
Lois de similitude et modélisation du comportement mécanique des bâtiments bois multi-niveaux

Yann SOUSSEAU^{1,2}, Sidi Mohammed ELACHACHI¹, Myriam CHAPLAIN¹, Thomas CATTEROU², Patrice GARCIA²

¹ Institut de Mécanique et d'Ingénierie, Département Génie Civil et Environnemental, Université de Bordeaux, Bat B18, Allée Geoffroy St Hilaire, CS 50023 – 33615 Pessac Cedex, France, yann.sousseau@u-bordeaux.fr

² Institut technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement, Allée de Boutaut, 33800 Bordeaux, France

RÉSUMÉ. Aujourd'hui, le développement de bâtiments en bois de moyenne ou grande hauteur est une réponse pertinente aux enjeux environnementaux et à la densification urbaine. Effectuer des essais sur de tels ouvrages, pour mieux comprendre leur comportement, est difficilement envisageable aux échelles réelles. La solution que l'on se propose d'étudier est d'expérimenter des structures réduites et à l'aide de lois de similitude, en déduire le comportement de l'ouvrage à taille réelle. Nous nous proposons de présenter dans cette communication une revue de la littérature avec quelques applications. L'état de l'art montre que la théorie des lois de similitude développée initialement dans le domaine de l'aérospatial et de l'aéronautique, puis exploitée dans le domaine du génie civil est quasi-inexistante dans le domaine de la construction bois qui présente des problématiques spécifiques. Plusieurs méthodes permettent de constituer des lois de similitude. Nous envisageons d'établir des lois de similitude pour une construction bois à plusieurs niveaux (R+4 ; R+5). La conception du prototype réduit se fera à différentes échelles : celle de l'assemblage et celle de la structure, en lien avec les codes normatifs.

ABSTRACT. Today, development of middle or high-rise timber buildings is a relevant response to environmental issues and urban densification. Testing on such structures, in order to understand their behavior, is still hardly possible in real size. The solution we propose to study is, to experiment a reduced structure, and using similitude laws, to deduce the real size structure's behavior. We propose to present in this communication, a literature review with some applications. State of the art shows that similitude laws theory initially developed in aerospace and aeronautics, and then exploited in civil engineering, is almost absent in timber, which brings specific issues. Several methods make it possible to constitute similitude laws. We will establish similitude laws for a middle-rise timber (R+4; R+5). The reduced prototype's design will be carried out on different scales: joint's scale and structure's scale, in conjunction with regulatory standards.

MOTS-CLÉS : bâtiment, bois, mécanique, essai, modélisation, modèle réduit, théorème π

KEY WORDS : building, timber, mechanic, experiment, modelling, reduced model, π theorem

1. Contexte et problématique

La construction en bois s'inscrit dans la logique de développement durable, mais du fait de la légèreté du matériau, la conception de bâtiment de grande hauteur assurant sécurité et confort des occupants est complexe et nécessite des études spécifiques.

Notre projet souhaite apporter une contribution significative à leur développement en permettant une meilleure compréhension du comportement mécanique de tels bâtiments. Il ciblera en particulier les structures poteaux poutres, contreventées par triangulation.

L'expérimentation est le procédé privilégié pour appréhender le comportement d'une structure, en particulier son comportement dynamique. Réaliser des essais sur une structure à taille réelle nécessiterait des moyens exceptionnels et coûteux. Aussi, la solution proposée consiste à tester une maquette représentative, dont la conception est basée sur une loi de similitude. A partir du comportement observé sur cette maquette (contrainte, déplacement, fréquence propre, amortissement, ...), la loi de similitude permet d'en déduire le comportement du prototype (Figure 1).

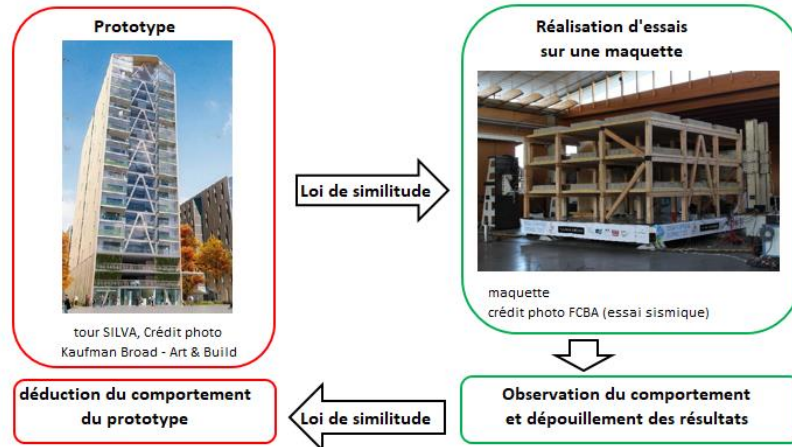


Figure 1. Principe des lois de similitude

Une loi de similitude est définie par un ensemble de coefficients de similitude. C'est en affectant à chaque caractéristique x de la structure, le coefficient de similitude λ_x associé, que la maquette est définie (dimensions, sollicitations, propriétés du matériau...). Plus précisément, si x prend la valeur x_P pour le prototype, la valeur prise par x pour la maquette est $x_M = x_P \cdot \lambda_x$. Ensuite, en mesurant la variable d'intérêt y (déplacement, contrainte...) sur la maquette y_M , celle sur le prototype est estimée par $y_P = y_M / \lambda_y$.

2. Etat de l'art

La théorie des lois de similitude a été développée initialement dans le domaine de l'aérospatial et de l'aéronautique, depuis la fin des années 1960 [COU 16]. C'est seulement vers la fin du 20^e siècle qu'elle suscita l'intérêt dans le domaine du génie civil (solides et structures). Une recherche bibliographique montre en effet quelques utilisations et développements de la théorie des similitudes, pour les constructions métalliques ou en béton armé. En revanche, aucune étude ne semble avoir été menée dans le domaine de la construction bois. Or, certaines spécificités de ce matériau amène à de nombreux questionnements par rapport à la théorie des lois de similitude :

- La non linéarité du comportement est-elle conservée par la réduction de la structure ?
- L'anisotropie du matériau a-t-elle un impact sur les lois de similitude ?
- Comment prendre en compte l'influence des hétérogénéités (nœuds, cernes...) par la réduction de la structure ?

Deux grandes familles de construction de lois de similitude se détachent : celles basées sur l'analyse dimensionnelle (TSM) et celles basées sur les équations de mouvement (STAGE).

L'utilisation de l'analyse dimensionnelle [WIS 68] présente l'atout remarquable d'être utilisable sans aucune connaissance des équations associées au problème étudié (de mouvement ou d'équilibre, de comportement,...). Une fois le choix des paramètres pertinents effectué, la méthode consiste en une analyse dimensionnelle. Cette méthode est basée sur le théorème de Vaschy et Buckingham (théorème π), qui énonce qu'un modèle réduit est représentatif du modèle à taille réelle si les grandeurs sans dimension caractéristiques sont conservées.

L'utilisation des équations gouvernant le problème étudié requière la connaissance de celles-ci, mais elle ne nécessite pas leur résolution. Cette méthode a été présentée par Simitses [SIS 93] et Coutinho [COU 17] pour l'étude du comportement mécanique de plaques, en utilisant les équations différentielles associées.

Quelque-soit la méthode utilisée, les lois de similitude ne sont pas uniques. Par exemple, dans la littérature [KIM 04], les lois les plus couramment utilisées sont basées sur une conservation de la masse, de l'accélération ou

du temps. Ce sont souvent les contraintes techniques qui permettent de déterminer quelle loi utiliser. Par exemple, une loi basée sur la masse impose un facteur de similitude différent de 1 pour la gravité, ce qui n'est pas envisageable expérimentalement.

La loi basée sur l'accélération semble être la mieux adaptée pour les constructions bois, en effet, elle permet de conserver la gravité. Seulement, certaines spécificités du bois (hétérogénéité du matériau par exemple) rendent la loi difficilement utilisable, c'est pourquoi elle sera amenée à être optimisée.

Un autre verrou important pour l'utilisation de cette loi de similitude est la non-linéarité du comportement du matériau. En effet, lorsque le comportement non linéaire n'est pas conservé par la réduction de la structure, les lois de similitude traditionnelles ne sont plus applicables.

Pour l'étude du comportement d'une structure en béton à un degré de liberté soumise à un séisme, Kim [KIM 09] propose une loi de similitude prenant en compte la non linéarité du comportement du matériau. Bien que cette loi fonctionne en théorie car validée par des simulations numériques, elle introduit une nouvelle difficulté sur les aspects pratiques. En effet, en faisant varier les facteurs de similitude dans le temps, elle impose de faire varier certaines caractéristiques, telles que la masse, de la maquette durant l'essai, ce qui rend celui-ci irréalisable.

Une autre loi a été proposée dans la littérature. En déformant localement le signal d'accélération du sol (les durées du signal), Park [PAR 17] parvient également à ramener les facteurs de similitude constants durant l'essai. Seulement, la déformation du signal doit être calculée en temps réel, en fonction du comportement observé de la structure, ce qui mobilise une grande réactivité des outils de mesure et de traitement, et des appareils mécaniques.

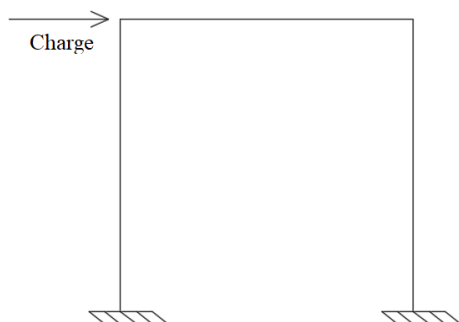
La prise en compte de la non-linéarité a été évaluée pour des simulations numériques, mais les modifications apportées aux lois de similitudes ne sont pas utilisables expérimentalement. Des modifications de ces lois sont nécessaires pour rendre les essais réalisables. Pour cela, une solution envisagée est de prioriser les grandeurs d'intérêt pour lesquelles la loi serait utilisable.

3. Applications de la théorie des lois de similitude

Il est présenté dans cette partie un exemple d'application de la théorie des lois de similitude sur une structure portique (Figure 2). On recherche les déplacements sur un prototype à partir d'une maquette à l'échelle 1/2.

Il est utilisé dans un premier temps la méthode TSM (Tableau 1). Avec cette méthode, les grandeurs de même dimension doivent avoir le même facteur de similitude, d'où $\lambda_b = \lambda_h = \lambda_L = \lambda_u$. Ensuite, si $[F] = [E][L]^2$, alors on doit avoir $\lambda_F = \lambda_E \lambda_L^2$. Le facteur de similitude λ_L est choisi à 1/2, et λ_E est choisi à 1 afin de conserver le matériau entre le prototype et la maquette.

Il est ensuite utilisé la méthode STAGE (Tableau 1). Si on considère que les éléments de structure obéissent à la théorie des poutres et sont gouvernés uniquement par la flexion, on peut écrire à partir des équations d'équilibre, $F \propto Ebh^3u/L^3$, ce qui conduit à $\lambda_u = \lambda_F \lambda_L^3 / \lambda_E \lambda_b \lambda_h^3$. Le facteur de similitude λ_E est, comme précédemment, choisi dans un souci de conservation du matériau ; λ_F est choisi à 1/5 de façon à minimiser la charge à appliquer par les vérins ; λ_b et λ_h sont choisis afin de conserver la section.



paramètres	unités	facteurs de similitude	
		STAGE	TSM
Dimensions structure : L	m	1/2	1/2
Largeur section : b	m	1	1/2
Hauteur section : h	m	1	1/2
Module d'élasticité : E	N / m ²	1	1
chargements : F	N	1/5	1/4
déplacements : u	m	1/40	1/2

facteurs choisis

facteurs imposés par la théorie des lois de similitude

Figure 2. Structure Portique étudiée

Tableau 1. Lois de similitude obtenues

Par rapport à la méthode TSM, la méthode STAGE offre plus de liberté sur la conception de la maquette. Par exemple, cette dernière permet d'utiliser des sections standards de bois, plutôt que des sections particulières, pour la maquette.

4. Conclusion et perspectives

La théorie des lois de similitude a été développée dans de nombreux domaines, mais aucune étude ne semble avoir été menée dans la construction bois, qui pourtant amène à de nombreux questionnements par rapport aux lois de similitude. Plusieurs méthodes permettent de constituer des lois de similitude, aboutissant sur un ensemble de lois utilisables. La loi basée sur l'accélération [KIM 04] semble être la mieux adaptée pour les constructions bois car elle permet de conserver la gravité.

La conception de la maquette portera en premier lieu sur ses assemblages dont le comportement devra être représentatif de l'échelle 1. Cette représentativité sera évaluée numériquement avec une approche éléments finis, puis par des essais.

Ensuite, la conception sera portée à l'échelle d'un mur représentatif, en intégrant le comportement des assemblages obtenu. Les verrous associés à cette étape seront d'une part l'hétérogénéité et la non linéarité du comportement du matériau. Une modélisation du comportement de la structure sera alors réalisée, puis validée par des essais.

5. Bibliographie

- [COU 16] COUNTINHO C. P., BAPTISTA A. J., DIAS RODRIGUES J. « Reduced scale models based on similitude theory: A review up to 2015 », *Engineering Structures*, vol. 119, 2016, p. 81–94.
- [COU 17] COUNTINHO C.P. Structural reduced scale models based on similitude theory, University of Porto, 2017.
- [KIM 04] KIM N.S., KWAK Y.H., CHANG, S.-P. « Pseudodynamic Tests on Small-Scale Steel Models Using the Modified Similitude Law », Vancouver, 1-6 août 2004.
- [KIM 09] KIM N.S., LEE J.H., CHANG S.P. « Equivalent multi-phase similitude law for pseudodynamic test on small scale reinforced concrete models ». *Engineering Structures*, vol. 31, 2009, p. 834–846.
- [PAR 17] PARK J. Similitude Law Considering the Variation of Strain Ratio for Dynamic Test using Scaled Model with Composite Material, Thèse de doctorat, Seoul National University, 2017.
- [SIM 93] SIMITSES G. J., REZAEPAZHAND J. « Structural similitude for laminated structures ». *Composites Engineering*, vol. 3, 1993, p. 751–765.
- [WIS 68] WISSMUNN W. Dynamic Stability of Spacevehicles, rapport de recherche, septembre 1968, NASA.