

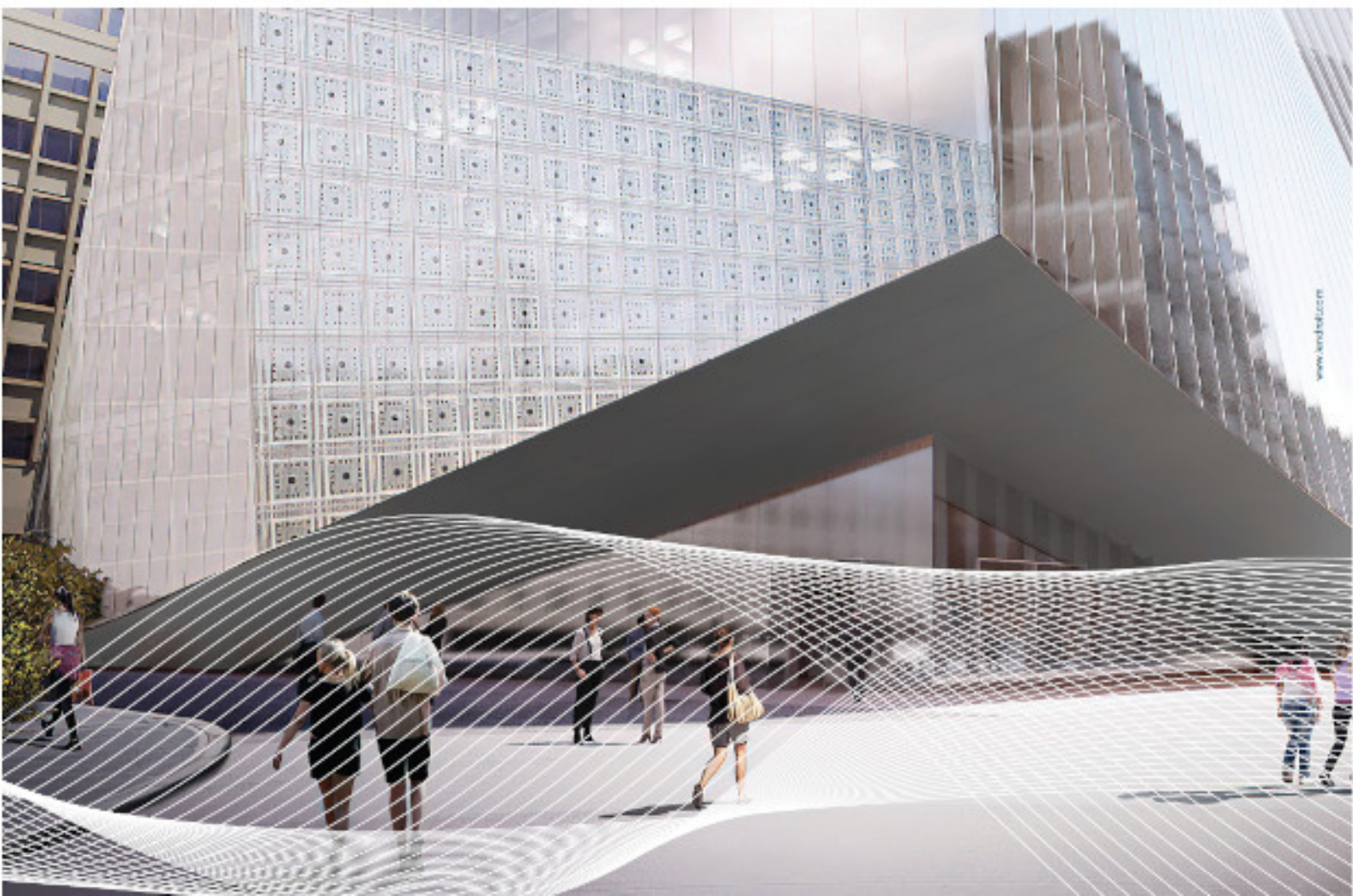


17^e Congrès Français d'Acoustique
27-30 avril 2025, Paris

Modélisation par éléments finis d'un bâtiment CLT soumis à une source vibratoire extérieure : comparaison calculs-mesures

G. Gillot ^a et T. Lethuillier ^a

^a Groupe Gamba, 163 rue du Colombier, 31670 Labège, France



L'utilisation du bois dans la construction de bâtiments augmente depuis plusieurs années. L'émergence de ces nouvelles structures amène des problématiques inédites concernant le traitement des vibrations extérieures et intérieures. Des simulations numériques sont nécessaires pour évaluer correctement les potentielles nuisances et dimensionner les traitements adaptés. Cependant, la complexité des structures en bois, comme le bois lamellé-collé (CLT), par rapport au béton classiquement utilisé, amène des incertitudes et des coûts supplémentaires pour la modélisation numérique.

L'objectif de cette étude est de déterminer les contraintes d'une modélisation numérique pour l'étude de bâtiments en bois. A partir d'un bâtiment de 4 étages en CLT nouvellement construit, des modèles numériques employant la méthode des éléments finis sont développés. Des mesures vibratoires sont réalisées sur le bâtiment, à différents étages, à l'aide d'une excitation du sol extérieur par un rouleau compresseur au pied du bâtiment. Ces mesures sont utilisées pour caler les différents modèles. Des modèles en 2.5D et en 3D sont comparés et différents niveaux de détails sont mis en place afin d'obtenir un modèle à la fois proche des mesures et léger en coût numérique.

1 Introduction

L'utilisation de bois dans la construction de bâtiments a augmenté récemment, principalement grâce à son impact carbone plus bas que celui du béton. Cependant, les structures en bois sont plus légères et donc plus sensibles aux sources vibratoires [1]. Les traitements acoustiques et vibratoires doivent donc être adaptés par rapport aux bâtiments classiques en béton, afin d'éviter les nuisances. La détermination des risques acoustiques et vibratoires pour des bâtiments dépend de l'étude de modèles numériques. Ces modèles simplifiés donnent généralement de bons résultats en adéquation avec les mesures dans le cas de bâtiments en béton. Mais le bois est un matériau anisotrope, d'une grande variabilité et qui nécessite des structures complexes, ce qui le rend difficile à intégrer correctement dans les modèles existants [2].

Les planchers en bois sont généralement étudiés pour les problèmes d'excitation intérieure, comme les bruits de pas. La géométrie simple et la taille limitée de ce genre de problème permet de prendre en compte les détails de la structure en bois et de modéliser les nombreuses liaisons [3]. Cependant, la modélisation d'un bâtiment entier rend difficile la prise en compte de ces détails, autant en terme de temps d'implémentation qu'en coût numérique. Ces deux paramètres doivent être minimisés au maximum pour optimiser le temps d'étude. La première difficulté concerne la composition multicouche et le caractère orthotrope des panneaux CLT, qui peuvent être pris en compte grâce aux formulations adaptés en éléments finis [4] ou bien réduits à l'utilisation de coques simples [5]. Les autres détails de la structure, notamment les liaisons entre panneaux, sont généralement ignorés ou compensés par des paramètres globaux [6]. Cela ne semble pas grandement affecter les résultats comparés aux mesures pour les basses fréquences, dans le cas d'études sismiques, mais l'effet de ces liaisons peut prendre de l'importance avec l'augmentation de la fréquence.

La modélisation des effets du sol est également essentielle pour reproduire correctement le comportement du bâtiment [7]. Cependant, il est rarement possible de modéliser la source, le sol et le bâtiment dans un modèle de taille raisonnable. Le sol étant le domaine le plus lourd à modéliser, des méthodes existent afin de réduire

ses effets aux fondations du bâtiment. Ces méthodes considèrent des contacts ponctuels entre les fondations et le bâtiment [8, 9, 10, 11], ce qui fonctionne pour des bâtiments en surface avec des fondations en pieux mais ne s'appliquent pas directement à des bâtiments avec sous-sol, qui présentent des contacts surfaciques avec le sol. Une méthode de réduction de modèle a été développée spécifiquement pour ce genre de situation et est utilisée dans ces travaux [12].

L'objectif de ces travaux est de mettre en évidence les simplifications possibles pour modéliser un bâtiment en structure bois soumis à une source vibratoire extérieure, pour obtenir un temps d'implémentation et de calcul compatible avec les contraintes d'un bureau d'études tout en obtenant des résultats cohérents avec des mesures sur le terrain. Des modèles 2.5D et 3D utilisant la méthode des éléments finis sont comparés avec des mesures sur un bâtiment en CLT de 4 étages avec une excitation extérieure.

2 Mesures

Le bâtiment considéré est constitué d'une base en béton, allant du sous-sol jusqu'au plancher haut du rez-de-chaussée. Sur cette base est montée une structure en CLT sur 3 étages supplémentaires, comme illustré sur la Figure 1. Ce bâtiment est excité par un rouleau compresseur situé sur le sol à 10 m de la façade. Des accéléromètres sont placés sur le sol extérieur, à proximité du point d'excitation. Des mesures avec une masse munie d'un capteur de force au point d'excitation permettent de mesurer la mobilité locale, et ainsi de remonter à la force injectée par le rouleau compresseur, affichée en Figure 2. La composition du sol est caractérisée en utilisant la méthode MASW [13]. Les résultats montrent une composition en trois couches dont les propriétés sont données dans le tableau 1. Pour chaque point présenté sur la Figure 1, deux capteurs sont placés à deux positions sur le plancher de la pièce, pour permettre le calcul de la vitesse moyenne.

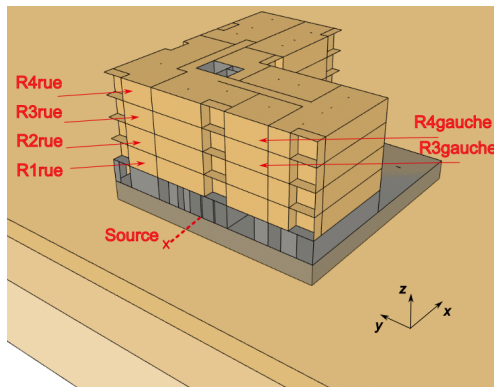


FIGURE 1 – Schéma du bâtiment et du sol étudiés. Les parties en CLT et en béton sont représentées en marron et en gris respectivement. Les positions des paires d'accéléromètres sont indiquées en rouge.

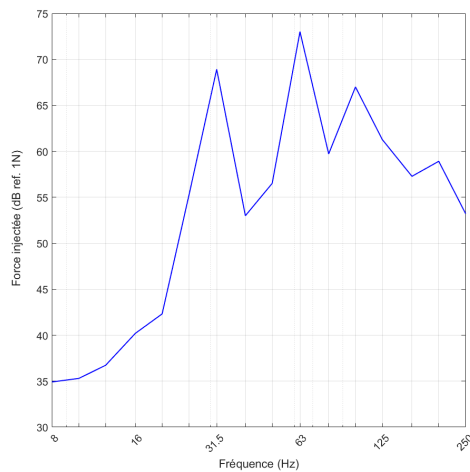


FIGURE 2 – Mesure du spectre de force injectée par le rouleau compresseur dans le sol.

3 Méthodes de modélisation

Le problème complet, incluant l'excitation, le sol et le bâtiment, est modélisé avec la méthode des éléments finis. Deux approches différentes sont testées pour modéliser le bâtiment : la formulation 2.5D et la formulation 3D.

La formulation 2.5D est implémentée avec le logiciel Mefisto [14], qui utilise des éléments finis pour la modélisation des structures et des éléments de frontière pour la modélisation des sols. La géométrie est donc en 2D (Figure 3-a). Trois coupes sont définies suivant le plan xz pour inclure les points de mesure. Cependant, la représentation en 2D ne permet pas de représenter les poutres soutenant les différents planchers, ainsi que les distributions de poteaux aux différents étages.

La formulation 3D est implémentée avec le logiciel Code Aster [15], qui utilise la méthode des éléments finis. Afin de simplifier le modèle et de réduire le temps de calcul, la méthode de réduction de modèle développée lors de travaux

TABEAU 1 – Propriétés du sol mesurées par la méthode MASW : C_p - célérité des ondes de compression (m/s); C_s - célérité des ondes de cisaillement (m/s); ρ - Masse volumique (kg/m^3); η - Coefficient d'amortissement; h - épaisseur (m).

Couche	C_p	C_s	ρ	η	h
1	600	300	2000	0.03	2.5
2	800	400	2000	0.03	5
3	1100	550	2000	0.02	Inf

précédents est utilisée [12]. Celle-ci consiste à considérer que le bâtiment n'est excité que sur le mur du sous-sol le plus proche de la source. Ce mur est ainsi excité par les contraintes propagées par la source dans le sol. Les contraintes appliquées correspondent aux contraintes libres dans le sol à l'endroit du mur, calculées par un modèle analytique, les contraintes de cisaillement verticales étant doublées afin de prendre en compte le blocage vertical des fondations. Les effets du sol sont reproduits à l'aide d'amortisseurs élémentaires dans les deux directions du mouvement (x et z), répartis sur tous les murs en contact avec le sol. La valeur de l'amortissement est calculée avec la partie réelle de l'impédance intermodale de rayonnement d'une plaque posée sur le sol, donnée par le modèle analytique présenté dans [16].

Les différentes poutres et solives sont modélisées avec des éléments "poutre" et les cloisons et planchers sont modélisés avec des éléments "coque". Toujours dans la démarche de simplification de l'implémentation des modèles, les matériaux sont définis comme isotropes, l'orthotropie et la structure en multicouche du CLT ne sont donc pas pris en compte. La complexité des liaisons murs-planchers pose des problèmes pour la modélisation. A l'échelle d'un bâtiment, il n'est pas possible de modéliser les détails de ces liaisons. Il est possible de prendre en compte les différences de raideur engendrées par ces liaisons non parfaites en modifiant les propriétés du bois, notamment le module d'Young [4]. Une autre possibilité est de modifier la définition des jonctions avec un simple modèle de jonction élastique [17]. Ici, les joints entre murs et planchers sont modélisés en diminuant le module d'Young et en augmentant le facteur d'amortissement du bois au niveaux des différentes jonctions, sur une largeur de 10 cm, comme illustré en Figure 3-c. Le modèle 3D est calculé avec et sans liaisons afin de mettre en évidence leur influence sur les niveaux vibratoires de planchers.

4 Résultats

Pour chaque plancher étudié, les mesures des deux accéléromètres sont moyennées et comparées à la vitesse moyenne calculée sur toute la surface du plancher pour les modèles MEFISSTO et Code Aster. Les résultats sont présentés par étage pour les différents points en Figure 4. La

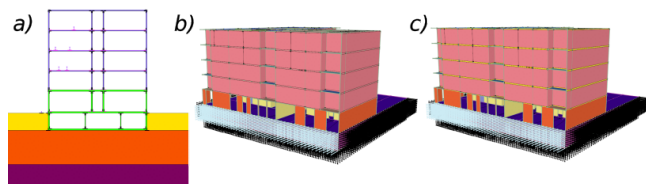


FIGURE 3 – Géométrie des modèles étudiés : a) modèle 2.5D avec MEFISSTO, b) modèle 3D sans joints et c) avec joints entres planchers et parois avec Code Aster.

performance des modèles ne peut être estimée ici qu'à partir de 20 Hz, car pour les fréquences inférieures, les niveaux mesurés correspondent au bruit de fond, dû au peu d'énergie injectée en basses fréquences par la source, comme le montre la Figure 2. A partir de 30 Hz, les niveaux estimés par les modèles sont proches des niveaux mesurés. Globalement, les différents modèles reproduisent bien les tendances observées sur les mesures, avec quelques exceptions, notamment pour les planchers côté "gauche". Des différences de niveaux apparaissent cependant, malgré une tendance similaire, pouvant aller jusqu'à 20 dB. Le modèle 2.5D surestime quasiment systématiquement les niveaux des planchers, de la même manière que le modèle 3D sans joints, bien que celui-ci donne des niveaux plus proches des mesures en hautes fréquences. Le modèle 3D avec joints est le plus proche des mesures, notamment pour les planchers côté "rue", avec quelques surestimations qui sont similaires aux autres modèles, et une sous-estimation générale au-dessus de 150 Hz.

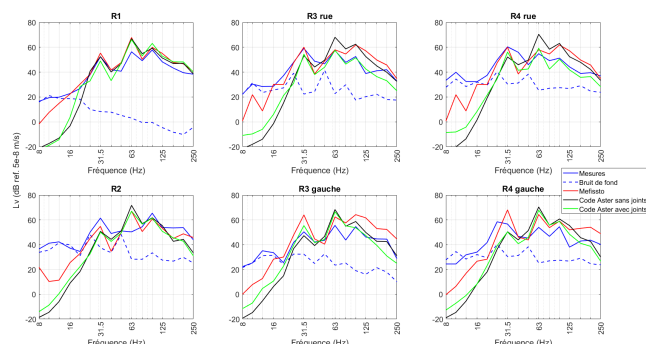


FIGURE 4 – Niveaux vibratoires ponctuels sur différents planchers du bâtiment : (bleu) mesures, (rouge) modélisation 2.5D avec Mefisstto et modélisation 3D avec Code Aster avec (vert) et sans (noir) prise en compte des joints CLT.

5 Discussion

La comparaison entre les différents modèles et les mesures montre bien la difficulté de modéliser les bâtiments en bois. En effet, les courbes au R1, correspondant à un plancher en béton, sont très proches entre les différents modèles d'une part, et avec les mesures d'autre part. Les

écarts de niveau et de tendance apparaissent surtout sur les autres planchers, qui sont en CLT. Cette cohérence sur la partie béton montre la validité de la méthode de réduction de modèle employée pour les modèles 3D, avec des résultats similaires à ceux obtenus par le modèle MEFISSTO dont la précision pour les structures béton est connue. Des écarts importants apparaissent en basses fréquences entre les modèles 2.5D et 3D. Ces niveaux étant inférieurs au bruit de fond des mesures, la comparaison n'est pas possible. Cependant, il a été montré que la méthode utilisée pour les modèles 3D donne des résultats sous-estimés en basses fréquences en l'état actuel [12], ce qui explique cet écart.

Le modèle 2.5D montre des niveaux systématiquement surestimés pour les planchers CLT. Ceci peut-être dû à l'absence de poteaux et solives, qui raidissent la structure réelle et qui ne sont pas représentables sur une géométrie 2D. Malgré tout, le modèle 3D sans joints surestime aussi globalement les niveaux de la même manière que le modèle 2.5D, sauf en hautes fréquences. Le modèle très simplifié, considérant les éléments en bois isotropes et les liaisons parfaites, n'est donc pas beaucoup plus performant ici que le modèle 2.5D, malgré la géométrie 3D. Ceci peut s'expliquer par la forme simple du bâtiment, adaptée à la modélisation 2.5D, et il est possible qu'une différence plus importante soit observée pour des formes de bâtiment plus complexes.

La prise en compte des liaisons souples entre planchers et murs pour la partie CLT apporte de nettes améliorations aux résultats du modèle 3D. De très bonnes concordances sont notamment obtenues sur certains planchers comme le "R3 rue" et le "R4 rue". Pour certains planchers, comme le "R2" et le "R4 gauche", la prise en compte des joints ne change pas les résultats, qui restent supérieurs aux mesures. Cela révèle l'influence d'autres détails de la structure en CLT qui ne sont pas pris en compte dans le modèle. Malgré tout, le modèle 3D avec joints donne les résultats les plus proches des mesures.

La modélisation des joints étant ici sommaire, il est envisageable d'améliorer d'autant plus la précision du modèle 3D en s'inspirant des méthodes de modélisation des liaisons de planchers CLT de la littérature [18, 19], tout en gardant un niveau de simplification permettant de modéliser un bâtiment entier. De plus, les liaisons entre les différentes plaques sur un même plancher ne sont pas modélisées ici et ont une influence sur les résultats du modèle [20]. L'ajout possible d'autres niveaux de détails au modèle 3D laisse envisager des résultats encore plus cohérents avec les mesures, là où le modèle 2.5D ne laisse que peu de pistes d'améliorations.

6 Conclusion

La modélisation du comportement vibratoire de bâtiments en CLT est complexe. Tous les détails de ce type de structure (notamment les nombreuses jonctions) ne peuvent être caractérisés précisément et modélisés dans le cadre d'une étude. La comparaison des niveaux vibratoires mesurés sur un bâtiment réel et des résultats obtenus avec

des modèles 2.5D et 3D simplifiés montre que des écarts importants existent sur certaines bandes de tiers d'octave, même si les tendances générales sont bien reproduites.

Les écarts avec les mesures sont globalement similaires entre les approches 2.5D et 3D sans joints, notamment à cause des nombreuses simplifications apportées au modèle 3D. Cependant, la prise en compte sommaire des joints entre parois et planchers améliore globalement la précision du modèle 3D. Ces effets ne sont pas homogènes suivant les planchers, ce qui montre que d'autres phénomènes liés à la structure CLT ne sont pas encore pris en compte.

La meilleure précision du modèle 3D avec joint est d'autant plus intéressante que son temps de calcul est similaire à celui des modèles 2.5D, notamment grâce à la méthode de réduction utilisée. Il reste à améliorer la modélisation des détails influents de la structure, plus particulièrement les liaisons, afin d'avoir une plus grande confiance dans les prédictions du modèle.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Bernard Laulagnet pour ses conseils et ses retours précieux concernant ces travaux et la rédaction de cet article.

Références

- [1] Angelo Aloisio, Dag Pasquale Pasca, Yuri De Santis, Thomas Hillberger, Pier Francesco Giordano, Marco Martino Rosso, Roberto Tomasi, Maria Pina Limongelli, and Chiara Bedon. Vibration issues in timber structures : A state-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*, 76 :107098, October 2023.
- [2] Peter Persson and Ola Flodén. Effect of material parameter variability on vibroacoustic response in wood floors. *Applied Acoustics*, 146 :38–49, March 2019.
- [3] Hassan Karampour, Farid Piran, Adam Faircloth, Nima Talebian, and Dane Miller. Vibration of Timber and Hybrid Floors : A Review of Methods of Measurement, Analysis, and Design. *Buildings*, 13(7) :1756, July 2023.
- [4] Blaz Kurent, Boštjan Brank, and Wai Kei Ao. Model updating of seven-storey cross-laminated timber building designed on frequency-response-functions-based modal testing. *Structure and Infrastructure Engineering*, 19 :1–19, June 2021.
- [5] T. Asakura, H. Mizunuma, Y. Kasai, M. Tanaka, and A. Hiramitsu. Prediction of low-frequency floor impact vibration of CLT structures using a single-layer FE model. *Journal of Building Engineering*, 98 :111336, December 2024.
- [6] Yuji Miyazu and Cristiano Loss. Evaluation of vibration properties of an 18-story mass timber–concrete hybrid building by on-site vibration tests. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 14(4) :909–929, April 2024.
- [7] Tisal Edirisinghe and James Talbot. Some observations on the significance of soil-structure interaction in the transmission of ground-borne vibration into buildings. September 2024.
- [8] Lutz Auersch. Simple and fast prediction of train-induced track forces, ground and building vibrations. *Railway Engineering Science*, 28(3) :232–250, September 2020.
- [9] T. L. Edirisinghe and J. P. Talbot. Simplified models to inform the base-isolation design of buildings. *Journal of Physics : Conference Series*, 2647(20) :202007, June 2024.
- [10] Arnau Clot, Robert Arcos, and Jordi Romeu. Efficient Three-Dimensional Building-Soil Model for the Prediction of Ground-Borne Vibrations in Buildings. *Journal of Structural Engineering*, 143(9) :04017098, September 2017.
- [11] Mohammed Hussein, Hugh Hunt, Kirsty Kuo, Pedro Alves Costa, and João Barbosa. The use of sub-modelling technique to calculate vibration in buildings from underground railways. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*, 229(3) :303–314, March 2015.
- [12] Gautier Gillot, Tony Lethuillier, and Bernard Laulagnet. On the reduction of FEM models dealing with vibrations propagation from ground to buildings. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 270(9) :2240–2247, October 2024.
- [13] Choon B. Park, Richard D. Miller, and Jianghai Xia. Multichannel analysis of surface waves. *GEOPHYSICS*, 64(3) :800–808, May 1999.
- [14] P Jean. Boundary and finite elements for 2d soil-structure interaction problems. *Acta Acustica united with Acustica*, 87(1) :56–66, 2001.
- [15] Electricité de France. Finite element *code_aster*, analysis of structures and thermomechanics for studies and research. Open source on www.code-aster.org, 1989–2017.
- [16] L. Grau and B. Laulagnet. Ground cross-modal impedance as a tool for analyzing ground/plate interaction and ground wave propagation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(5) :2901–2914, May 2015.
- [17] O. Flodén, A. Peplow, and P. Persson. Predicting structure-borne noise in cross-laminated timber buildings during conceptual design. *Finite Elements in Analysis and Design*, 225 :104005, November 2023.
- [18] O. Flodén, K. Persson, and G. Sandberg. A multi-level model correlation approach for low-frequency vibration transmission in wood structures. *Engineering Structures*, 157 :27–41, February 2018.
- [19] Marija Milojević, Vitomir Racic, Marija Nefovska-Danilović, Suzana Ereiz, and Ivan Duvnjak. Characterization of inter-panel connections in CLT floors using finite element model updating. *Journal of Building Engineering*, 97 :110682, November 2024.
- [20] E Macpherson, P Papastavrou, T Wallwork, S Smith, and A McRobie. The rotational stiffness of cross-laminated timber half-lap joints. Apollo - University of Cambridge Repository, 2018.