

# Etat des lieux technique par les experts sur les points saillants de la construction bois en hauteur : Structure

Jordi Cornudela  
setec tpi  
Paris, France



## 1. Introduction

L'atelier structures d'ADIVbois a démarré ses travaux en décembre 2015. L'objectif principal de l'atelier est d'aider ADIVbois dans le développement de la construction d'immeubles en bois, et surtout d'épauler le lancement, la conception et la construction des démonstrateurs. L'atelier compte environ quatre-vingts membres, dont environ une vingtaine se retrouve tous les mois et demi pour discuter sur des sujets structures de la construction d'immeubles de grande et moyenne hauteur en bois. L'atelier est devenu un lieu d'échange entre experts et de partage des connaissances. Avec comme cible, de permettre à la France de rattraper le retard par rapport à d'autres pays et construire des immeubles en bois de 50 m ou plus.

Pour faciliter le lancement et la construction des démonstrateurs, l'atelier a tracé une feuille de route pour permettre d'accompagner ADIVbois, ainsi que les différentes équipes de conception dans toutes les phases du projet. La première étape de cette feuille de route consistait au lancement d'une étude de parangonnage, ainsi que des études de cas, afin de pouvoir détecter les points critiques de la construction bois de grande hauteur. Ces études ont permis d'un côté la rédaction d'un guide de conception (*Vadémécum des immeubles à vivre bois*); et de l'autre de détecter les points critiques pour la construction des démonstrateurs.

La dernière étape du travail de l'atelier est d'accompagner la conception et la construction des démonstrateurs. En partant des points critiques détectés lors des études de cas, et en concertation avec les équipes de conception des démonstrateurs, l'atelier prépare le lancement des études complémentaires et des essais pour lever les possibles freins existants.

## 2. Etudes de cas

La commission technique a proposé l'étude de trois systèmes structuraux distincts : poteaux-poutres (étude pilotée par setec TPI avec la collaboration de T/E/S/S Ingénierie, Charpente-Concept et ENPC-Navier), voiles porteurs (ICM structures), et exosquelette (Elioth), afin de détecter les points sensibles de la conception des BGH en bois. Pour chacune de ces trois études, les ingénieurs se sont basés sur un même immeuble virtuel pour lequel ils ont dû déterminer la hauteur maximale atteignable. Nous détaillons, ci-dessous, les principales conclusions de chaque étude.

### 2.1. Structure Poteaux-poutres

La déformation sous l'action au vent des structures en poteaux-poutres s'avère sensible à la raideur des assemblages entre les poteaux et les poutres, assemblages qui doivent présenter une forte rigidité pour s'opposer aux actions latérales ; c'est pourquoi une grande partie de l'étude concerne la prise en compte des raideurs d'assemblage dans le dimensionnement de la structure.

Le modèle de calcul aux éléments finis de la structure en bois doit représenter le comportement réel du bâtiment. Il est donc absolument nécessaire de modéliser le comportement des assemblages. L'étude de cas propose la modélisation suivante des assemblages (Figure 1) :

- l'assemblage est modélisé comme un élément plus rigide que le reste de la structure en bois,
- l'assemblage est connecté avec les poutres selon une raideur à la rotation ( $k \neq 0$  et  $k \neq \infty$ ),
- le point central de l'assemblage est connecté avec le poteau avec une raideur à la rotation ( $k \neq 0$  et  $k \neq \infty$ ).
- les raideurs rotationnelles dépendent de la typologie des assemblages, du nombre et de la répartition des organes d'assemblage.

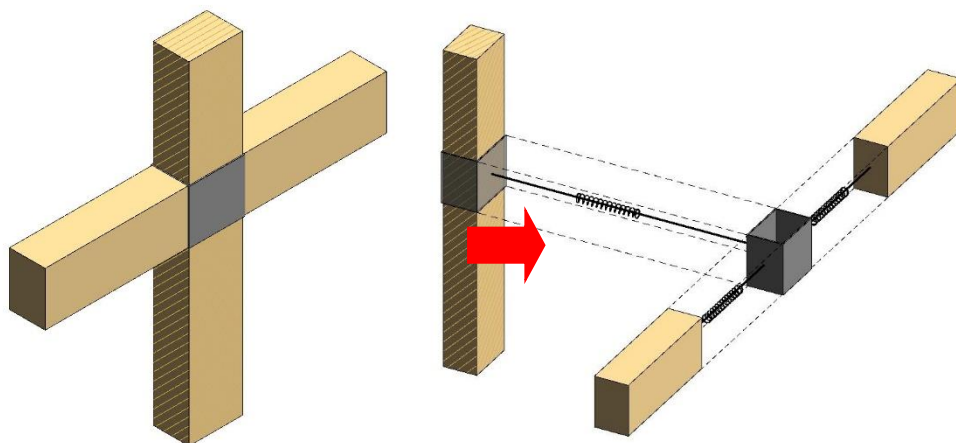


Figure 1 : Assemblage poteau-poutre

L'étude de cas montre que la prise en compte des raideurs d'assemblage augmente le déplacement en tête de la tour de plus de 50 %, et qu'en conséquence les sections structurales requises seront plus imposantes. La sensibilité des structures vis-à-vis des assemblages peut donc mener à limiter leur nombre et/ou à concevoir des connexions les plus raides possible afin de permettre la réalisation de bâtiments de plus en plus grands.

Le pré-dimensionnement permet de concevoir des BGH tout en bois jusqu'à R+20 (environ 80m de hauteur). Les poteaux de façade atteignent, alors, une section allant jusqu'à 80 cm par 50 cm pour les étages inférieurs avec un noyau central en CLT de 22 cm d'épaisseur. Les critères dimensionnants concernent surtout les aspects liés à la performance en service de l'immeuble (déplacement en tête, déplacement inter-étage et confort lié aux actions dynamiques du vent).

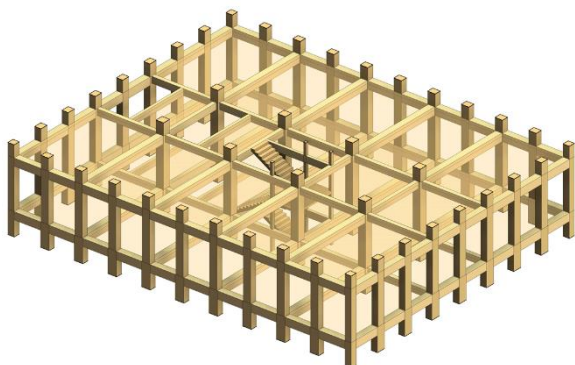


Figure 2 : Structure poteaux poutres

## 2.2. Structure à panneaux porteurs et contreventement par refends

La principale caractéristique de ce système structural est le fait que les refends/voiles assurent tout le transfert des efforts aux fondations (Figure 3). Les voiles servent de contreventement de la structure grâce à l'effet diaphragme des planchers. Le principal avantage de ce système structural est la raideur de l'ensemble du bâtiment laquelle est plus importante que dans un système poteaux-poutres.

Pour les structures conçues sous forme de voiles porteurs en panneaux CLT (étude pilotée par ICM structures), la difficulté est de considérer convenablement le comportement réel de ce composant complexe. Son étude fait appel à la théorie des plaques orthotropes, ce qui est assez inhabituel dans le domaine du bâtiment.

Classiquement, les modélisations des charpentes (bois ou métallique) sont traitées numériquement par des éléments finis unidimensionnels de type barre, non adaptés au comportement d'un panneau CLT. Les éléments surfaciques (dalles et voiles) rencontrés couramment en construction béton armé sont modélisés par des éléments bidimensionnels

de type coques continues. Même si ce dernier type de modélisation est plus proche du CLT, il est sensiblement différent dans la mesure où les « dalles » ou « voiles » en CLT sont composés de plusieurs éléments connectés entre eux donnant aux panneaux un sens privilégié et donc un comportement orthotrope.

La méthode de modélisation proposée dans cette étude de cas est d'utiliser un modèle de type coque orthotrope avec des relâchements linéaires généralisés. Cette méthodologie permet d'approcher correctement les trois principaux éléments de dimensionnement des groupes de murs de contreventement, tout en évitant l'utilisation des modèles non linéaires des connexions. En parallèle, l'analyse d'autres modélisations simplifiées, telles que l'analyse d'un modèle de type barre, montre que les résultats vis-à-vis des déplacements sont plus défavorables par rapport au modèle coque proposé.

L'étude de cas montre qu'il est possible d'atteindre R+20 (soit 60 m) avec ce type de conception grâce à des voiles en CLT de 220 mm. Au-delà, la valeur du déplacement horizontal en tête de l'immeuble n'est plus acceptable. Il est envisageable d'atteindre les 33 niveaux (96m) à condition de renforcer la structure (voiles CLT de 280 mm et ajout des linteaux). Ces résultats corroborent l'intérêt de la modélisation de type coque afin de ne pas surestimer le déplacement des immeubles en bois.

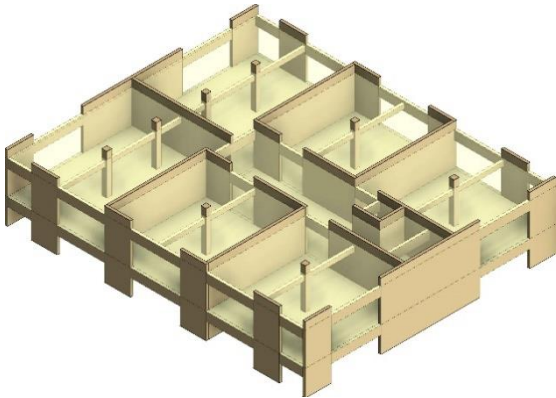


Figure 3 : Structure voiles porteurs

### 2.3. Structure en exosquelette

L'exosquelette concerne une structure constituée par un système poteaux-poutres qui reprend principalement les efforts verticaux auquel s'ajoute un ensemble de diagonales placées au niveau de la façade pour reprendre les efforts horizontaux (Figure 4).

Pour augmenter la raideur du système il est possible d'ajouter des diagonales à l'intérieur de l'immeuble (autour des circulations verticales). Le principal avantage du système exosquelette est l'augmentation de la raideur du système structural, tout en permettant la flexibilité d'aménagement de l'immeuble, contrairement aux refends et voiles CLT.

L'étude d'un IGH avec une structure en exosquelette (étude menée par Elioth) propose une structure formée par des poteaux-poutres contreventée avec des diagonales en bois (placées en façade et autour du noyau central). Les résultats du pré-dimensionnement permettent d'atteindre les 35 étages en tout bois (environ 119m de hauteur). Avec cette configuration, les poteaux au RdC ont une section carrée de 0,8m de côté et les diagonales des niveaux les plus bas, de 0,7m. Le critère de design est le confort en tête d'immeuble vis-à-vis de l'action du vent.

Pour ce type de structure, où les connexions sont considérées articulées, le jeu dans les assemblages est un point critique de la conception. Augmenter le jeu diminue la raideur de l'ensemble de la structure et implique un renfort des éléments participant au contreventement tandis que diminuer le jeu complexifie la réalisation. Un jeu trop faible ou nul rend inenvisageable de nombreuses techniques d'assemblage. L'étude de cas propose de prendre en compte ces jeux en considérant un ressort non linéaire au niveau des diagonales pour modéliser l'assemblage. Les résultats obtenus montrent que le déplacement en tête d'un immeuble de 25 étages augmente d'environ 30 % avec la prise en compte du jeu d'assemblage.

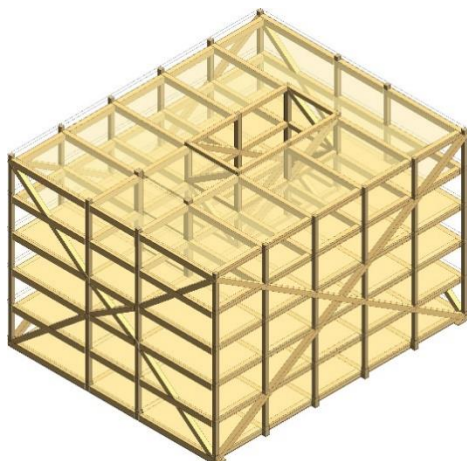


Figure 4 : Structure en exosquelette

### 3. Vadémécum

Dans le vadémécum, nous avons résumé les principales conclusions issues des études de cas. L'objectif principal de ce document étant d'aider les équipes de conception des démonstrateurs pour le bon déroulement des projets. Dans ce contexte, le vadémécum précise les critères structurels à prendre en compte, lesquels sont classifiés en deux grandes familles : critères liés aux états limites ultimes (en rapport avec la résistance) et les critères liés aux états limites de services (dus, entre autres, aux déformations). La nécessité de maîtriser **les déformations** est un point fondamental de la conception d'un BGH.

#### **Déformation verticale : planéité des planchers**

La planéité est à maîtriser afin que les planchers soient « horizontaux » en fin de construction et pendant toute la durée d'utilisation du projet. Les raccourcissements différentiels verticaux entre éléments porteurs (par exemple entre noyau et poteaux) peuvent être préjudiciables au bon fonctionnement des cloisons, des revêtements fragiles et des façades. Le fluage est alors une propriété importante qui doit être prise en compte pour le calcul de la déformation verticale des éléments.

#### **Déplacement horizontal : total et inter-étage**

La limitation des déplacements horizontaux dans un immeuble de grande hauteur a deux objectifs principaux. D'une part, il faut assurer la compatibilité du système de façade avec les déformations de la structure principale. D'autre part, la déformation horizontale permet d'apprécier la réponse de l'immeuble vis-à-vis des efforts horizontaux et d'assurer l'aptitude en service.

Dans la conception des BGH, il est courant de limiter la déformation totale en tête de tour à  $H/500$  et les déplacements inter-étages<sup>i</sup> à des valeurs comprises entre  $h/500$  et  $h/200$ .

#### **Critères de confort de l'utilisateur**

Les deux principaux critères de confort sont l'accélération en tête de tour et le confort vibratoire des planchers. Ce deuxième critère, détaillé dans l'Eurocode 5 (voir §7.3.3 NF EN 1995-1-1) n'est pas une spécificité des BGH.

L'aptitude de service d'un immeuble, vis-à-vis des vibrations créées par les actions du vent, peut être évaluée selon l'Annexe B de la NF EN 1991-1-4, laquelle fixe une méthode pour déterminer les accélérations résultantes. La valeur limite de ces accélérations peut être fixée suivant les « Recommandations pour le calcul des effets du vent du CECM (1989) » ; la norme ISO 10137 ou le critère de Davenport.

## 4. Essais et études complémentaires

Afin de faciliter la conception et la construction des démonstrateurs, et suivant le retour d'expérience des études de cas, l'atelier structures a prévu de lancer durant l'année 2018 une série d'études complémentaires et essais afin d'obtenir des données pouvant se relever indispensables à la construction de ces immeubles. Ces essais/études traitent 4 sujets principaux.

### La raideur d'assemblage

Lors de la construction des immeubles de moyenne et grande hauteur, la raideur de la structure est un paramètre clé pour la bonne modélisation et la justification du projet. *En conséquence, l'intérêt de la prise en compte des raideurs dans les connexions entre éléments en bois* est une solution à prendre en compte. En conséquence, il est nécessaire de disposer de la valeur de la raideur des assemblages la plus précise possible.

Actuellement, l'Eurocode 5 propose une méthode de calcul de la raideur de ces assemblages obligeant à prendre en considération une fourchette des valeurs possibles. Cette méthodologie ne permet pas d'optimiser le calcul des structures bois et complexifie le design des structures en bois. En conséquence, l'atelier structures a considéré nécessaire de mener des essais d'assemblages bois pour définir une méthodologie permettant de cibler une valeur de raideur la plus proche de la réalité possible.

A ce jour, et conformément aux dispositions prévues dans les démonstrateurs, il est prévu de tester la raideur d'organes de type tige, la raideur de vis droites inclinées axiales pour des assemblages articulés ou encastés. Ces essais seront lancés pendant le mois d'avril 2018.

### L'amortissement de la structure bois

Un des critères plus importants pour le design d'un immeuble de grande hauteur est le confort des usagers vis-à-vis du vent (accélération horizontale du dernier plancher). Ce critère peut être décisif pour une structure en bois, compte tenu la faible raideur du bois par rapport à d'autres matériaux. A ce jour, nous ne disposons pas de valeurs d'amortissement valables pour ce type de structure, et selon le projet la valeur peut varier de 1 % à 3 % avec des conséquences non négligeables sur le dimensionnement de la structure.

L'atelier structures prévoit la feuille de route suivante pour disposer des données fiables pour le design des démonstrateurs :

- Etude de parangonnage concernant l'amortissement

Une étude de parangonnage a été lancée en mars 2018 pour lever les incertitudes de la valeur de l'amortissement critique d'un bâtiment bois de grande hauteur et d'évaluer son influence sur le comportement dynamique sous charges de vent de ce type d'ouvrage.

Cette étude inclut un parangonnage sur la réglementation et les normes applicables en France et à l'étranger, ainsi que le récapitulatif des différentes mesures in-situ déjà effectuées. A partir de ces valeurs, il sera possible de réaliser une étude de sensibilité pour estimer l'impact de l'amortissement structurel sur les critères de confort d'un immeuble de grande hauteur.

- Mesures de l'amortissement sur des immeubles existants

En même temps, l'atelier structures lancera une campagne de mesures in-situ de l'amortissement sur des immeubles existants afin d'augmenter les données disponibles. L'objectif de ces mesures est de pouvoir déterminer au mieux la valeur de l'amortissement à prendre en compte pour les projets à venir.

- Mesures de l'amortissement sur les démonstrateurs

La base des données sera complétée avec des mesures sur les démonstrateurs. Dans ce cas il sera possible de réaliser les mesures pendant le chantier (à la fin du gros œuvre) ainsi que lors de la mise en service des immeubles.

### **Le fluage longitudinal du bois**

Aujourd'hui le fluage est pris en compte dans la valeur de  $k_{mod}$ , avec des valeurs issues surtout des essais de flexion. Dans les cas des immeubles de grande hauteur, les poteaux seront fortement sollicités longitudinalement et le fluage longitudinal sera un élément important à tenir en compte. De plus, en cas de structures mixtes béton-bois, il sera nécessaire de pouvoir connaître la déformation pendant toute la durée du chargement (dès la phase chantier) pour analyser le différentiel entre les deux matériaux.

Cet essai prévoit d'analyser la déformation des différents échantillons de bois pendant une durée de 12 mois pour pouvoir définir la valeur du fluage longitudinal, ainsi que de proposer l'évolution de la déformation en fonction du temps.

### **Le flambement des panneaux CLT**

Actuellement, les effets du cisaillement roulant sur l'effort critique de flambement dans la version actuelle de l'Eurocode ne sont pas pris en compte. Une version de l'Eurocode en cours de rédaction propose d'en tenir compte sur la base des travaux de l'Université de Graz dans le cas d'un modèle poutre. Les effets du cisaillement roulant peuvent baisser de façon notable l'effort critique de flambement (10% à 20%).

L'atelier structures propose d'élaborer un modèle de plaque orthotrope épaisse (type Timoshenko/Reissner) sur la base des constantes élastiques déterminées lors des études de fluage. Une étude numérique de l'effort critique de flambement sera réalisée pour proposer des formules simplifiées du flambement de plaques appuyées sur 3 cotés et de la largeur participante lorsque le chargement est concentré sur une partie d'un voile en CLT.

---

<sup>i</sup> Fib Task group 1.6 ; Tall Buildings – Structural design of concrete buildings up to 300m tall. Londres, Septembre 2014