

Conception d'un système structural permettant l'utilisation de l'ossature légère modulaire dans les bâtiments de grande hauteur

NICOLAS LABRECQUE

Candidat à la maîtrise
ICI, CIRCERB
Université Laval
27 octobre 2021



Nom de l'étudiant: Labrecque, Nicolas

Domaine d'étude: Génie du bois

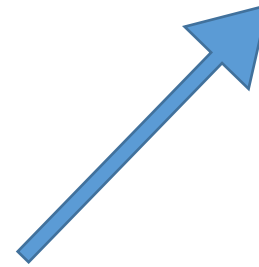
Direction: Pierre Blanchet (UL)

Codirection: Sylvain Ménard (UQAC), Marc Oudjene (UL)



Problématique - État de la situation

- Population mondiale : 7,9 G (2021) à 9,7G (2050)
- Population urbaine : 4,7G (2021) à 7,0G (2050)



2,3 milliards d'humains de plus qui vivent dans les villes



Un manque de main d'œuvre dans plusieurs pays industrialisés



Un besoin d'utiliser la préfabrication dans les bâtiments de grande hauteur

Problématique - État de la situation

Préfabrication en bois :

- Matériau renouvelable et stockant le CO₂
- Moins besoin de main d'œuvre spécialisée
- Installation plus rapide et moins perturbante pour le voisinage
- ...



Le projet en bref..

- Utiliser l'ossature légère préfabriquée dans les bâtiments de grande hauteur, 12 à 20 étages.
- Profiter de l'avantage de la préfabrication au maximum




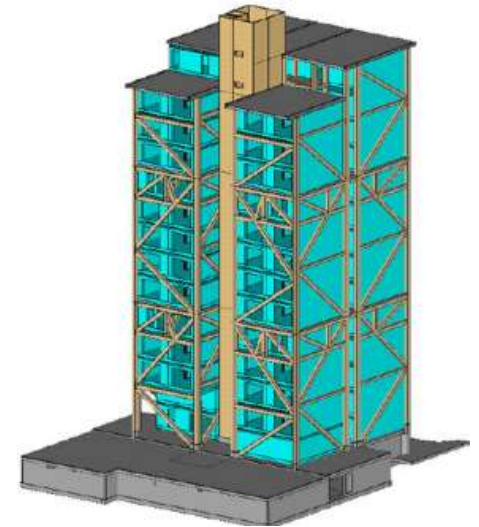
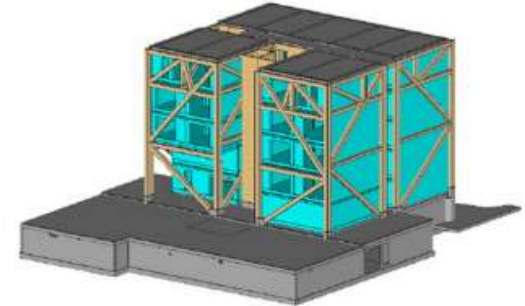
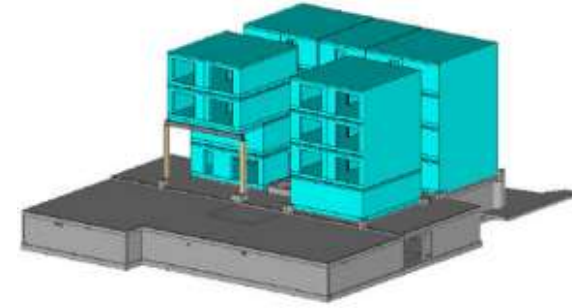
Objectifs

Concevoir un système structural permettant d'atteindre les performances structurelles requises pour l'utilisation de l'ossature légère modulaire dans les bâtiments de grande hauteur

1. Concevoir trois systèmes de type hyperstructure et comparer leur comportement structural.
2. Développer une méthode numérique pour la modélisation par éléments finis d'ossature légère modulaire.
3. Étudier l'interaction entre l'hyperstructure et les sous-structures modulaires et leur impact mutuel.

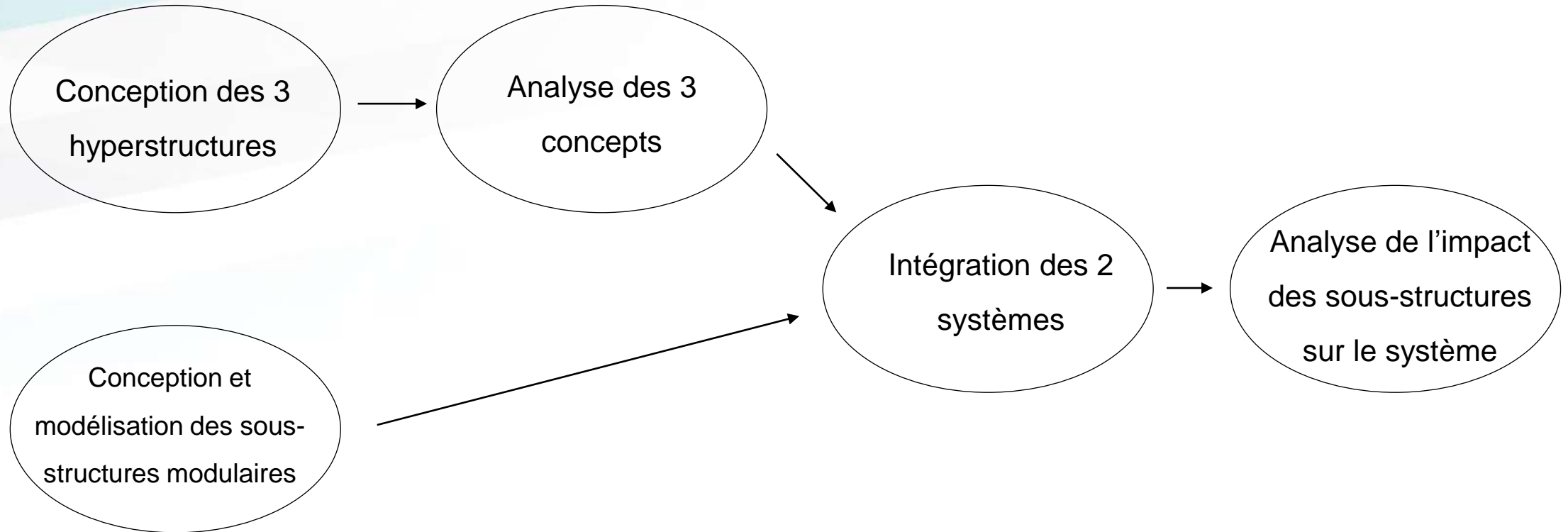
L'idée

- Limites autour de 6 étages
- Système primaire (hyperstructure) pour «empiler» des petits bâtiments en ossature légère (sous-structures) un par-dessus l'autre.
- Treet 



Treet, Norvège

Organigramme du projet



Concrètement

- 3 systèmes structuraux primaires de 20 étages, 60 mètres de hauteur
- Sous-modules de 4 étages en ossature légère préfabriquée
- Aspect structural seulement



Un système en bois lamellé-collé

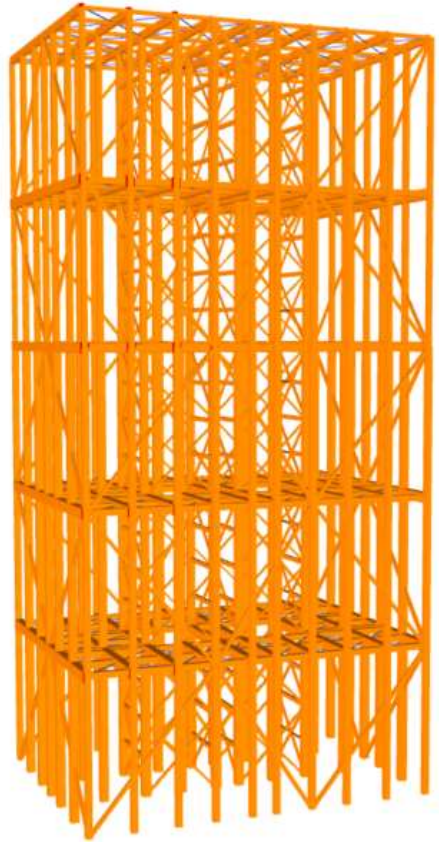


Un système en béton



Un système hybride bois-béton

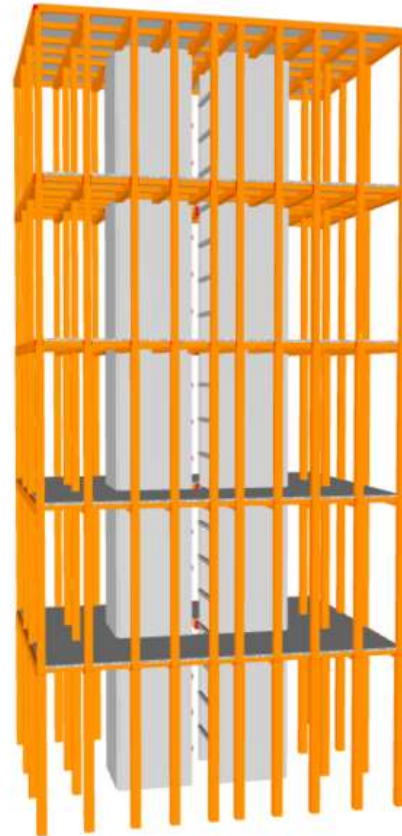
Méthodologie – Les 3 hyperstructures



Treillis verticaux en lamellé-collé



Noyau central et dalles en béton



Noyau central en béton et colonnes en lamellé-collé

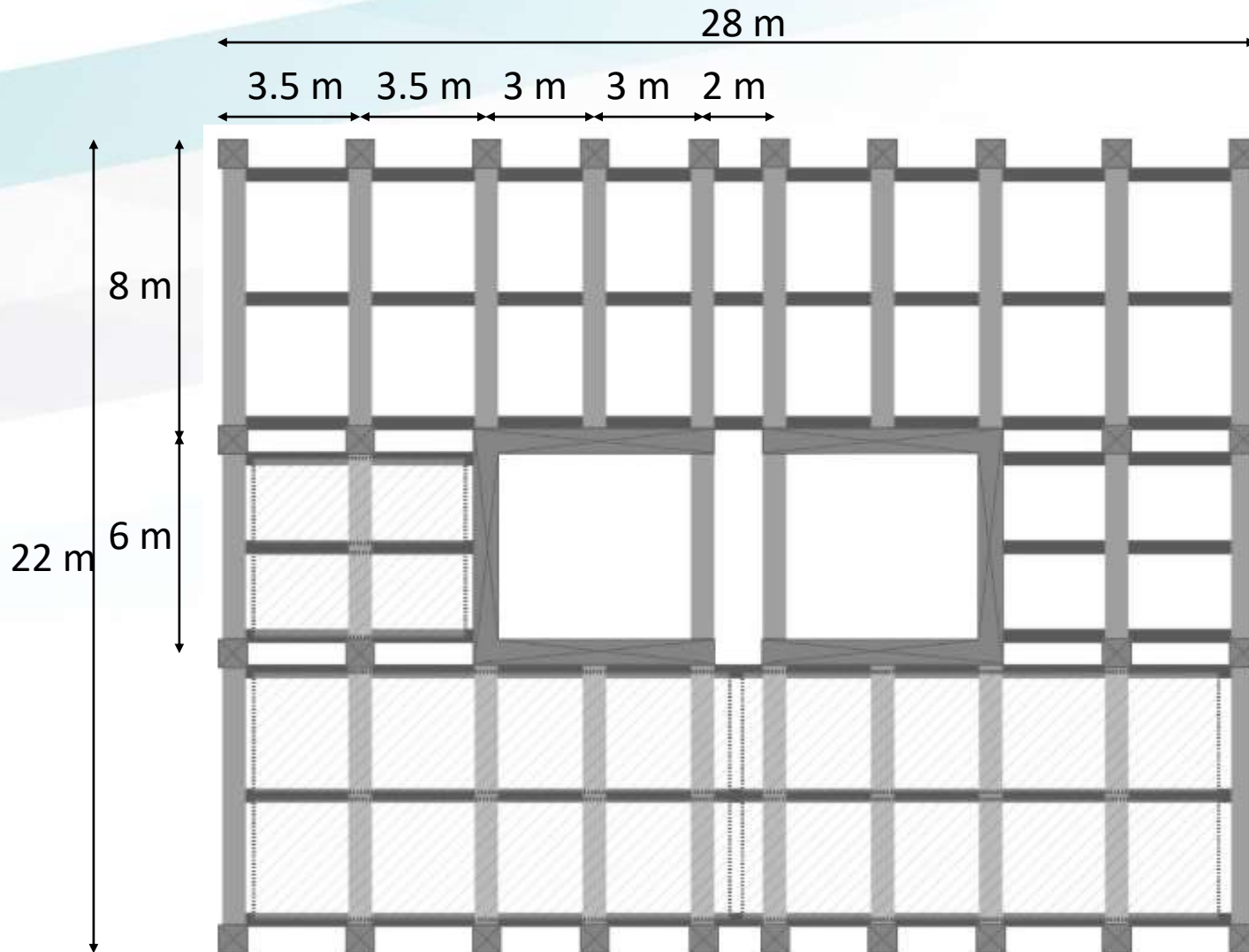
Hyper-planchers



Dlubal RFEM

Logiciel d'analyse par éléments finis

“Architecture”



4

é
t
a
g
e
s

Charges et géographie

- Charges selon le CNBC 2015.
- Localisation des bâtiments fictifs : Ville de Québec
- Charges de vent : Selon la procédure dynamique
- Charges sismiques : Déterminées selon une analyse du spectre de réponse. Considération des modes de vibration supérieurs.

Méthodologie – Modules préfabriqués

- Modélisation de l'ossature légère par éléments finis : Une multitude de façons de faire.

Calibrés par
des essais en
laboratoire

Trop complexes ;
chaque clou modélisé

- Besoins : Faible effort computationnel, sans essais en laboratoire, basé sur des équations théoriques rigoureuses.

Les équations de la O86-19

$$\Delta_i^{storey} = \Delta_{b,i}^{storey} + \Delta_{s,i}^{storey} + \Delta_{n,i}^{storey} + \Delta_{a,i}^{storey}$$

Déviaton dû à la flexion

Déviaton dû au cisaillement dans l'OSB

Déviaton dû au glissement des clous

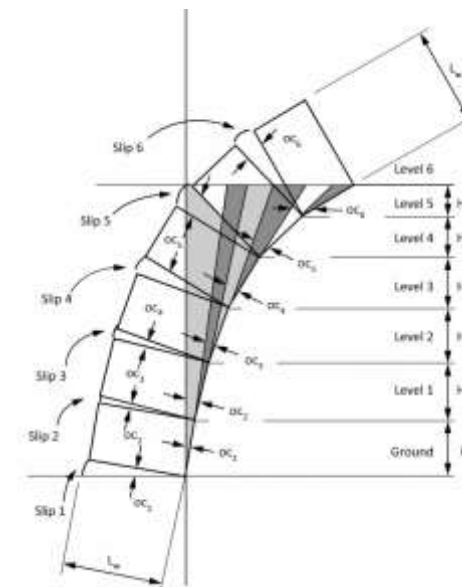
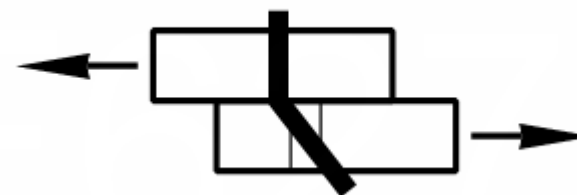
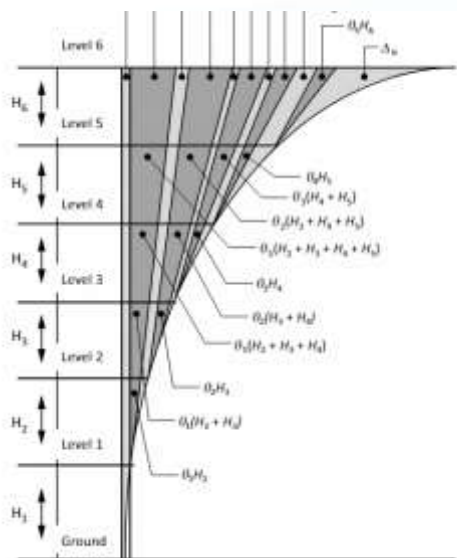
Déviaton dû à l'élongation dans les ancrages

$$\frac{M_i H_i^2}{2(EI)_i} + \frac{V_i H_i^3}{3(EI)_i} + H_i \left(\sum_{j=1}^{i-1} \theta_j \right)$$

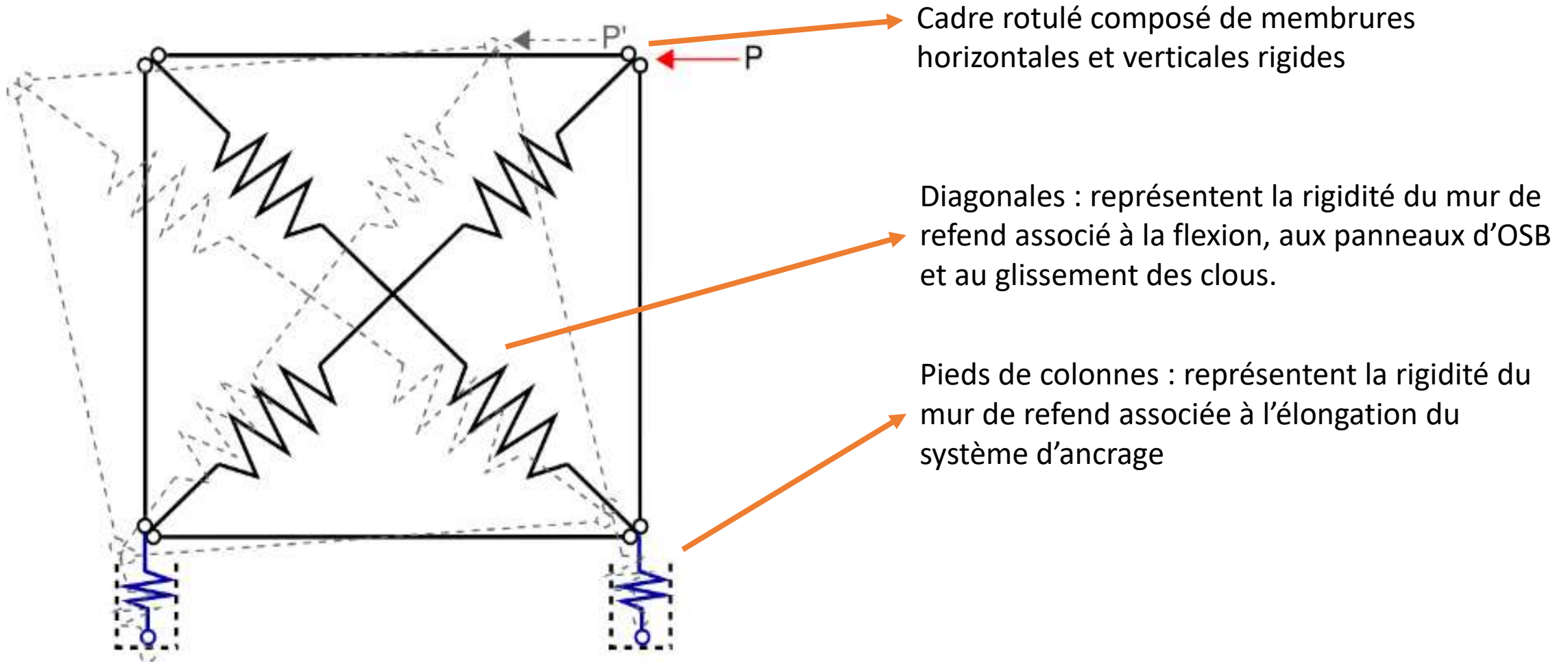
$$\frac{v_{f,i} H_i}{B_{v,i}}$$

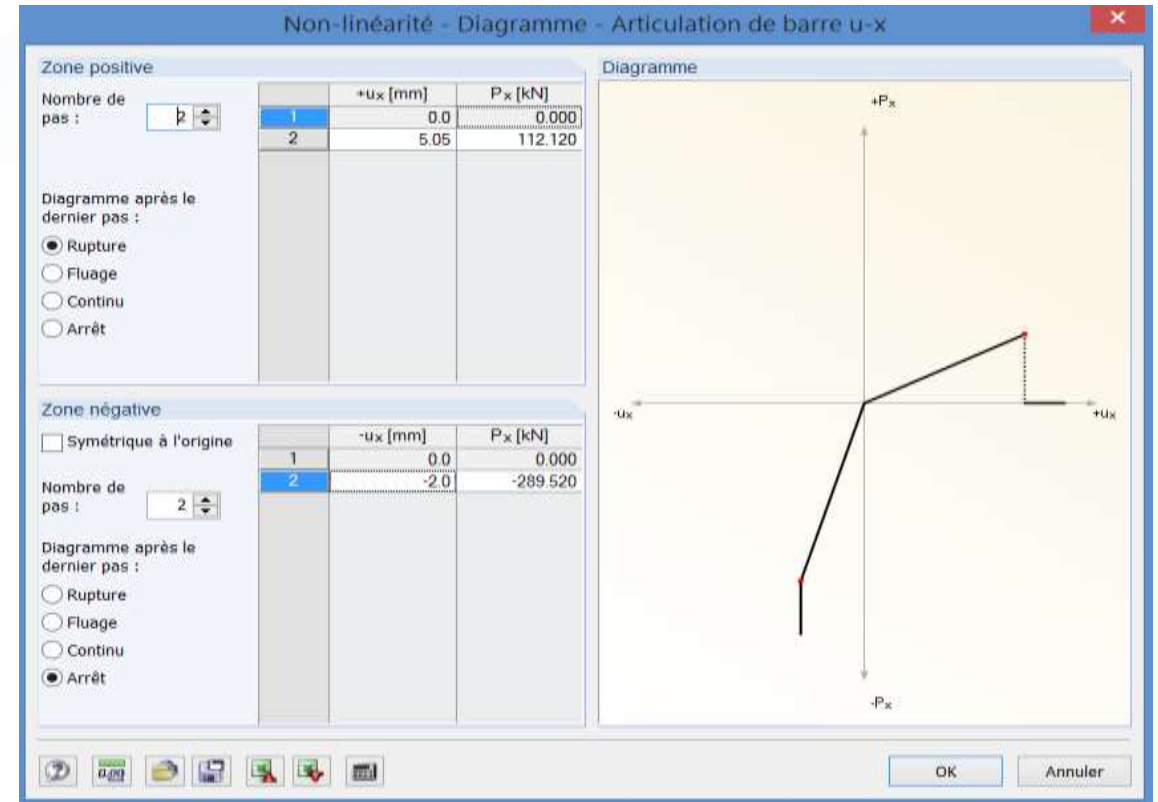
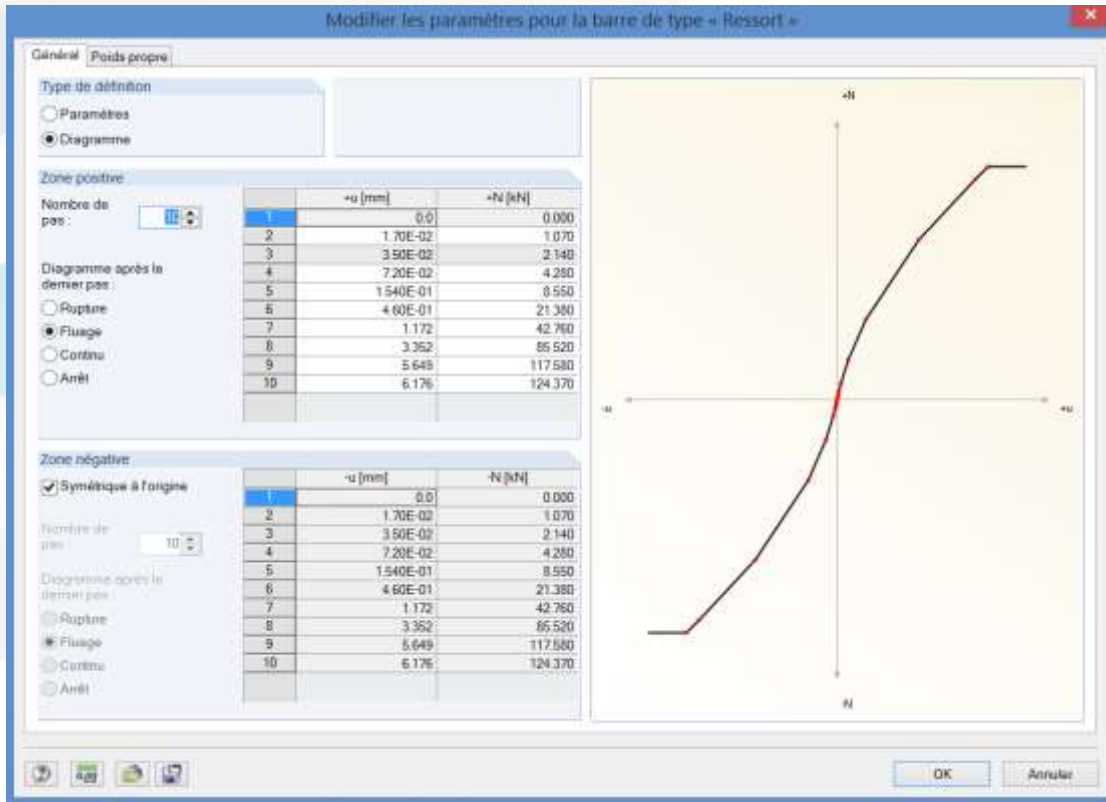
$$0,0025 * H_i * \left[\frac{0.013 vs}{d_F^2} \right]^2$$

$$H_i \alpha_i + H_i \left(\sum_{j=1}^{i-1} \alpha_j \right)$$



Modélisation des murs de refend





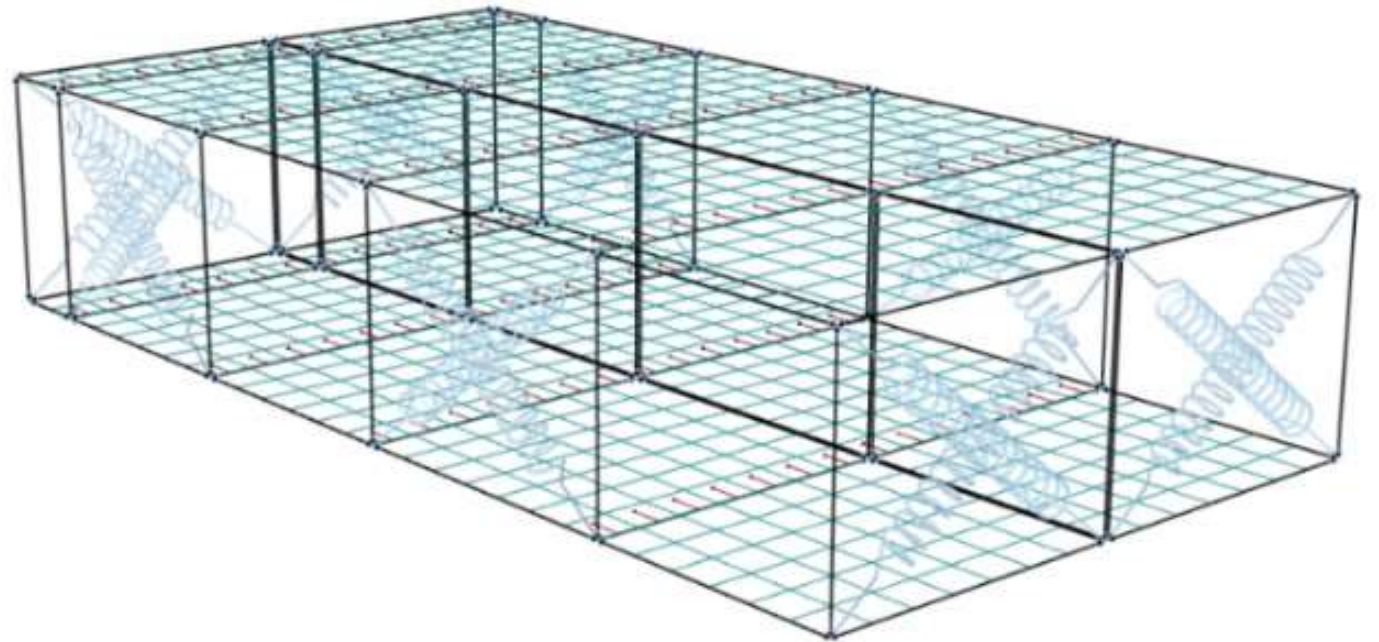
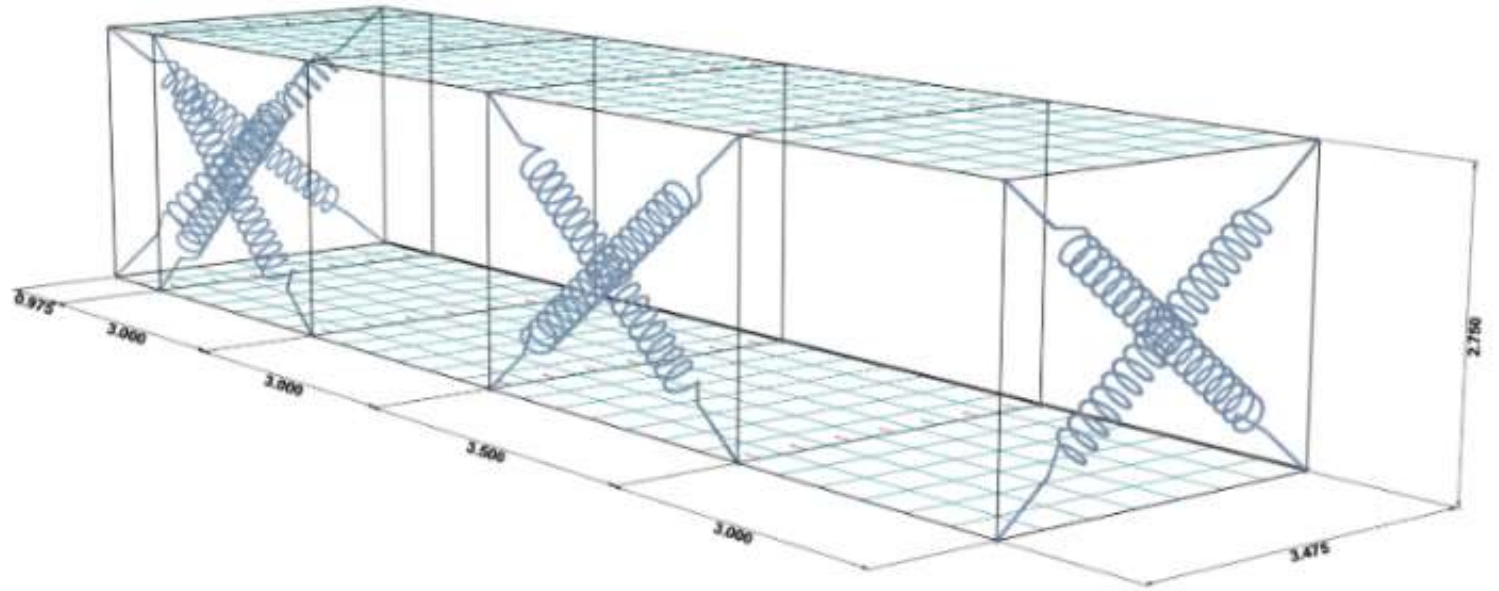
Diagonales

- Courbe non-linéaire (clous)
- Réduction de la rigidité des murs de refend aux étages supérieurs pour prendre en compte la rotation des étages inférieurs même si le modèle est composé de cadres articulés ne pouvant pas rotationner

Ancrages

- Courbe bi-linéaire
- Élongation des tiges continues en traction et écrasement perpendiculaire au fil des lisses en compression

Les modules préfabriqués

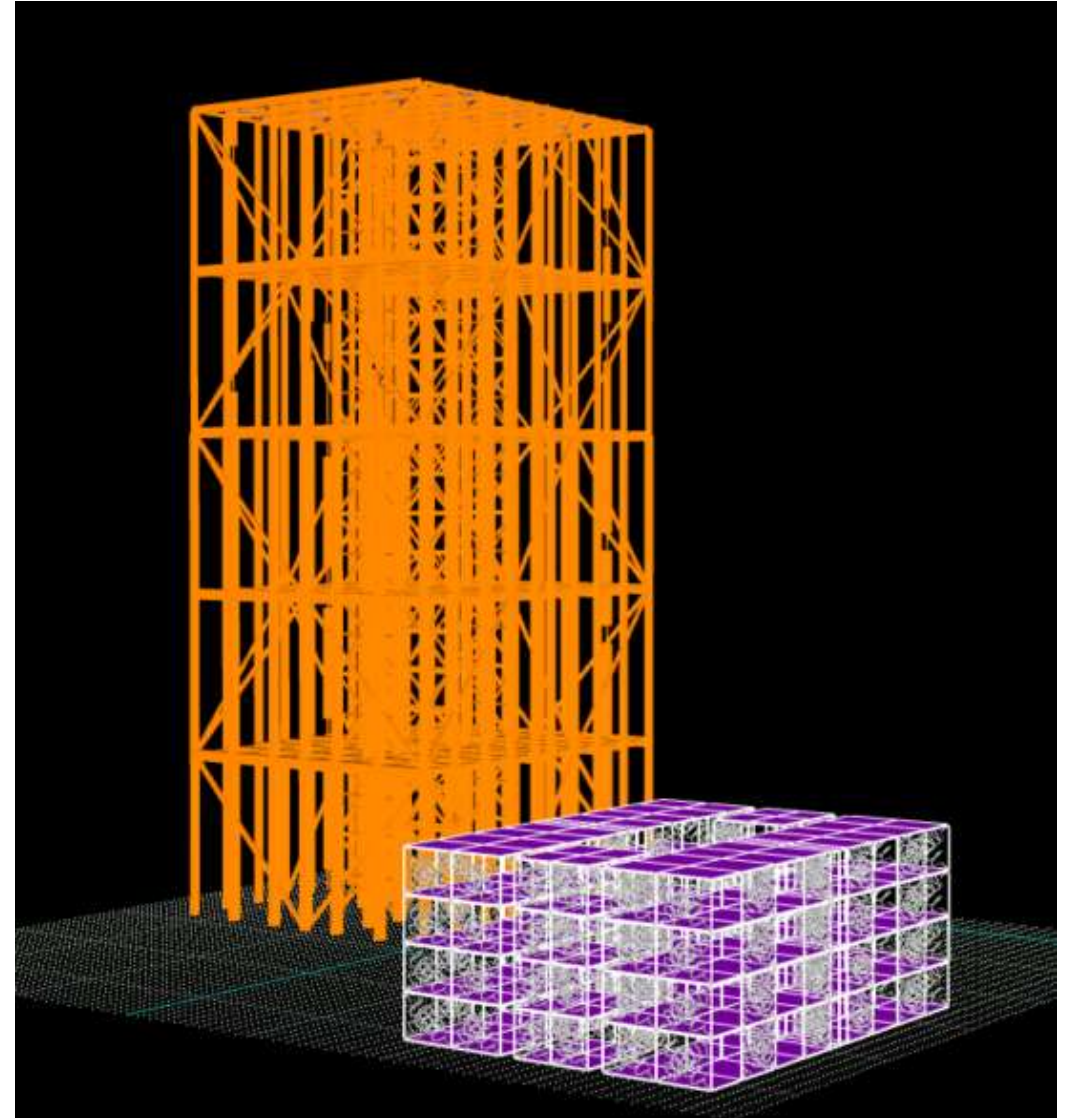


Méthodologie - Intégration

- Connexion aux hyper-planchers seulement.

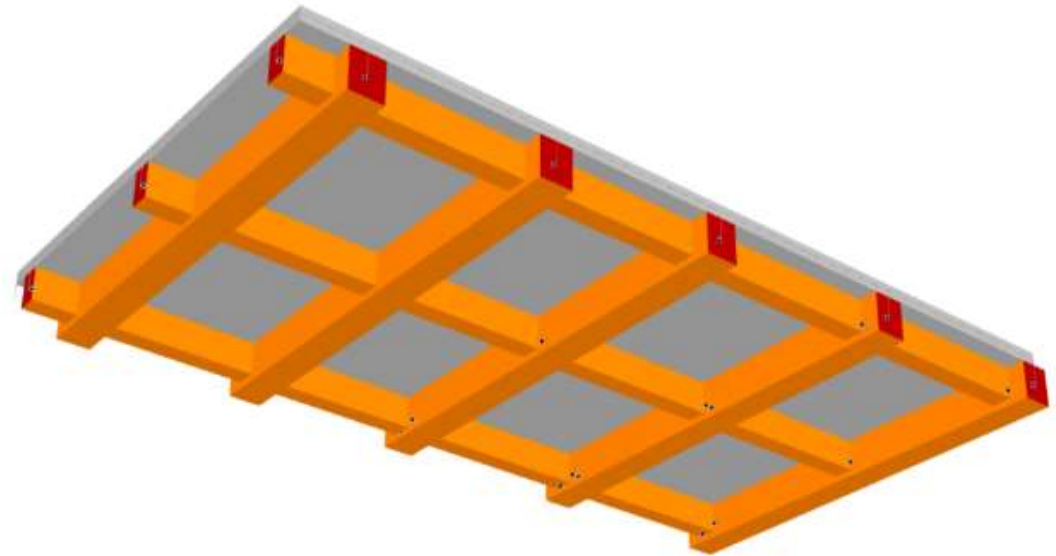
OU

- Connexion à tous les étages entre les colonnes de l'hyperstructure et les planchers des sous-structures.



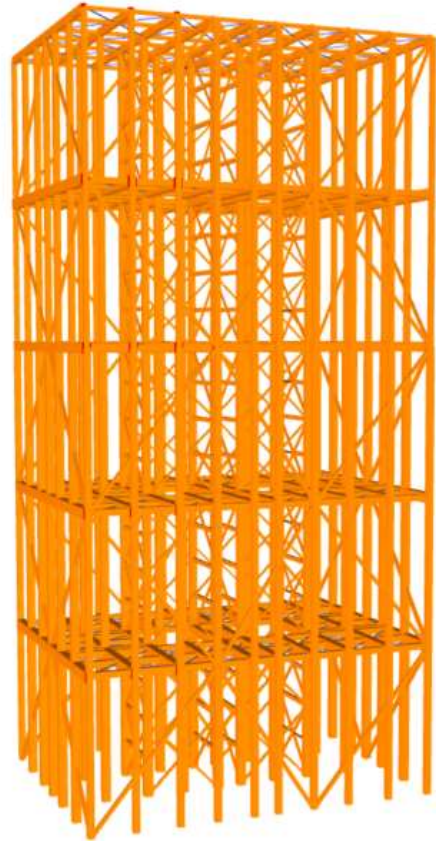
Résultats – L'hyperstructure hybride

- Difficulté de modélisation et de conception des hyperplanchers hybrides bois-béton.
- Concentrations de contraintes dans les dalles de béton donc incertitude des résultats pouvant en être tirés.

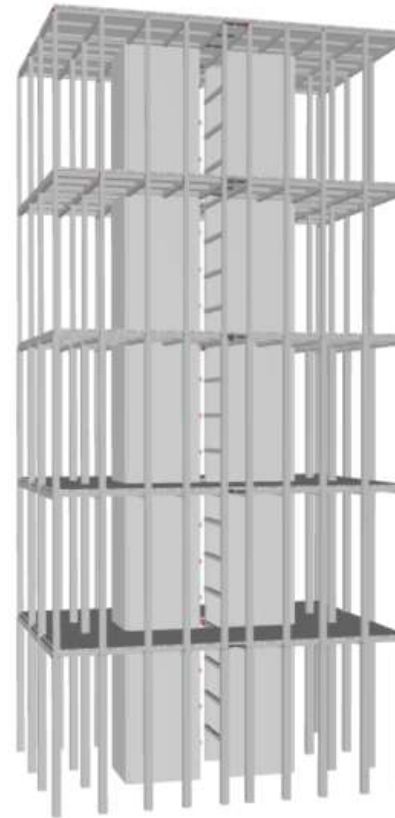


Résultats – Les hyperstructures

- 1580m³ et
≈700 tonnes
- Accélération dû
au vent : ≈0,5%g
- Inter-plancher
max sous vent:
5,9mm
- Inter-plancher
max sous séisme:
32,9mm



- 2200m³ et
≈5500 tonnes
- Accélération dû
au vent : ≈0,25%g
- Inter-plancher
max sous vent:
3,3mm
- Inter-plancher
max sous séisme:
52,7mm



Résultats – Glulam connecté aux planchers

Sous charges gravitaires

Déformation des hyper-planchers sous charges gravitaires crée des efforts dans les murs de refend des modules.

Sous charges de vent

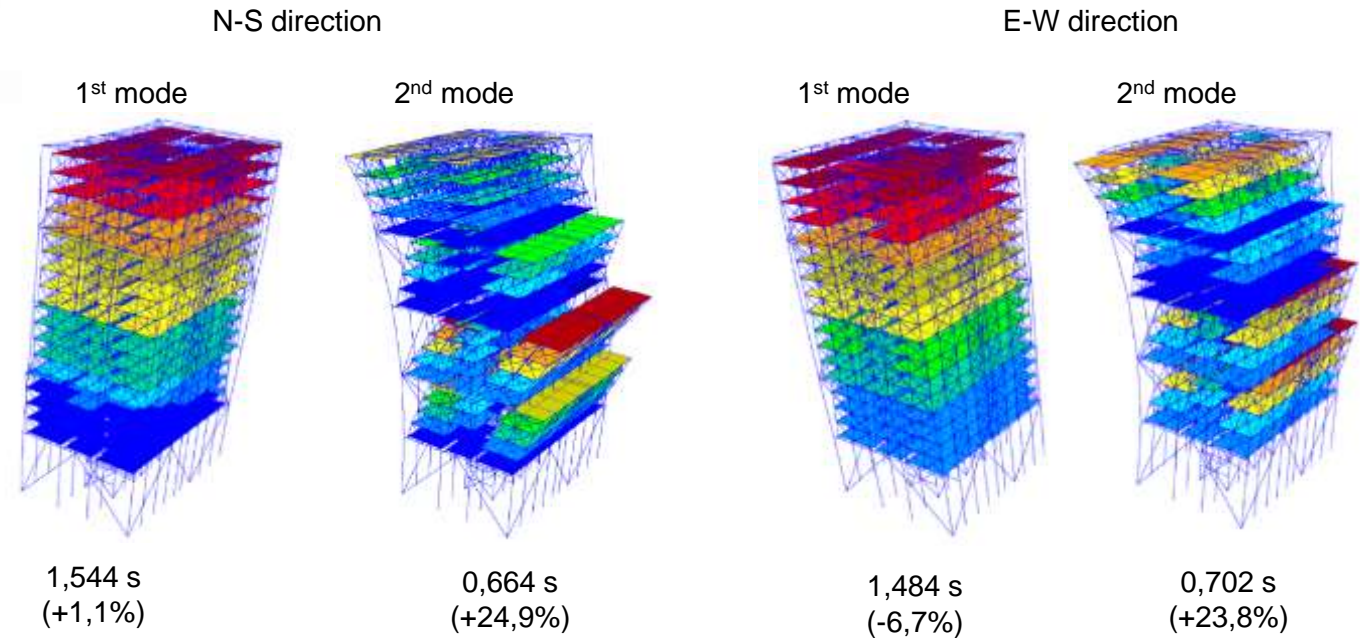
Aucun effort dans les modules.

Sous charges sismiques

Augmentation des efforts dans les modules avec la hauteur. Efforts pouvant être résistés par des configurations conventionnelles.

Déplacements des sous-structures

Déviations inter-étages des sous-structures :
40% de la limite prescrite de 75mm



Modes requis pour atteindre 90% de masse modale participante

Résultats – Glulam connecté aux étages

En rafale

Sous charges gravitaires

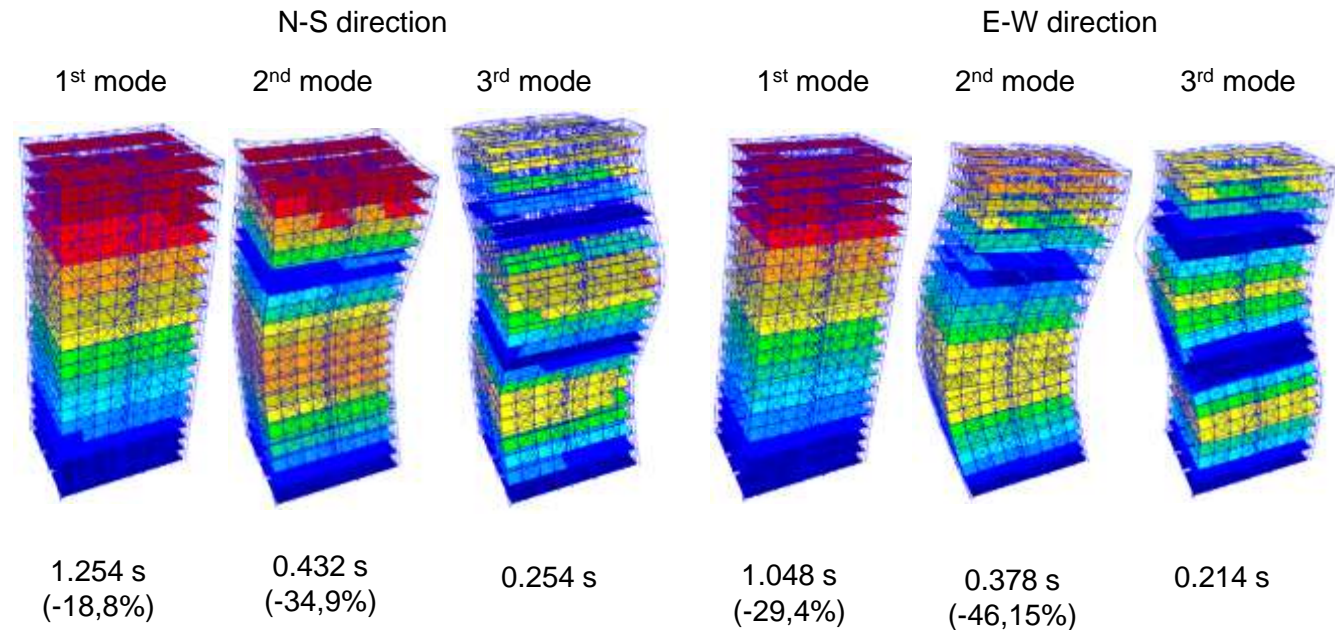
Déformation des hyper-planchers sous charges gravitaires crée des efforts dans les murs de refend des modules.

Sous charges de vent

Efforts dans les murs de refend mais inférieurs à ceux causés par les charges sismiques.

Sous charges sismiques

Charges sismiques augmentées d'environ 30% car augmentation de la rigidité du bâtiment. Déformations moins grandes donc les murs de refend reprennent au final moins d'efforts.



Modes requis pour atteindre 90% de masse modale participante

Résultats – Béton connecté au plancher

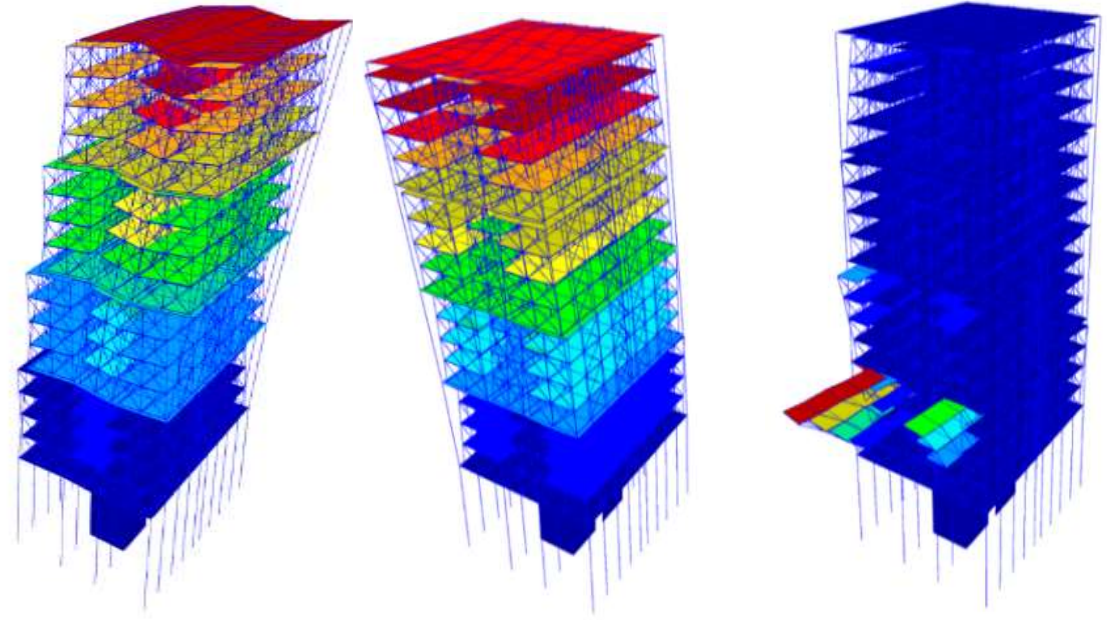
En rafale

90% masse modale participante

Pas possible d'atteindre 90% de participation de la masse modale. La période fondamentale des sous-structures (0,545s) est plus courte que les périodes des modes supérieurs du système complet.

On obtient donc des modes de vibration où l'hyperstructure est immobile pendant que les sous-structures vibrent, n'apportant presque aucun apport à la masse modale participante.

Le concept a donc été rejeté.



Mode 1 : 1.482 s

Mode 2 : 1.261 s

Mode 3 : 0.592 s

Premiers modes de vibration du système

Résultats – Béton connecté aux étages

En rafale

Sous charges gravitaires

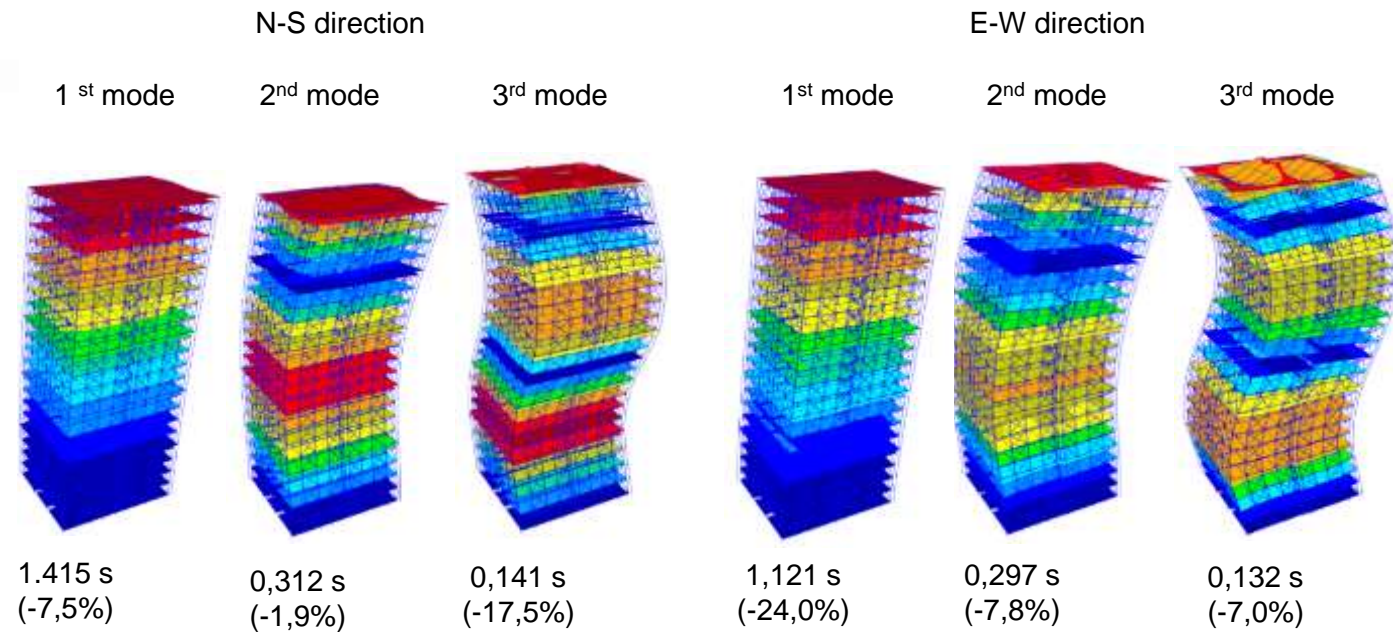
Déformation des hyper-planchers moins élevée: donc efforts environ 1,8 fois moins élevés dans les murs de refend

Sous charges de vent

Efforts dans les murs de refend mais inférieurs à ceux causés par les charges sismiques.

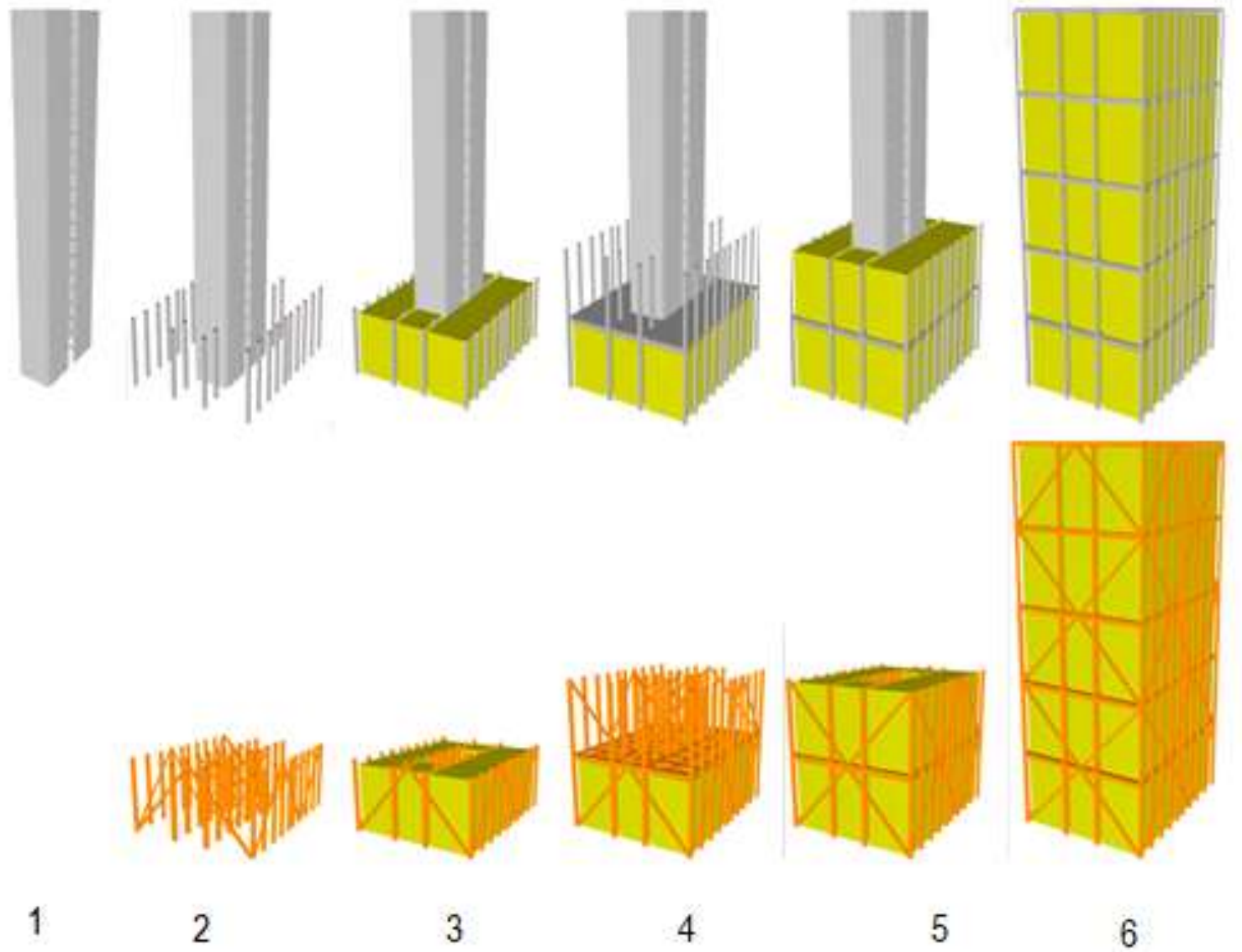
Sous charges sismiques

Augmentation des efforts dans les modules avec la hauteur. Efforts pouvant être résistés par des configurations conventionnelles.



Modes requis pour atteindre 90% de masse modale participante

Installation / Préfabrication



Conclusions

- Le concept d'hyperstructure en glulam pour un bâtiment de 20 étages est viable à la fois pour les sous-structures modulaires reliées uniquement aux hyperplanchers et pour les sous-structures modulaires reliées aux colonnes et aux hyperplanchers.
- Le concept d'hyperstructure en béton pour un bâtiment de 20 étages n'est viable que si les sous-structures modulaires sont reliées aux colonnes, aux noyaux et aux hyperplanchers.
- Les configurations conventionnelles des murs de cisaillement sont suffisantes pour résister au cisaillement dû aux charges gravitationnelles, de vent et sismiques.
- Contrairement à d'autres systèmes structurels, les forces gravitationnelles peuvent induire un cisaillement important dans les murs de refend des modules.



Merci

Nicolas Labrecque
Candidat à la maîtrise en génie du bois et
matériaux biosourcés

nicolas.labrecque.2@ulaval.ca