

SimLaw Timber

Application des lois de similitude aux structures bois pour réaliser des essais à échelles réduites

CONSTRUCTION / AMENAGEMENT BOIS



Crédits photos : FCBA

Réalisation :

Avec le soutien du :

REALISATION



L'Institut Technologique FCBA (Forêt Cellulose Bois-Construction Ameublement), a pour mission de promouvoir le progrès technique, participer à l'amélioration de la performance et à la garantie de la qualité dans l'industrie. Son champ d'action couvre l'ensemble des industries de la sylviculture, de la pâte à papier, de l'exploitation forestière, de la scierie, de l'emballage, de la charpente, de la menuiserie, de la préservation du bois, des panneaux dérivés du bois et de l'ameublement. FCBA propose également ses services et compétences auprès de divers fournisseurs de ces secteurs d'activité. Pour en savoir plus : www.fcba.fr

FINANCEMENT



Le CODIFAB, Comité Professionnel de Développement des Industries Françaises de l'Ameublement et du Bois, fédère et rassemble 4200 PME et plus de 15 000 artisans, industriels français de l'ameublement et du bois. Le CODIFAB a pour mission de conduire et financer, par le produit de la Taxe Affectée, des actions d'intérêt général décidées par les organisations professionnelles représentatives :



Ces actions, collectives, ont pour objectif d'accompagner l'évolution des entreprises de création, de production et de commercialisation, par : une meilleure diffusion de l'innovation et des nouvelles technologies, l'adaptation aux besoins du marché et aux normes environnementales, la promotion, le développement international, la formation, et par toute étude ou initiative présentant un intérêt pour l'ensemble de la profession. Pour en savoir plus : www.codifab.fr

Détails objectifs et contexte

Les bâtiments bois de moyenne et grande hauteur sont adaptés aux exigences d'un développement urbain durable car d'une part, ils sont un atout pour la densification urbaine et d'autre part, ils permettent de diminuer l'impact environnemental des villes. Pour mieux connaître le comportement des immeubles en bois à plusieurs niveaux, en particulier face aux sollicitations horizontales telles que le vent ou le séisme, des études restent cependant nécessaires. En effet, à ce jour le marché principal de la construction bois se limite aux petits ouvrages courants de 2 à 3 niveaux. Or, l'élévation des ouvrages bois est un enjeu fort, mais présente aussi des contraintes techniques importantes. Entre autres, la grande légèreté du matériau bois qui le rend plus sensible aux sollicitations dynamiques dues aux vibrations liées aux déplacements des personnes, ce qui peut générer de l'inconfort chez les usagers.

Pour ce type de bâtiment, les essais à échelle réelle sont difficilement envisageables car ils nécessitent des moyens expérimentaux exceptionnels et coûteux. Une solution serait de recourir à des maquettes-prototypes à échelle réduite. Se pose alors une question de représentativité : dans quelle mesure les réponses (déplacements, contraintes, ...) sur modèle réduit sont représentatives des réponses à l'échelle réelle ? La méthode des lois de similitude permet de répondre partiellement à ce questionnement. Elle a été développée initialement dans le domaine de la mécanique des fluides (par exemple pour l'écoulement de l'air en aéronautique, ou de l'eau dans les sols) et a clairement prouvé son efficacité.

L'objectif des lois de similitude est de permettre d'évaluer les propriétés d'un élément de grandes dimensions en réalisant des essais sur des éléments à une échelle réduite. Pour cela, des facteurs de similitude sont définis, pour chaque variable x_k par le rapport :

$$\lambda_{x_k} = \frac{x_k^F}{x_k^R}$$

Avec x_k^F et x_k^R respectivement les valeurs de x_k à l'échelle 1 (Full scale) et à l'échelle réduite (Reduced scale). L'ensemble de ces facteurs constitue une loi de similitude. La méthodologie est résumée sur la Figure 1.

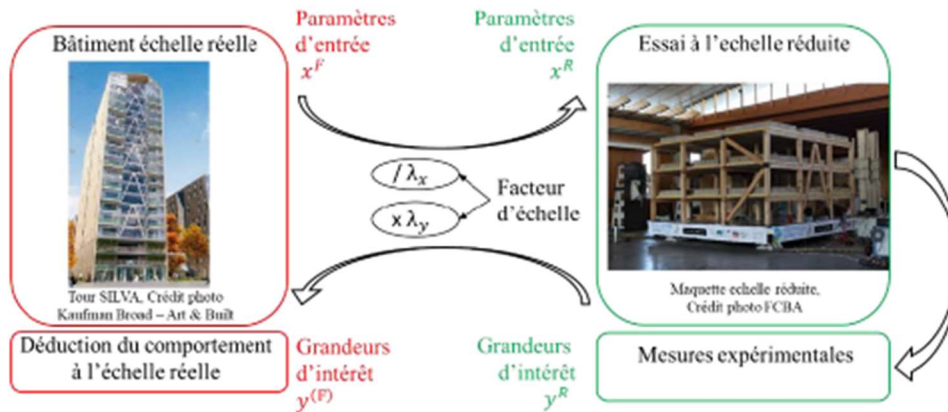


Figure 1 - Méthodologie des lois de similitudes

Les lois de similitudes ont été abondamment utilisés dans le cadre de la mécanique des fluides, dans le secteur de l'aéronautique et plus récemment en génie civil. Aucun développement de lois de similitudes spécifiques pour la construction bois n'avait été réalisé à notre connaissance.

L'objet de ces travaux est de caractériser et d'optimiser l'emploi de lois de similitude pour des constructions bois. Il s'agit donc de quantifier les erreurs d'estimations lorsque des lois usuelles sont utilisés pour concevoir une maquette réduite d'un bâtiment bois, et de proposer des optimisations de ces lois pour améliorer la précision des essais et relever certaines contraintes techniques.

Les lois de similitude usuelles fonctionnent très bien pour des structures réalisées avec des matériaux homogènes et pour lesquelles il est possible de réaliser une homothétie parfaite des dimensions géométriques. Dans le cas des structures bois, du fait de la nature composite et très variable du matériau, le comportement des structures va varier suivant les échelles. De plus certains composants (broches, platines...) ne peuvent pas être réduits autant que souhaités du fait de contraintes techniques. Les deux difficultés à relever sont la prendre en compte les variabilités et caractéristiques des matériaux et assemblages et d'être capable d'intégrer des distorsions dans la conception dans les lois de similitudes.

Détails Principaux résultats.

L'étude expérimentale s'est portée sur une structure particulière de type portique reproduite à trois échelles différentes. La solution étudiée n'est bien sûr pas représentative de l'ensemble des solutions techniques existantes dans la construction bois, mais c'est une solution suffisamment réaliste, typique des constructions de moyenne et grande hauteur, et qui présentent des particularités scientifiques singulièrement adaptées pour une étude théorique en parallèle. Des essais statiques sont d'abord réalisés sur les assemblages et la structure, afin de déterminer les facteurs de similitude sur leur comportement statique. Ensuite, une analyse modale expérimentale est effectuée afin d'identifier les facteurs sur ses propriétés dynamiques. La structures et des exemples de ruptures lors d'essais statiques et cycliques sont illustrés sur la Figure 2.

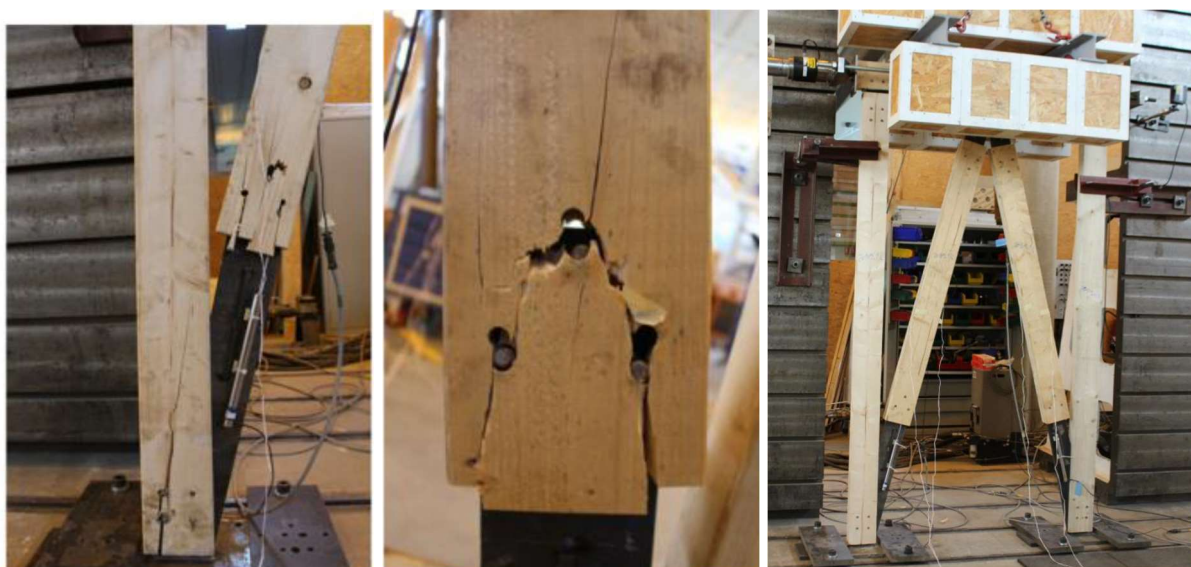


Figure 2 - Un des portiques d'essai (à droite) Profil de rupture (à gauche et au centre)

Les essais permettent d'identifier les paramètres physiques de chaque portiques et assemblages (rigidité, capacité portante, amortissement) et de déterminer des facteurs de similitude « expérimentaux » en calculant les rapports entre les différents paramètres. Un exemple de résultat est donné au Tableau 1. Les facteurs de similitude expérimentaux trouvés sont parfois sensiblement différents de ceux prévu par les lois de similitudes usuels basées sur l'analyse dimensionnels, ce qui justifie la suite de l'étude.

Variable d'intérêt	Echelle 1	Echelle 1/2	Echelle 1/3
Nombre d'essais	3	3	3
$K_{ua}(kN/mm)$	$2,21 \pm 6,8\%$	$0,76 \pm 23\%$	$0,47 \pm 6\%$
$F_{ma}(kN)$	$30,7 \pm 3,4\%$	$10,1 \pm 8\%$	$4,0 \pm 1,2\%$
$u_{ma}(mm)$	$32,6 \pm 34$	$39,8 \pm 22\%$	$24,4 \pm 16\%$

Tableau 1 - Résultats des essais cycliques sur la structure - Raideur élastique, Force à la rupture et déformation à la rupture pour les portiques aux trois échelles.

Des essais dynamiques ont été réalisés sur table vibrante. Ils ont révélé la présence de mode non-linéaire dans la structure dus aux jeux et frottement dans les assemblages qui réduise fortement l'amplitude maximale des vibrations de la structure face à une sollicitation dynamique. La compréhension fine de ces phénomènes pourrait aboutir à une meilleure conception des ouvrages vis-à-vis du vent et des séismes.

Il n'y a pas de solutions uniques pour définir une loi de similitude. Cependant, suivant le choix de la loi, l'extrapolation à l'échelle 1 sera plus ou moins incertaines, surtout en présence de **distorsions** (géométriques ou matérielles) qui ne respectent pas parfaitement la loi de similitude du fait de contraintes techniques. Pour déterminer les facteurs de similitude, les principales méthodes, DA et STAGE, sont étudiés. La méthode DA est basée sur la constitution de nombres adimensionnels, donc sur l'analyse dimensionnelle. Les facteurs de similitude associés à chaque grandeur de même dimension sont donc dans ce cas toujours égaux. La méthode STAGE consiste à déterminer puis utiliser les équations du problème, pour constituer les relations de similitude. L'équation n'est cependant pas à résoudre. Les avantages et inconvénients des deux méthodes sont indiqués dans le Tableau 2.

Méthode	DA	STAGE
Avantages	Non nécessité de déterminer l'équation	Les facteurs de similitude garantissant la conservation de l'équation du comportement sont systématiquement admis
Inconvénients	Il est possible que des facteurs de similitude garantissant la conservation l'équation du comportement ne soient pas admis	nécessité de déterminer l'équation

Tableau 2 - Avantages et inconvénients des méthodes DA et STAGE

Les lois de similitude usuels sont basées sur la méthode DA. Dans le cadre de ce projet, c'est la seconde méthode qui a été retenue, car elle aboutit à des relations

de similitude moins restrictives que la première méthode : certains paramètres pouvant être relaxés et évoluer indépendamment des autres, ce qui permet d'autoriser certaines distorsions sans influence sur les résultats de l'extrapolation. Ensuite, les non linéarités de comportement des assemblages bois ont pu être intégrées dans les relations de similitude.

A partir des facteurs sur les assemblages puis des relations de similitude, des facteurs ont été estimés pour le comportement de la structure. Pour certaines variables d'intérêt, des différences ont été constatées entre les facteurs estimés et expérimentaux. Ces différences sont en parties dues à la variabilité expérimentale, à un manque de connaissance du comportement des assemblages, et aux distorsions dans les paramètres de la structure. Cela soulève ainsi les limites de l'approche analytique. Pour mieux comprendre ces limites, des modèles numériques aux éléments finis sont établis au chapitre suivant.

Les assemblages et la structure bois ont été modélisés numériquement. Les objectifs de ces modélisations sont multiples. Dans un premier temps, il s'agit de réussir à reproduire les essais pour valider le modèle et comprendre les phénomènes qui ont le plus d'effet sur les variables d'intérêt (par exemple quantifier l'importance du contact bois-broche). Ensuite, en modifiant certains paramètres du modèle numérique, il sera possible de quantifier l'effet des distorsions. Enfin, le modèle numérique va permettre de mener des études probabilistes pour bien appréhender l'effet des incertitudes et leur propagation des données d'entrée vers les variables d'intérêt. Les modèles numériques des assemblages et des portiques sont représentés en Figure 3.

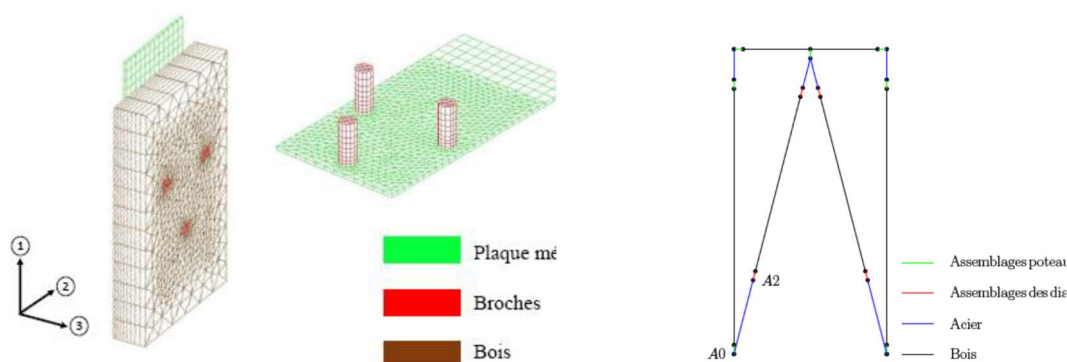


Figure 3 - Modèle numérique 3D des assemblages (à gauche) et modèle filaire des portiques (à droite)

Les modèles numériques permettent de comprendre les différences entre les facteurs de similitudes obtenus expérimentalement et ceux théoriques en intégrant

l'effet des distorsions et la variabilité. Pour certains paramètres néanmoins, notamment la raideur des assemblages, des hypothèses fortes sont nécessaires (diminution du module du bois localement au voisinage des contacts) pour que les résultats numériques correspondent aux essais. La compréhension des propriétés du bois et des interfaces dans les assemblages reste un axe de travail important.

Des campagnes de calcul ont aussi été menées afin d'évaluer l'effet des distorsions. Les campagnes ont montré que l'impact des distorsions étaient relativement faibles tant que la distorsion était limitée (rapport de 2 maximum entre la valeur idéale et celle utilisé). Dans ce cas, la distorsion peut être traité comme une variabilité et ajouté aux incertitudes des essais. Dans le cas où la distorsion est importante, il convient d'en tenir compte dans les lois de similitude avec une approche de type STAGE si possible ou par méthodes numériques.

Des calculs ont été réalisés pour des essais dynamiques pour valider la méthodologie dans le contexte d'essais sismiques. Une loi de similitude particulière a été définis de façon à optimiser l'extrapolation des résultats avec une maquette numérique à échelle réduit en fonction des distorsions de la structure.

Suite à l'expérience acquise dans le cadre de ce projet, une méthodologie de dimensionnement de maquette à échelle réduite a été proposé afin d'améliorer leur représentativité et d'éviter certains écueils. Globalement, il s'agit d'aborder précisément le dimensionnement des assemblages et de vérifier les risques d'instabilités dépendant de l'échelle. Ensuite de limiter au maximum les distorsions et de quantifier leurs impacts, notamment les tolérances (jeux, qualité bois, état de surface) qui varient suivant les échelles des structures. Enfin, l'incertitude liée à la mesure doit être quantifiée, pour vérifier que le niveau de réduction ne mène pas à des résultats inexploitable.

Détail Points clés et valorisation

- Meilleure conception des maquette échelles réduites
- Amélioration des modèles prédictifs de rigidité d'assemblages
- Détermination de propriété non-linéaire dans le comportement des structures assemblées
- Potentiel extrapolation des lois de similitude pour les structure bois dans d'autres domaines physiques (acoustique, feu ...)

Publications	
Publication(s) scientifique(s) ou techniques	« Timber connection behaviour characterisation based on similitude laws » Construction and Building Materials, 2021
Rapport d'études et communications associées	« Rapport final du projet de recherche simlaw timber » ADEME, 2021 « Lois de similitude et modélisation du comportement mécanique des structures bois multi-niveaux : apports, limites et prise en compte de l'incertain. », thèse, 2022 – soutenance en février 2022
Communication(s) scientifique(s) (ex : colloque) - Oraux	« Caractérisation des propriétés mécaniques de systèmes constructifs bois pour essais à échelle réduite- Lois de similitude » RUGC 2021 « Characterisation of timber connection behaviour from reduced scaled experiments based on similitude laws » WCTE 2020
Communication(s) scientifique(s) (ex : colloque) - Poster	GDR bois 2019 – 2020 RUGC 2019 JFMS 2020

Accès aux résultats complets de cette étude :

www.codifab.fr