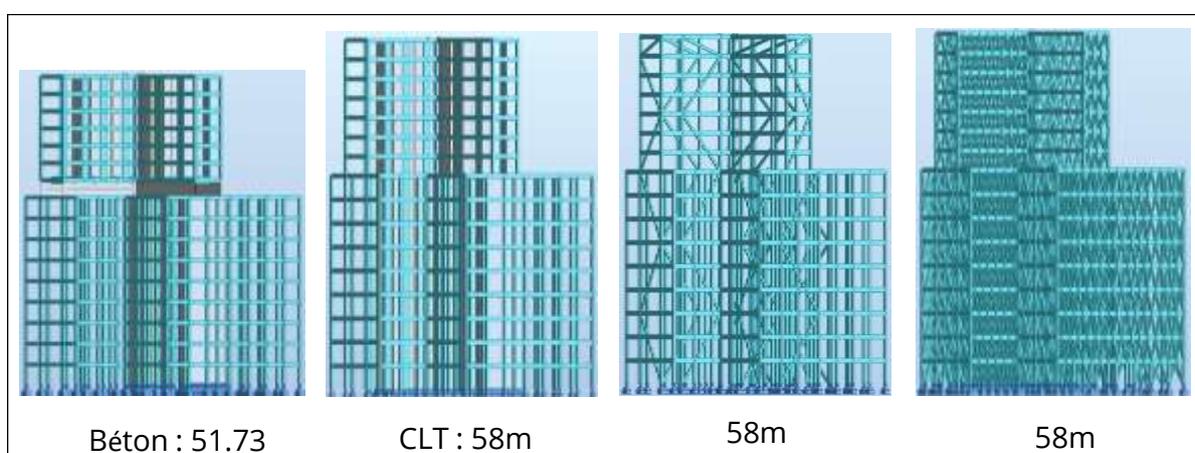


Figure 49 : hauteurs finales des bâtiments présentées dans leur ordre d'apparition.
(source : auteur.)

Si l'on veut conserver la même hauteur de bâtiment avec une solution bois, on doit construire deux étages en moins ce qui constitue une perte économique pour le maître d'ouvrage.

4.1.2 Masse totale des bâtiment

Les masses comparées ici correspondent aux masses des éléments porteurs et de contreventement (poutres, poteaux, voiles, planchers). La comparaison entre béton et bois devant être à fonction égale, une masse liée à la protection incendie et au complexe acoustique a été calculée et rajoutée pour chaque solution bois. La masse totale est obtenue en multipliant chaque masse d'étage par le nombre d'étage propre à chaque bloc (respectivement 7 et 9 pour les logements et les bureaux en incluant le R+0). Le diagramme de la Figure 50 ci-dessous montre les différences de masse entre les différents bâtiments.

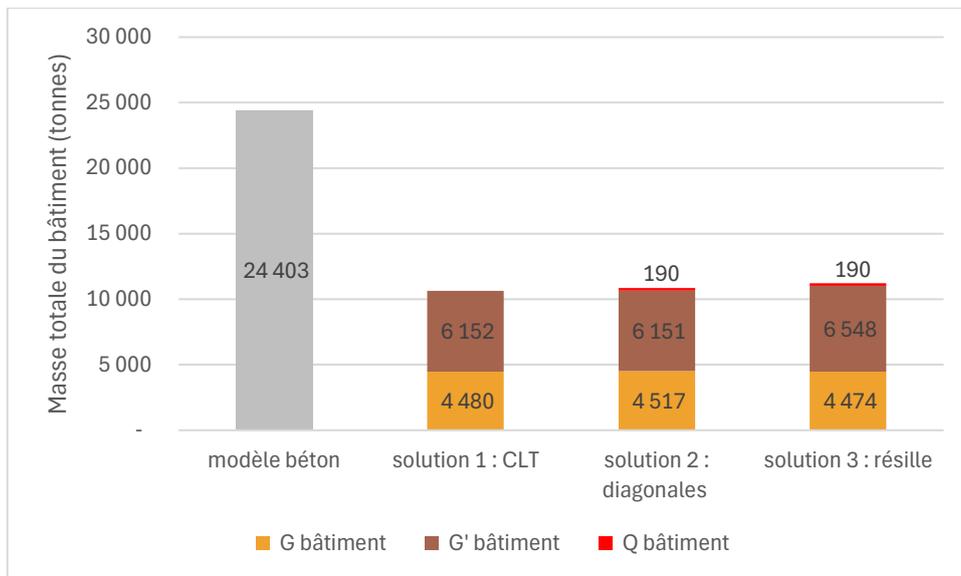


Figure 50 : répartition des masses de structure (G), des masses liées au complexe acoustique / protection incendie (G') et des cloisons / gaines (Q). Source : auteur.

La masse totale des solutions bois est deux fois moins importante que pour le bâtiment existant (Figure 50). Cela réduit directement les dimensions du complexe de fondations qui devront supporter moins de charge. Une diminution du coût et de l'empreinte carbone des fondations est alors prévisible. Néanmoins, les problèmes de surpressions du sol pourraient modifier de tels résultats en exigeant une structure suffisamment lourde.

4.1.3 Efficacité du contreventement

Un des principaux objectifs de ce TFE était d'évaluer l'efficacité du contreventement d'un bâtiment en bois de plus de 50m de haut. La Figure 51 ci-dessous montre les performances des différents modèles construits.

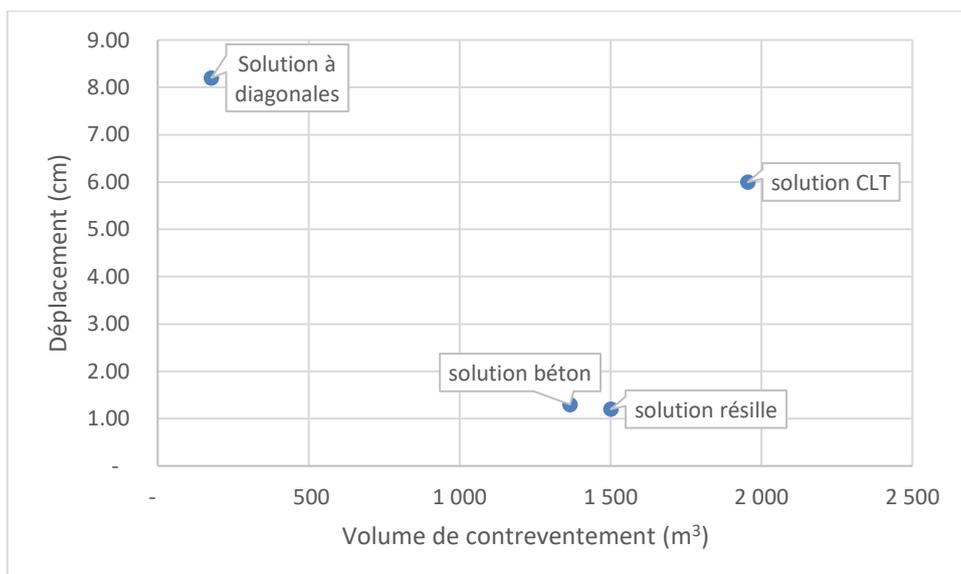


Figure 51 : Comparaison des déplacements rapportés à la proportion de contreventement dans chaque bâtiment. Source: auteur

Même si le déplacement maximal est atteint pour la solution à diagonales de façade, si on rapporte celui-ci au volume de bois employé dans son contreventement (qui est le plus faible), il s'agit de la solution la plus efficace.

4.1.4 Impact sur l'environnement

Bilans carbone

Il peut être intéressant de calculer le bilan carbone de chaque solution et de la comparer avec les seuils de la RE2020 à venir sur les Figure 52 et Figure 53 ci-dessous.

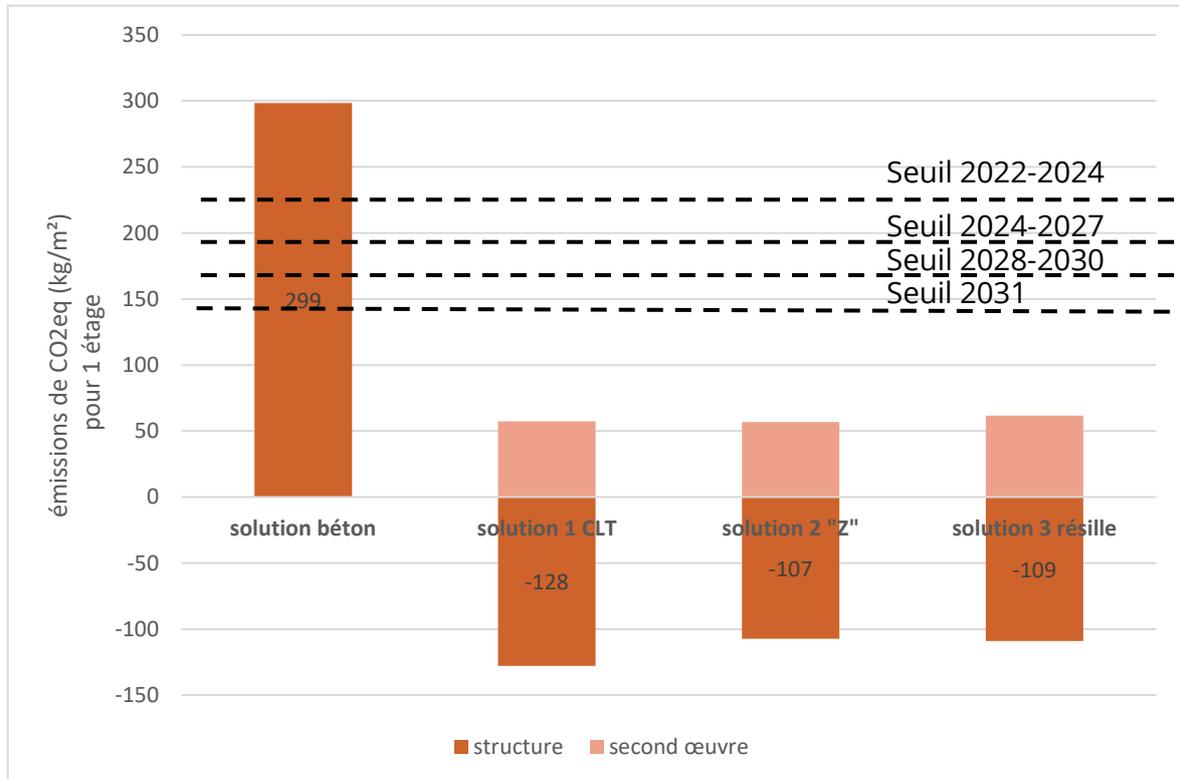


Figure 52 : bilans carbone des différentes solutions pour 1 m² d'étage de logement. (source : auteur)

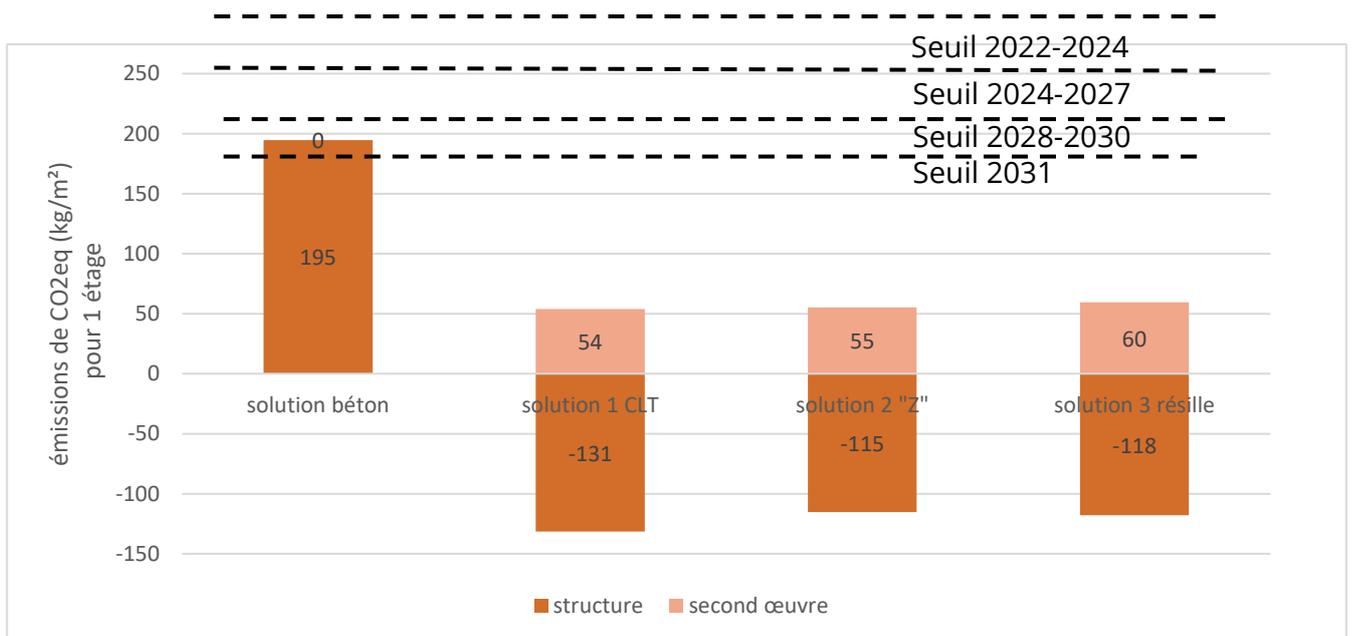


Figure 53 : bilans carbone des différentes solutions pour 1 m² d'étage de bureaux. (source : auteur)

La solution béton pour le bloc logement dépasse de deux fois le seuil 2031 de la RE2020. Il aurait été intéressant de déterminer par composant (plancher, voile) quel seraient les éléments à remplacer par du bois pour atteindre les seuils réglementaires.

La forte diminution de l’empreinte carbone de la solution béton pour des bureaux comparée aux logements vient de la structure dalle - poteaux - poutres qui demande moins de béton au m² que la structure dalle – voiles.

Dans les deux cas le bilan carbone par ACV dynamique au sens de la RE2020 des solutions bois est négatif, même après avoir rajouté les composants d’acoustique et de sécurité incendie pour comparer le béton et le bois à performances égales. Ces solutions constituent donc des puits de carbone.

Impact sur l'exploitation forestière

Les bilans carbones précédents ne se focalisent que sur les émissions de CO₂. D’autres impacts comme le besoin en eau ou la déforestation devraient être pris en compte pour comparer véritablement sur tous les aspects les différentes solutions

Dans la suite nous chercherons à déterminer la surface de forêt qu’il faudrait exploiter pour construire le bâtiment avec une structure tout en bois.

Les volumes de bois de chaque solution sont visibles Figure 54 :

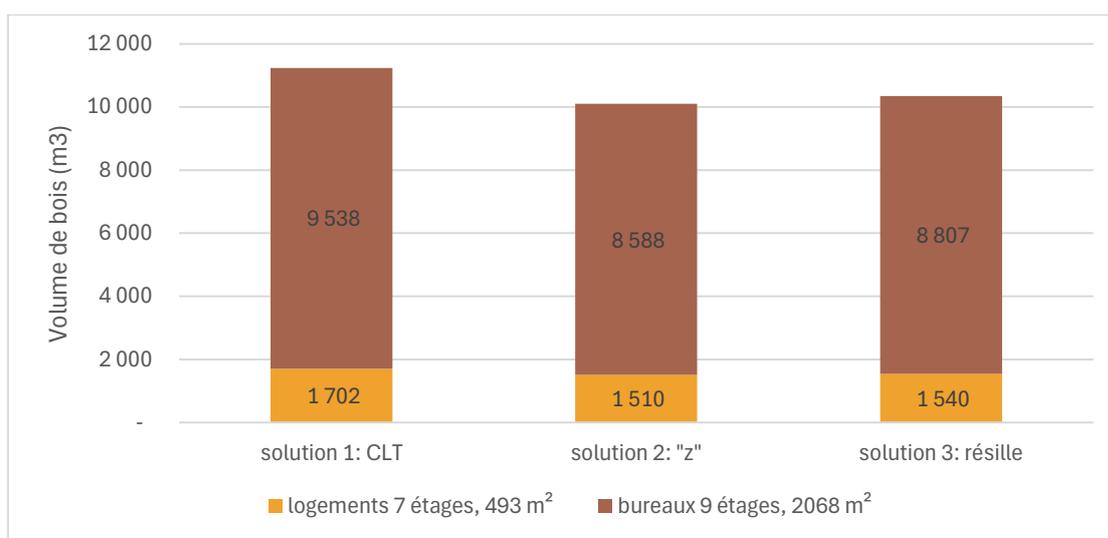


Figure 54 : Volumes de bois nécessaires à la construction du bâtiment, par bloc. Source: auteur

En France, l’IGN (Institut National d’Information Géographique et Forestière) publie des inventaires forestiers sur son site internet. L’inventaire de 2023 [24] dresse notamment un bilan des flux par essence. Cela correspond à la différence entre les flux de bois vivant entrant (production biologique) et sortant (prélèvements et mortalité) d’une même essence, valable pour la période 2013-2021. Les taux de prélèvements révèlent que certaines espèces sont en surexploitation (taux > 100%), comme l’épicéa (193%).

Les résineux qui pourraient nous intéresser pour du lamellé collé et du CLT doivent avoir un taux inférieur à 100. Comme évoqué en 2.3, le douglas et le sapin (71%) ou le pin sylvestre (74%) pourraient faire l’affaire.

Pour cette estimation prenons par exemple une seule essence pour produire notre bâtiment en bois. Si l'on prend le douglas français, il reste à déterminer quelle part du volume disponible après bilan des flux peut effectivement servir à la production de lamellé-collé ou de LCT, en supposant que 40% du volume du tronc est effectivement utile à la production des lamelles.

Le bilan annuel net du douglas est de 0.1 m³ / ha de forêt / an tous diamètres confondus. Or le bilan annuel en millions de m³ par an est de 0.45 pour le gros bois (47.5 à 67.5 cm de diamètre) et de 1.7 tous diamètres confondus. Par produit en croix on obtient 0.0266 m³ / ha / an de gros bois produit pour le douglas.

En moyenne notre bâtiment requiert 10500 m³, ce qui représenterait une exploitation de $\frac{10500}{40\% \cdot 0.0266} = 986\,842 \text{ ha} \cdot \text{an}$. Cela représente une superficie de 98.68 km² soit deux fois la superficie de Lyon (47.87 km²). Même si ce chiffre est important, il reste à nuancer au regard de la superficie actuelle des forêts françaises ainsi qu'à la proportion effective de bâtiments neufs en bois qui seront construits à l'avenir et de leurs dimensions propres.

4.1.1 Coût des bâtiments

Les hypothèses suivantes ont été effectuées pour estimer les différents coûts (Tableau 10 et Tableau 11).

Tableau 10 : hypothèses de prix unitaires des matériaux. Source: Setec

Type	Unité	Coût unitaire (€) (HT)
Bois lamellé collé	m ³	2000
CLT d'épaisseur 20 cm	m ²	300
Béton	m ³	300
Aciers HA	kg	3,5
Coffrage	m ²	50
Plaque de plâtre BA 18	m ²	20
Chape sèche 10 cm	m ²	150
Cloisons	m ²	150

Ici la ligne « cloisons » est utilisée dans les solutions dont les voiles porteurs de séparation du bâtiment en béton ont été enlevés. Cela concerne toutes les solutions bois sauf la solution CLT.

Tableau 11 : hypothèses de ratios de ferrailage des éléments en béton armé. Source : Setec

Type	Unité	Quantité d'acier HA
Poutres courantes	kg/m ³	150
Poteaux	kg/m ³	120
Voiles	kg/m ³	80
Dalles	kg/m ³	70

La surface hors d'œuvre brute (SHOB) en incluant tous les étages est de $7 \cdot 493.45 + 9 \cdot 2068.07 = 22067 \text{ m}^2$. L'emprise au sol du bâtiment (socle) est de 2068.07 m^2 .

Les différents graphiques de cette section (Figure 55 et Figure 56 ci-dessous) montrent que les solutions bois sont plus onéreuses que la solution béton. Si l'on compare les deux matériaux à performances égales, à savoir assurer la portée définie par le plan architecte, maintenir un confort acoustique correct et garantir une stabilité au feu avant la ruine du bâtiment, un mètre carré de solution bois est environ deux fois plus cher qu'un mètre carré de solution béton, indépendamment de la hauteur.

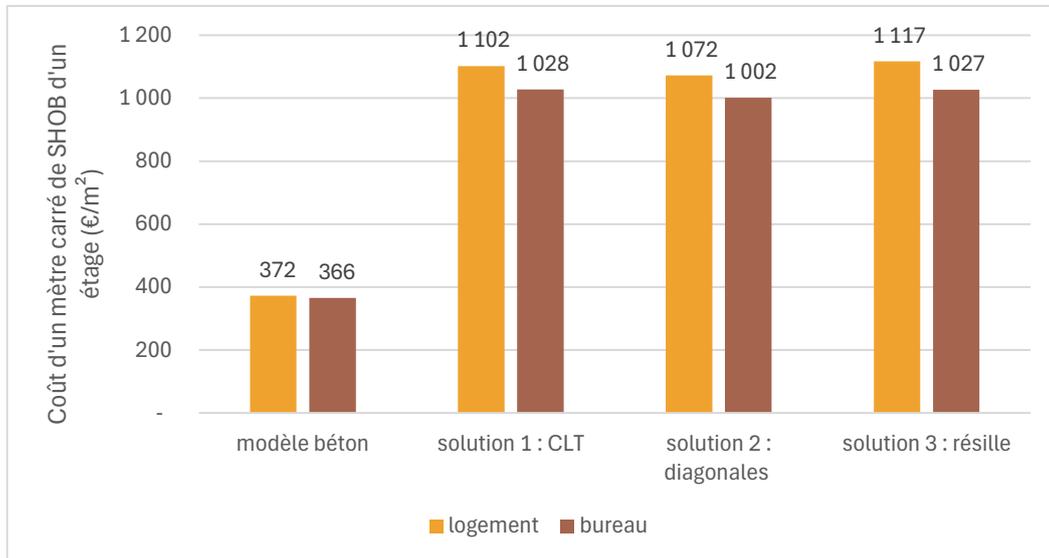


Figure 55 : coût d'un étage type par solution. (source: auteur)

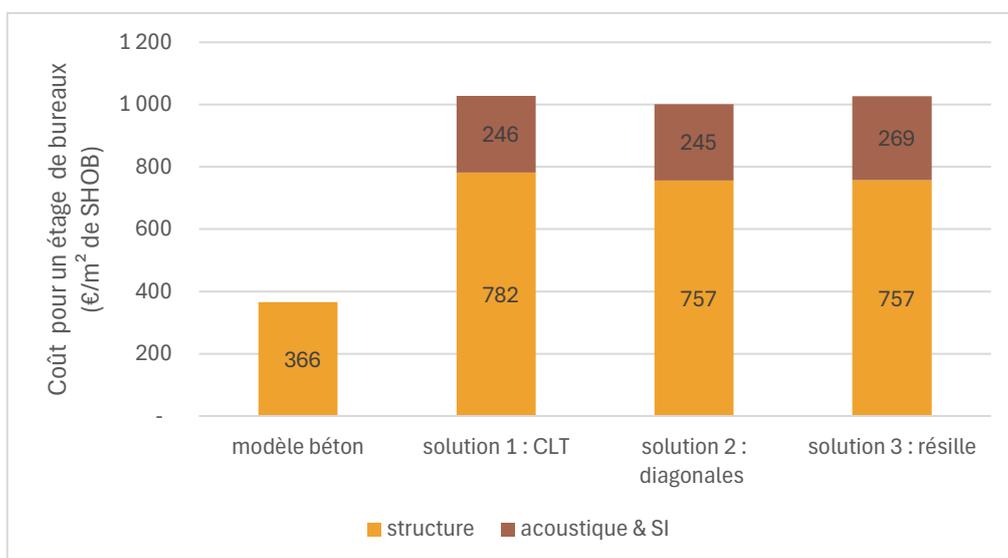


Figure 56 : répartition des coûts pour 1m² de SHOB d'étage courant de bureau. (source: auteur)

Si maintenant on tient compte en plus de la surélévation de 6m, l'équivalent de deux étages de logement en béton, la vente d'un projet en bois face à un projet béton serait déficitaire de deux étages de logement, chacun d'une SDP DE 469 m² à Lyon 03. En considérant qu'il s'agit d'habitat sociaux supposés à 2000€ /m² à la vente, le projet bois engrangerait 1,876 M€ de moins que le projet béton uniquement sur cet aspect de perte d'étages lié à l'augmentation de la hauteur inter-étage. Le calcul n'inclut pas les aciers d'assemblage des éléments bois et pourrait faire l'objet d'une étude ultérieure.

Conclusion sur la comparaison

Les solutions de contreventement en bois proposées sont toutes fonctionnelles pour un immeuble de 58 mètres de hauteur. La solution la plus performante est la solution à diagonales en façade, car c'est celle qui a le meilleur rapport entre son déplacement horizontal sous un chargement de vent et son volume de bois employé dans le contreventement du bâtiment. Bien que plus légères et offrant une meilleure empreinte carbone, les solutions bois impliquent des défis économiques et techniques, comme l'optimisation de l'épaisseur de complexe de plancher. La hauteur additionnelle entraîne une perte d'étages, affectant la rentabilité du projet. De plus, leur coût sensiblement plus élevé que celui de la solution béton remettent en question leur compétitivité économique.

4.2 Pistes de développement

En disposant de plus de temps, des points auraient pu être explorés pour compléter ce TFE.

4.2.1 Réponse au séisme

Les efforts liés au séisme sont parfois dimensionnants pour une structure. En bénéficiant de plus de temps, on aurait pu caractériser le comportement du bâtiment face aux charges sismiques, en vérifiant la stabilité de la structure et des éléments ici dimensionnés par rapport aux charges gravitaires et au vent. On pourrait également vérifier le critère de confort lié à l'accélération du bâtiment lors du séisme.

4.2.2 Optimisation des sections des porteurs verticaux avec la hauteur

Les solutions bois étant onéreuses, le gain de matière est essentiel pour économiser de l'argent tant que la structure reste stable. Ainsi, une réduction progressive des sections des poteaux et des voiles aurait pu être menée en fonction de la hauteur de chaque étage par rapport au sol, tout en vérifiant les sections selon l'Eurocode 5. Néanmoins, il faudrait être vigilant aux discontinuités entre sections qui pourraient causer un effet d'écrasement du bois.

4.2.3 Collaboration avec l'architecte pour un tramage plus simple

Nous l'avons vu lors de la modélisation des solutions faisant appel à des diagonales en façade ou de la résille, les trames existantes des poteaux ont conditionné l'emplacement des nœuds des éléments de contreventement. Dans les deux cas, les géométries se sont voulues les plus régulières possibles même si elles ne l'étaient pas à 100%.

Ainsi, pour diminuer l'effet d'obstruction des diagonales de façade ou de la résille, une collaboration avec l'architecte aurait pu être menée pour dans un premier temps dessiner les treillis de contreventement sur la façade nue, puis décider du tramage des poteaux et des sorties de secours au R+0.

5. Conclusion

Au terme de ce TFE j'ai su concevoir quatre solutions bois fonctionnelles pour un immeuble dépassant 50m de hauteur, en variant peu son élancement par rapport à sa version béton. L'architecte a donc plusieurs choix possibles. Cela permet d'engager le dialogue avec les différents acteurs du projet autour de solutions constructives respectant le climat.

La comparaison m'a permis de fournir à mes collègues des chiffres repères et de mettre en avant les contraintes liées à chaque solution. J'ai pu construire 4 modèles 3D fonctionnels à l'aide du logiciel RSA, qui pourront servir aux personnes intéressées par ce travail. Les résultats montrent que la résille extérieure est compétitive bien qu'elle soit la plus chère à mettre en œuvre. Le contreventement par voiles en CLT est le moins efficace des trois solutions car il demande beaucoup de matière pour faire gagner peu de rigidité à la structure. La meilleure solution de contreventement est alors celle par diagonales en façade car c'est la moins cher des trois et elle est la plus rigide par rapport à son volume de bois employé en contreventement.

J'ai pu me rendre compte des limites structurelles que permettent le CLT et le bois lamellé collé dans un tramage initialement prévu pour du béton armé. Cela a eu un impact architectural direct, car la hauteur inter-étage et les sections des éléments porteurs ont augmenté. Nous sommes même entrés dans la catégorie IGH à cause de la surélévation. Il serait intéressant d'approfondir l'optimisation de l'espace inter-étage ainsi que les réservations dans les poutres de plancher. Néanmoins, le poids du bâtiment est quasiment divisé par deux ce qui réduit les dimensions et le coût des fondations.

J'ai également pu me rendre compte du coût que représente un projet bois par rapport à un projet en béton armé. Bien que la donnée du prix d'un matériau soit fluctuante, le bois reste un matériau cher, conduisant à des prix de projets bien plus importants que pour des solutions traditionnelles en béton ou en acier. L'adhésion d'une maîtrise d'ouvrage à un tel projet relèverait donc d'une volonté écologique ou d'un choix de luxe pour un bâtiment fait d'un matériau noble. De plus, construire à une telle hauteur en bois n'est pas rassurant pour les pompiers.

L'impact écologique est bien moins important et cela même en rajoutant les complexes acoustiques et de sécurité incendie si l'on compare les matériaux à performances égales. Cela se traduit notamment par le respect des seuils RE2020 d'émissions de CO₂ dans les secteurs résidentiels et tertiaires neufs, mais aussi par la réduction de nuisances sonores durant les chantiers, l'utilisation de moins d'énergie et de polluants tout au long de son cycle de vie.

Ce stage m'a permis de découvrir plus en profondeur les structures bois. J'ai réalisé mes premières minutes et ai développé d'avantage mes compétences en modélisation. J'ai appris à confronter et à questionner les résultats que j'obtenais, ce qui m'a permis d'aiguiser ma rigueur scientifique et développer ma méthodologie ingénieur. J'ai pris du plaisir à mobiliser l'ensemble de mes connaissances issues de ma formation en mécanique des structures aux Mines de Saint-Etienne, notamment les théories des poutres et plaques composites en l'appliquant au CLT et au lamellé collé. J'ai aussi fait de nombreux rapprochements avec les cours suivis à l'ENTPE durant ma troisième année sur les calculs de structures spécifiques au bâtiment, notamment les descentes de charge et les vérifications aux Eurocodes. Ainsi, j'ai regroupé de nombreux aspects de ma formation en études supérieures pour aboutir à une comparaison de quatre modèles fonctionnels qui servira aux ingénieurs du groupe lors des futurs projets de construction bois.

Références bibliographiques

- [1] Ministère de la transition écologique et solidaire, « Stratégie nationale bas-carbone révisée complète », 2020.
- [2] Direction des transports et de la protection du public, « Doctrine pour la construction des immeubles en matériaux biosourcés et combustibles », 20 juillet 2021.
- [3] K. Calvin *et al.*, « IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. », Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), juill. 2023. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- [4] Christophe Béchu, Agnès Pannier-Runacher, et Olivier Klein, « Dossier de concertation: Accélérer la décarbonation du secteur du bâtiment », juin 2023.
- [5] Nicolas CABASSUD, « Réglementation environnementale des bâtiments neufs (RE 2020) ». Cerema Méditerranée, janvier 2024.
- [6] Setec, « MANIFESTE pour une construction bas carbone », juin 2022, [En ligne]. Disponible sur: <https://www.setec.fr/wp-content/uploads/2023/12/Manifestepouruneconstructionbascarbone.pdf>
- [7] « NF EN 338 - Bois de structure - Classes de résistance ». 2016.
- [8] B. Orta, J. Martínez-Gaya, J. Cervera, et J. Aira-Zunzunegui, « Timber high rise, state of the art », *Informes de la Construcción*, vol. 72, p. 346, juin 2020, doi: 10.3989/ic.71578.
- [9] C. T. du Bâtiment (CTB), « Douze poutres XXL usinées puis livrées - Cahiers Techniques du Bâtiment (CTB) », janv. 2021, Consulté le: 22 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/douze-poutres-xxl-usinees-puis-livrees.49149>
- [10] AFNOR, « norme française NF EN 14080 - Structures en bois - Bois lamellé collé et bois massif reconstitué - exigences ». 2013.
- [11] Claire Leloy SNBL, Laurent Lemagorou FCBA, et Eric Sauvignet BE2S, *Manuel du bois lamellé*. Desk, France; Adrienne bornstein, france, 2018.
- [12] K. Nakahara, T. Hisatoku, T. Nagase, et Y. Takahashi, « EARTHQUAKE RESPONSE OF ANCIENT FIVE-STORY PAGODA STRUCTURE OF HORYU-JI TEMPLE IN JAPAN », 2000.
- [13] « Legible history in preserved warehouse », Swedish Wood. Consulté le: 18 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.swedishwood.com/about_us/news/2024/7/legible-history-in-preserved-warehouse/
- [14] « Tall Building Criteria – CTBUH ». Consulté le: 18 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ctbuh.org/resource/height#tab-structural-materials>
- [15] Gérald Beaulieu, Valérie Levée, Christian Dagenais, Caroline Frenette, Audrey Latulippe, et Simon T. Bellavance, « ORIGINE - écocondos de la pointe-aux-lièvres Québec », 2018.
- [16] H. Liven et R. Abrahamsen, « MJØSTÅRNET: THE WORLD'S TALLEST TIMBER BUILDING », in *World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023)*, Oslo, Norway: World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023), 2023, p. 4209-4214. doi: 10.52202/069179-0547.
- [17] « Rocket&Tigerli », SHL. Consulté le: 23 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.shl.dk/work/rocket-tigerli>
- [18] Jeff Sanner, Todd Snapp, Alejandro Fernandez, David Weihing, Rob Foster, et Michael Ramage, « River Beech Tower : A Tall Timber Experiment », 2017.
- [19] « NF EN 1995-1-1: Eurocode 5 Conception et calcul des structures en bois ».
- [20] « Annexe nationale à la NF EN 1995-1-1:2008 ». 2010.
- [21] AFNOR, « NF EN 14080 - Structures en bois - Bois lamellé collé et bois massif reconstitué - exigences ». 2013.
- [22] « Annexe nationale à la NF EN 1991-1-1 ». juin 2004.
- [23] « Document technique d'Application 3.3/18-961_V1 Panneaux structuraux en bois contrecollé-croisé, utilisés en mur et plancher ». CSTB, 2018.
- [24] IGN, « Les flux de bois en forêt - Edition 2023 ». 2023.

Annexes

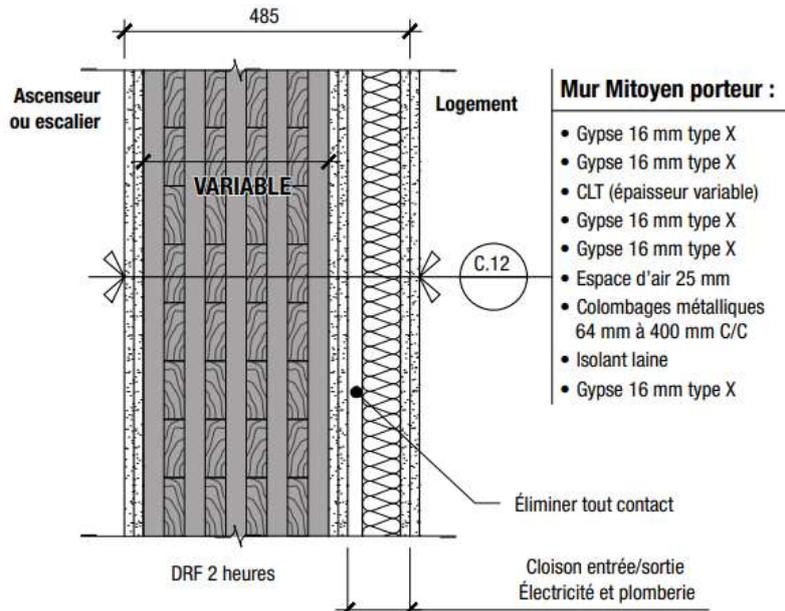


Figure 57 : mur mitoyen en CLT 9 plis, résistant au feu 2 heures, *Origine*, Canada (source : cecobois)

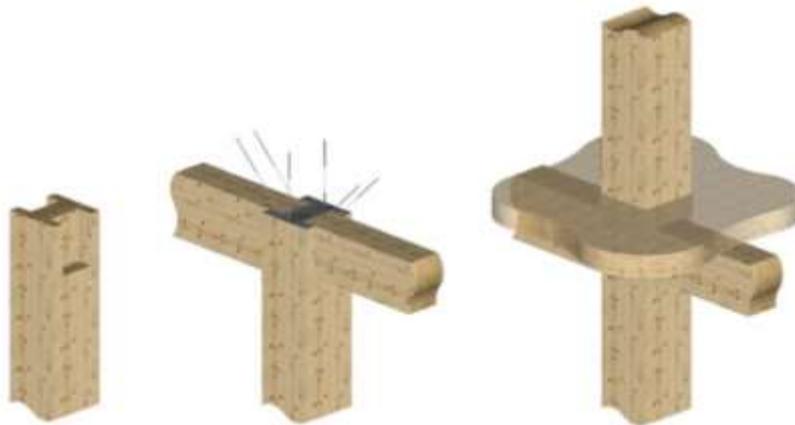


Figure 58 : Continuité des poteaux d'un étage à l'autre dans *Origine*. (source: Nordic structures)

Tableau 12 : Valeurs de k_{def} en fonction des classes de service. (source: Eurocode 5)

Matériau	Norme	Classe de service		
		1	2	3
Bois massif	EN 14081-1	0,60	0,80	2,00
Bois lamellé collé	EN 14080	0,60	0,80	2,00

Tableau 13 : Classes de durée de chargement de l'annexe nationale à l'Eurocode 5

Classe de durée de chargement	Exemples de chargement
Permanent	Poids propre
Long terme	Stockage Équipements fixes
Moyen terme	Charge d'exploitation Neige $H \geq 1\ 000$ m
Court terme	Neige $H < 1\ 000$ m, Charge d'entretien
Instantanée	Situations ou actions accidentelles Neige exceptionnelle Vent

Tableau 14 : Valeurs de k_{mod} en fonction des classes de service et des durées de chargement. (source : Eurocode 5)

Matériau	Norme	Classe de service	Classe de durée de chargement				
			Action permanente	Action long terme	Action moyen terme	Action court terme	Action instantanée
Bois massif	EN 14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Bois lamellé collé	EN 14080	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

Tableau 15 : Valeurs des charges d'exploitation d'après l'annexe nationale à l'Eurocode 1.

Catégorie de la surface chargée	q_k [kN/m ²]
Catégorie A :	
— planchers	1,5
— escaliers (1)	2,5
— balcons	3,5
Catégorie B	2,5

Généralités

Classe de service **1**

Système statique

Nombre des travées **1**

Porte-à-faux à gauche

Porte-à-faux à droite

Appui	Portée	x	Largeur
A		0 m	0,06 m
B	4,4 m	4,4 m	0,06 m

Section

à déterminer par l'utilisateur Produits standard du fabricant

Mes compositions de CLT

Stora Enso

Nombre des lamelles **5** **160 L5s**

Lamelle	Hauteur	Orientation	Matériau
1	40 mm	0	C24-STORA ENSO E
2	20 mm	90	C24-STORA ENSO E
3	40 mm	0	C24-STORA ENSO E
4	20 mm	90	C24-STORA ENSO E
5	40 mm	0	C24-STORA ENSO E

Largeur **1 000** mm Hauteur **160** mm

Rapport épaisseur/largeur d'une planche t/a **1:4**

Betal Optimiser la composition de pan

Charges

Travée	$q_{0,k}$	$q_{1,k}$	q_k	Catégorie
1	0,785 kN/m	2,5 kN/m ²	2,5 kN/m ²	A

Travée	x_{global}	x_{local}	$G_{1,k}$	Q_k	Catégorie
--------	--------------	-------------	-----------	-------	-----------

Valeurs de la section Verifications Détails Réactions d'appui

Taux d'usage

ELU

Flexion	η_M	29 %	k_{mod}	0,8	avec x = 2,2 m	Combinaison de base: $1,20 \cdot q_{0,k} + 1,20 \cdot q_{1,k} + 1,50 \cdot 1,00 \cdot q_k$
Cisaillement	η_V	16,7 %	k_{mod}	0,8	avec x = 4,4 m	Combinaison de base: $1,20 \cdot q_{0,k} + 1,20 \cdot q_{1,k} + 1,50 \cdot 1,00 \cdot q_k$
Contraintes d'appui	$\eta_{c,90}$	12,2 %	k_{mod}	0,8	avec x = 4,4 m	Combinaison de base: $1,20 \cdot q_{0,k} + 1,20 \cdot q_{1,k} + 1,50 \cdot 1,00 \cdot q_k$

ELS

Flèche	η_w	75,5 %	k_{def}	0,8	avec x = 2,2 m	Déformation finale $w_{net,fin}^{t=\infty} = q_{0,k} + (q_{0,k})_{creep} + q_{1,k} + (q_{1,k})_c$
Vibration	Vérification des vibrations selon DIN 1052 réussie Vérification des vibrations selon EN 1995-1-1 réussie Vérification des vibrations selon NEN EN 1995-1-1:2005/NB:2013 réussie					

Figure 59 : Vérification du plancher CLT de la partie logement avec CLTdesigner. (source : auteur)

EC5 CHARPENTE BOIS

DONNEES		RESULTATS	
Section		Section en flexion	
b	480 mm	6.1.6 Flexion simple My (Eq6.11)	0,39
h	920 mm	Elancement relatif (pas de déversement si < 0,75)	0,36
A	4416 cm ²	k _{crit}	1,00
pois volumique	4,2 kN / m ³	Déversement (pas pour moisage)	0,39
pois / ml	1,85472 kN / ml	Section en cisaillement	
I _y	3,11E-02 m ⁴	6.1.7 Cisaillement (Eq 6.13)	0,39
I _z	8,48E-03 m ⁴	Flèches	
W _y	6,77E-02 m ³	Flèche nuisible	0,36
W _z	3,53E-02 m ³	Flèche finale	0,24
r _y	266 mm	Flèche CT sous Q	0,10
r _z	139 mm	Vibrations	
Matériaux		Fréquence > 8 Hz	1,00
k _{mod}	0,8 [1]	Confort	Normal
Bois	GL24h	w / F	0,04

EC5 CHARPENTE BOIS

DONNEES		RESULTATS	
Section		Section en flexion	
b	480 mm	6.1.6 Flexion simple My (Eq6.11)	0,57
h	760 mm	Elancement relatif (pas de déversement si < 0,75)	0,32
A	3648 cm ²	k _{crit}	1,00
pois volumique	4,2 kN / m ³	Déversement (pas pour moisage)	0,57
pois / ml	1,53216 kN / ml	Section en cisaillement	
I _y	1,76E-02 m ⁴	6.1.7 Cisaillement (Eq 6.13)	0,47
I _z	7,00E-03 m ⁴	Flèches	
W _y	4,62E-02 m ³	Flèche nuisible	0,63
W _z	2,92E-02 m ³	Flèche finale	0,42
r _y	219 mm	Flèche CT sous Q	0,17
r _z	139 mm	Vibrations	
Matériaux		Fréquence > 8 Hz	1,32
k _{mod}	0,8 [1]	Confort	Normal
Bois	GL24h	w / F	0,07

Figure 60 : Vérifications à l'ELS vibratoire d'une poutre de logement pour 8 Hz (en haut) et 6 Hz (en bas).
(source: auteur)

DONNEES

Section

b	860 mm
h	860 mm
A	7 396 cm ²
I _y	4,56E-02 m ⁴
I _z	4,56E-02 m ⁴
W _y	1,06E-01 m ³
W _z	1,06E-01 m ³
r _y	248 mm
r _z	248 mm

Matériaux

k _{mod}	0,8 [1]
Bois	GL28h
f _{m,k}	28 Mpa
f _{t,k}	22,4 Mpa
f _{c,k}	28 Mpa
f _k	3,5 Mpa
E _{0,05}	10,5 Gpa
γ _m	1,25 [1]

ELU

R_q : f_{md} et f_{td} pourraient être optimisées par kh (max 1.1)

f _{md}	13,4 Mpa
f _{td}	10,8 Mpa
f _{cd}	13,4 Mpa
f _{vd}	1,7 Mpa

FEU

k _{fi}	1,15
f _{md,fi}	32,2 Mpa
f _{td,fi}	25,8 Mpa
f _{cd,fi}	32,2 Mpa
f _{vd,fi}	4,0 Mpa
E _{0,05 d,fi}	12,1 Gpa

RESULTATS

Section en traction - flexion My

6.1.2 Traction // fil (Eq6.2)	0,00
6.1.6 Flexion simple My (Eq6.11)	0,00
section tendue-fléchie à	#DIV/0!
6.2.3 Traction-Flexion (Eq 6.17)	0,00

Section en compression - flexion My - flmbt I fort

6.2.3 Compression simple (Eq 6.23)	0,98
NEd/(A.f _{cd})	1,0
λ _y	15,9
λ _{rel,y}	0,3
k _{ey}	1,0
6.1.6 Flexion simple My (Eq6.11)	0,00
section comprimée-fléchie à	compression entière
si λ _{rel,y} <0.3 => 6.2.4 Compression - flexion (Eq 6.19)	0,97
si λ _{rel,y} >0.3 => 6.3.2 Compression - flexion - flmbt I fort (Eq 6.23)	0,98

Section en traction - flexion Mz

6.1.2 Traction // fil (Eq6.2)	0,00
6.1.6 Flexion simple Mz (Eq6.12)	0,00
section tendue-fléchie à	#DIV/0!
6.2.3 Traction-Flexion (Eq 6.18)	0,00

Section en compression - flexion Mz - flmbt I faible

6.2.3 Compression simple (Eq 6.24)	0,98
NEd/(A.f _{cd})	1,0
λ _z	16
λ _{rel,z}	0,3
k _{ez}	1,0
6.1.6 Flexion simple Mz (Eq6.12)	0,00
section comprimée-fléchie à	compression entière
si λ _{rel,z} <0.3 => 6.2.4 Compression - flexion - (Eq 6.20)	0,97
si λ _{rel,z} >0.3 => 6.3.2 Compression - flexion - flmbt I faible (Eq 6.24)	0,98

Section en cisaillement

6.1.7 Cisaillement (Eq 6.13)	0,0
------------------------------	-----

Figure 61 : vérification ELU d'un poteau supportant une descente de charges de 15 étages. (source: auteur)

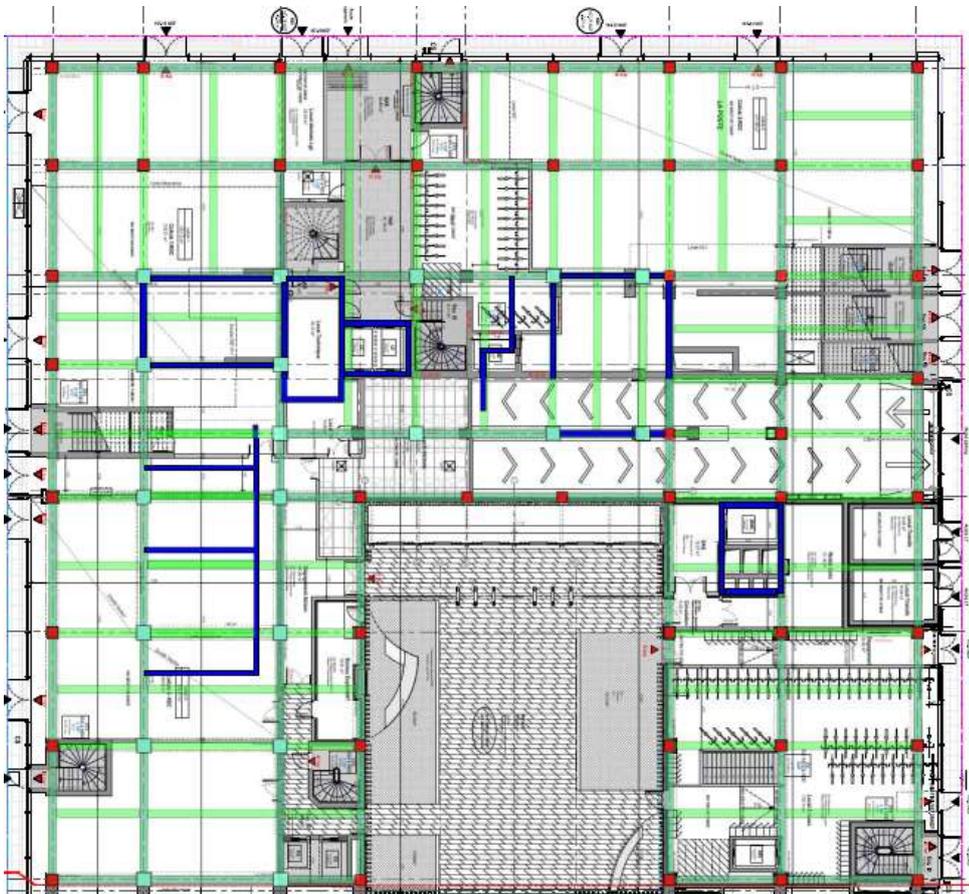


Figure 62 : Impact sur les circulations au niveau R+0 de la solution 1

Section

à déterminer par l'utilisateur Produits standard du fabricant

Mes compositions de CLT

Eugen Decker

Nombre des lamelles Tous 280 DO 7s

Lamelle	Hauteur	Orientation	Matériau
1	40 mm	90	C24-DECKER
2	40 mm	0	C24-DECKER
3	40 mm	90	C24-DECKER
4	40 mm	0	C24-DECKER
5	40 mm	90	C24-DECKER
6	40 mm	0	C24-DECKER

Incendie

Feu à droite

Feu à gauche

Durée de combustion [] min

Système de protection de façade

Colle résistante en cas de hautes températures

Sans espaces ou avec chants encolés

1,35

Valeurs de la section | Efforts internes, contraintes et degrés d'utilisation | Détails

Efforts internes

$n_{xy,d}$ 110 kNm

Épaisseurs équivalentes

RVSE	t_i^*
1	40 mm
2	40 mm
3	40 mm
4	40 mm
5	40 mm
6	40 mm
Σt_i^*	240 mm

Épaisseur équivalente totale

contraintes en RVSE

Contrainte de cisaillement nominale idéale $\tau_{0,d}^*$ 0,46 N/mm²

Contrainte de cisaillement dans une planche $\tau_{v,d}^*$ 0,92 N/mm²

Effort tranchant de torsion dans la surface collée $\tau_{t,d}^*$ 0,34 N/mm²

Coefficients de dimensionnement

k_{mod} 1,1

V_M 1,25

Largeur de planche 160 mm

Taux d'utilisation

Effort tranchant n_{xy} (mécanisme I - cisaillement dans le sens du fil) $\eta_{nxy,V}$ 20,8 %

Effort tranchant n_{xy} (mécanisme II - torsion) $\eta_{nxy,T}$ 15,6 %

selon Brandner & Dietrich et al. 2015

Effort tranchant n_{xy} (cisaillement brut) $\eta_{nxy,gru}$ 19,3 %

Effort tranchant n_{xy} (cisaillement net) $\eta_{nxy,net}$ 20,8 %

Effort tranchant n_{xy} (Torsion) $\eta_{nxy,tor}$ 15,6 %

Selon de ETA-09.0036 et ETA-09.0242

RVSE déterminante

Figure 63 : vérification à l'ELU du cisaillement dans le plan du voile CLT dimensionnant. Source : auteur.



diagonale

Pièce: 3357

Point / Coordonnée: 2 / x = 0.50 L = 2.52 m

Cas de charge: 35 ELU/25=1*1.35+3*1.35+4*1.35+2*1.05+5*1.05+7*1.50+10*(

Profil correct



Résultats simplifiés
Résultats détaillés

CONTRAINTES ACTUELLES

Sig_{c,0,d} = 2672.76/2500.00 = 10.69 MPa

Sig_{m,y,d} = 3.13/20833.33 = 0.15 MPa

Sig_{m,z,d} = 1.32/20833.33 = 0.06 MPa

Tau_{y,d} = 1.5*0.39/2500.00 = 0.00 MPa

Tau_{tory,d} = 0.00 MPa, Tau_{torz,d} = 0.00 MPa

CONTRAINTES CARACTERISTIQUES MINOREES

f_{c,0,d} = 20.16 MPa

f_{m,y,d} = 20.53 MPa

f_{m,z,d} = 20.53 MPa

f_{v,d} = 2.52 MPa

COEFFICIENT ET PARAMETRES ADDITIONNELS

km = 0.70 kh = 1.02 kmod = 0.90 Ksys = 1.00 kcr = 0.67

DEVERSEMENT



FLAMBEMENT Y



Ly = 5.03 m

LFy = 5.03 m

Lambda y = 34.88

Lambda_rely = 0.57

ky = 0.68

kcy = 0.96

FLAMBEMENT Z



Lz = 5.03 m

LFz = 5.03 m

Lambda z = 34.88

Lambda_relz = 0.57

kz = 0.68

kcz = 0.96

RESULTAS

(Sig_{c,0,d}/k_{c,y}*f_{c,0,d}) + Sig_{m,y,d}/f_{m,y,d} + km*Sig_{m,z,d}/f_{m,z,d} = 0.56 < 1.00 (6.23)

(Tau_{y,d}/k_{cr}+Tau_{tory,d}/k_{shape})/f_{v,d} = 0.00 < 1.00 (Tau_{z,d}/k_{cr}+Tau_{torz,d}/k_{shape})/f_{v,d} = 0.00 < 1.00

Figure 64 : Vérification ELU d'une poutre diagonale de contreventement classe de service 3. (source: auteur)