

Article

Effets de la hauteur du bâtiment sur la transmission du son dans Bâtiments en bois lamellé-croisé – Indice de réduction des vibrations

Erik Nilsson¹ , Sylvain Ménard¹, Delphine Bard² et Klas Hagberg³

¹ Département des sciences appliquées, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, QC G7H 2B1, Canada; sylvain_menard@uqac.ca

² Département de physique et d'astronomie, Katholieke Universiteit Leuven, 3000 Louvain, Belgique; delphine.bardhagberg@kuleuven.be

³ Département de génie civil, environnemental et des ressources naturelles, Université de technologie de Luleå, 97187 Luleå, Suède; klas.hagberg@ltu.se

* Correspondance : erik.nilsson1@uqac.ca

Résumé : Les bâtiments en bois de grande hauteur gagnent en popularité et leur structure comprend généralement du bois lamellé-croisé. Les bâtiments plus hauts entraînent des charges plus élevées sur les jonctions situées plus bas dans le bâtiment, ce qui est suggéré dans la littérature comme affectant négativement l'isolation acoustique. Cette étude impliquait la mesure de l'indice de réduction des vibrations dans quatre bâtiments différents en CLT, variant en hauteur et en détails de jonction. Au total, 12 jonctions ont été mesurées aux niveaux haut et bas des bâtiments. Parmi celles-ci, 10 jonctions avaient des intercalaires résilients avec des rigidités différentes en fonction de la charge quasi-permanente conçue, tandis que 2 jonctions manquaient d'intercalaires résilients. Les résultats ont indiqué que l'indice de réduction des vibrations diminue plus bas dans le bâtiment, principalement pour le trajet Mur-Mur. Les résultats étaient cohérents pour toutes les jonctions mesurées au-dessus de 400 Hz pour le trajet Mur-Mur et pour la majorité des mesures de la plage de fréquences restante, 400 Hz et moins. La différence observée dans l'indice de réduction des vibrations pourrait avoir un impact significatif sur le résultat final si un immeuble de grande hauteur présente plusieurs chemins latéraux qui affectent l'isolation acoustique entre deux appartements, et cela doit être pris en compte lors de la phase de conception. Des effets similaires ont été observés pour les bâtiments avec et sans intercalaires résilients aux jonctions.

Mots clés : indice de réduction des vibrations ; hauteur du bâtiment; bois lamellé-croisé; acoustique des bâtiments; insonorisation



Référence : Nilsson, E. ; Ménard, S. ;

Barde, D. ; Hagberg, K. Effets de la hauteur du bâtiment sur le son Transmission en Lamellé Croisé

Bâtiments en bois – Indice de réduction des vibrations. Bâtiments 2023, 13, 2943. <https://doi.org/10.3390/building13122943>

Rédactrices académiques : Chiara Scrosati et Maria Machimbarrena

Reçu : 27 octobre 2023

Révisé : 22 novembre 2023

Accepté : 23 novembre 2023

Publié : 25 novembre 2023



Copyright : © 2023 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.

Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons

Licence d'attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Les bâtiments en bois gagnent en popularité et sont utilisés pour diverses constructions, notamment des maisons multifamiliales, des écoles et des bureaux. De plus, la hauteur maximale du bâtiment augmente progressivement avec le nombre d'étages, ce qui augmente la charge plus bas dans le bâtiment. Le bois lamellé-croisé (CLT) est généralement utilisé dans certaines parties de la construction de bâtiments en bois de grande hauteur. Le CLT est constitué de plusieurs couches de planches de bois empilées qui sont collées ensemble selon un motif croisé. Généralement, le motif transversal est de 90 degrés, un minimum de trois couches collées sont utilisées et les éléments CLT sont constitués d'un nombre impair de couches. Grâce au motif transversal et au processus de stratification, une stabilité dimensionnelle améliorée est assurée pour les éléments, et le CLT possède des propriétés de résistance et de rigidité. Bien qu'il existe divers articles sur les performances éoliennes, incendies et sismiques des bâtiments en bois de grande hauteur [2–17], rares sont ceux qui étudient les facteurs acoustiques. Les recherches antérieures sur l'acoustique du bois se sont principalement concentrées sur la transmission du son à travers des éléments individuels dans un laboratoire et sur la transmission du son dans des bâtiments ou des maquettes finis de petite taille.

Plusieurs laboratoires ont mesuré les performances des éléments CLT avec et sans couches supplémentaires, notamment les Réf. [18–25]. Vardaxis et coll. [26] ont mesuré diverses configurations de dalles CLT, en se concentrant sur les couches de solutions humides et sèches au-dessus du CLT. Sabourin et McCartney [27] ont mesuré les propriétés d'isolation acoustique des éléments CLT pour sols.

et des murs de différentes épaisseurs et des revêtements supplémentaires. Loriggiola et coll. [28] ont mesuré plusieurs configurations de murs en CLT avec cadres et panneaux. Hongisto et coll. [29] ont mesuré de nombreuses constructions en bois et en béton, y compris des sols en CLT avec des couches supplémentaires. De plus, certains articles, dont les Réf. [30–36], se sont concentrés sur des estimations et des évaluations théoriques basées sur des mesures pour prédire les propriétés d'isolation acoustique des éléments CLT. Lin et coll. [37] ont comparé plusieurs méthodes de calcul avec les résultats de mesures de murs en CLT combinés à des cadres et des panneaux. Bader Eddin et coll. [38] ont utilisé une approche de réseau neuronal artificiel pour prédire les propriétés d'isolation acoustique de différents sols légers sur la base de 252 mesures de laboratoire standardisées avec une bonne précision. De plus, des modèles de rayonnement sonore et des méthodes d'éléments finis ont été développés dans quelques articles [39–43] pour les plaques CLT, qui sont utilisées pour prédire l'isolation acoustique.

Dans la littérature, plusieurs auteurs ont collecté et mesuré l'indice de réduction des vibrations des éléments CLT, notamment les réf. [44–49]. Schönwald et coll. [50] ont présenté des mesures de l'indice de réduction des vibrations des éléments CLT via différentes méthodes de connexion utilisées pour prédire la transmission du bruit latéral. Pérez et Fuente [51] ont mesuré la différence de niveau de vitesse dans une maquette de bâtiment en CLT où, entre autres combinaisons, différents matériaux résilients ont été utilisés. De plus, un test de maquette plus approfondi de plusieurs paramètres sonores, y compris l'indice de réduction des vibrations, a été réalisé dans la maquette acoustique ADIVBois [52].

Un large éventail de mesures ont été recueillies par divers auteurs dans la littérature décrite ci-dessus. De plus, certains chercheurs ont observé si la charge sur les jonctions affectait la transmission du son. Réf. [50] ont constaté que la charge sur une jonction affectait la transmission du bruit indirect en laboratoire, mais seulement sur la charge initiale du premier étage simulé ; un chargement supplémentaire par la suite n'a eu aucun effet. Morandi et coll. [53] s'attendaient à voir une différence lors de l'ajout d'une charge sur une dalle CLT lors des mesures de l'indice de réduction des vibrations en laboratoire. À l'inverse, ils n'ont trouvé aucune différence significative lorsqu'une charge était ajoutée, ce qui, selon eux, aurait pu être causé par le processus de construction. Mecking et coll. [54] ont constaté qu'une charge supplémentaire réduisait légèrement l'indice de réduction des vibrations d'une jonction. Crispin et coll. [55] ont montré qu'une charge croissante entraîne une rigidité dynamique plus élevée du joint et un indice global de réduction des vibrations plus faible pour deux éléments en béton reliés par une couche intermédiaire flexible de caoutchouc naturel. Les mesures des Réf. [50,53,54] concernaient des éléments CLT provenant de laboratoires, où une situation de terrain pouvait être simulée. Dans d'autres articles, des mesures sur le terrain dans des bâtiments finis ont été évaluées et il a été suggéré que la charge affecte la transmission du son entre les appartements. Réf. [56] ont constaté que la charge pouvait avoir un effet négatif sur la transmission des bruits latéraux dans une construction légère en bois. Cependant, les auteurs suggèrent que cela est dû à une inadéquation entre la charge et la rigidité des couches intermédiaires résilientes. Réf. [57] ont constaté que l'isolation aux bruits d'impact était moins bonne dans la partie inférieure du bâtiment, ce qui, selon eux, est dû à une moindre élasticité dans les jonctions inférieures en raison des contraintes plus élevées appliquées. Hörnmark [58] a mesuré l'indice de réduction des vibrations dans un bâtiment fini et a constaté que l'augmentation de la charge affecte négativement l'indice de réduction des vibrations. Cependant, les mesures ont été effectuées avec une méthode transitoire et les niveaux de vibration n'ont pas été enregistrés simultanément, ce qui contredit les recommandations de la norme ISO 10848-1 [59].

Certaines des études mentionnées précédemment [50, 53–58] ont mesuré l'indice de réduction des vibrations en laboratoire ou sur le terrain, et peu de jonctions et de combinaisons ont été étudiées dans chaque article. De plus, seuls quelques articles décrivent sous forme de chiffres ou de courbes l'importance de l'influence de la hauteur du bâtiment, tandis que d'autres commentent principalement si elle a un effet. Il est nécessaire d'étudier de manière approfondie si la différence de hauteur des bâtiments affecte la transmission du son entre les étages sur le terrain et quelle est l'importance de cet effet. Dans une étude récente de Nilsson et al. [60], les auteurs ont effectué 58 mesures d'isolation aux bruits aériens sur plusieurs étages dans quatre bâtiments avec des systèmes de construction et des détails de jonction différents. Les résultats ont montré que l'isolation aux bruits aériens diminue plus bas dans les bâtiments. Par ailleurs, Réf. [60] ont constaté que l'isolation aux bruits aériens diminue d'une valeur moyenne de 0,5 dB par étage sur la fréquence

[illegible]

En effet, l'excitation avec une méthode stationnaire (comme un shaker) est plus fiable qu'une méthode transitoire (comme un marteau), comme le montre la littérature [61,62]. De plus, la mesure avec un shaker est la méthode préférée, mais un marteau à percussion peut être utilisé à condition que le sim-shaker soit la méthode préférée, mais un marteau à percussion peut être utilisé à condition que les mesures simultanées des mesures ultérieures sur les éléments émetteurs et récepteurs sont effectuées conformément aux mesures sur les éléments émetteurs et récepteurs sont effectuées conformément aux à la norme [59]. Cependant, il n'est pas raisonnable d'amener un agitateur aux normes de mesures sur le terrain [59]. Cependant, il n'est pas raisonnable d'apporter un agitateur aux normes de mesures sur le terrain en raison de en raison du poids de l'appareil, une manipulation sur site sans accès aux ascenseurs, et du poids de l'appareil, une manipulation sur site sans accès aux ascenseurs, et du temps limité temps disponible limité en raison des travaux de construction en cours. Par ailleurs, Réf. [46] n'en ont trouvé d'autres différences significatives entre les méthodes de mesure avec un marteau ou un shaker pour les éléments. Pour mesurer la différence de niveau de vitesse moyenne dans la direction le niveau de vitesse éléments. Pour mesurer la différence de niveau de vitesse moyenne dans la direction le niveau de vitesse la différence entre les éléments i et j (Dv_{ij}) et entre les éléments j et i (Dv_{ji}) est mesurée. Alors, la différence entre les éléments i et j (Dv_{ij}) et entre les éléments j et i (Dv_{ji}) est mesurée. Ensuite, est calculé selon l'équation (2) : Dv_{ij} est calculé

$$\overline{Dv_{ij}} = \frac{1}{2} Dv_{ij} + Dv_{ji} \quad (2)$$

La différence de niveau de vitesse a été mesurée avec des accéléromètres fixés à la surface. La différence de niveau de vitesse a été mesurée avec des accéléromètres fixés à la surface. La face, et sept à neuf accéléromètres ont été utilisés au total, selon la taille du CLT. Les accéléromètres ont été utilisés au total, selon la taille du CLT. L'équipement de mesure était constitué d'accéléromètres à plaques de type 4507 B 004. L'équipement de mesure était constitué d'accéléromètres de type 4507 B 004 de de Brüel & Kjær (Virum, Danemark), deux LAN-XI de type 3050-A-060 de Brüel & Kjær, Brüel & Kjær (Virum, Danemark), deux LAN-XI de type 3050-A-060 de Brüel & Kjær, et un marteau à percussion de type 8210 également de Brüel & Kjær. Les accéléromètres étaient un marteau à percussion du type 8210 également de Brüel & Kjær. Les accéléromètres ont été calibrés calibré avec un calibrateur de vibrations de type VC20 de Metra (MMF) (Radebeul, Allemagne) avec un calibrateur de vibrations de type VC20 de Metra (MMF) (Radebeul, Allemagne), et le beaucoup, et le logiciel BK Connect (principalement version 26.0.0.241) de Brüel & Kjær était le logiciel BK Connect (principalement version 26.0.0.241) de Brüel & Kjær utilisé pour enregistrer, utilisé pour enregistrer, traiter et analyser les données. Le marteau à percussion fait partie du processus transitoire et analyse les données. Le marteau à percussion fait partie de la méthode transitoire, et méthode, et elle est illustrée à la figure 2a. Différentes duretés (doux, moyen, dur et dur) peuvent être illustré à la figure 2a. Différentes duretés (doux, moyen, dur et dur) peuvent être dur) peut être utilisé à la pointe du marteau. Des tests sur place ont montré qu'il y a un petit usé à la pointe du marteau. Les tests sur site ont montré qu'il existe une légère différence dans la différence de résultat entre les différentes pointes pour les éléments CLT. Cela a également été constaté parmi les différents conseils pour les éléments CLT. Cela a également été trouvé dans la ref. [46] mais avec différentes astuces. Cependant, il était plus difficile d'exciter la structure avec le mouvement le plus doux. Réf. [46] mais avec des astuces différentes. Cependant, il était plus difficile d'exciter la structure avec avec la pointe la plus douce, et les accéléromètres ont détecté un son aérien produit par la pointe, et les accéléromètres ont détecté un son aérien produit par la pointe, et les le conseil le plus difficile. De plus, la différence dans le temps de réverbération d'un élément de test était De plus, la différence dans le temps de réverbération d'un élément de test était De négligeable entre la pointe moyenne et la pointe dure lorsqu'elle est frappée avec des forces différentes, la négligeable entre la pointe moyenne et la pointe dure lorsqu'elle est frappée avec des forces différentes, la 99] pour tester la méthode de mesure. Ainsi, soit la pointe dure, soit la pointe moyenne 99] pour tester la méthode de mesure. Ainsi, soit la pointe dure, soit la pointe moyenne une pointe moyenne a été utilisée dans les mesures en fonction de la situation sur le site. Le même conseil était une pointe moyenne a été utilisée dans les mesures en fonction de la situation sur le site. Le a été utilisé la même pointe métallique toujours utilisée dans la même paire de jonctions. De plus, puisqu'il était toujours utilisé la même pointe métallique toujours utilisée dans la même paire de jonctions. De plus, puisqu'il était toujours utilisé différence dans l'indice de réduction des vibrations entre les étages d'intérêt, et depuis l'indice de réduction différence dans l'indice de réduction des vibrations entre les étages d'intérêt, et depuis l'indice de réduction les détails des jonctions et la méthode de mesure étaient les mêmes dans chaque paire de jonctions, les les détails des jonctions et la méthode de mesure étaient les mêmes dans chaque paire de jonctions, les devaient attendre la mesure la mesure de précision des résultats des tests, l'exactitude des résultats du test.

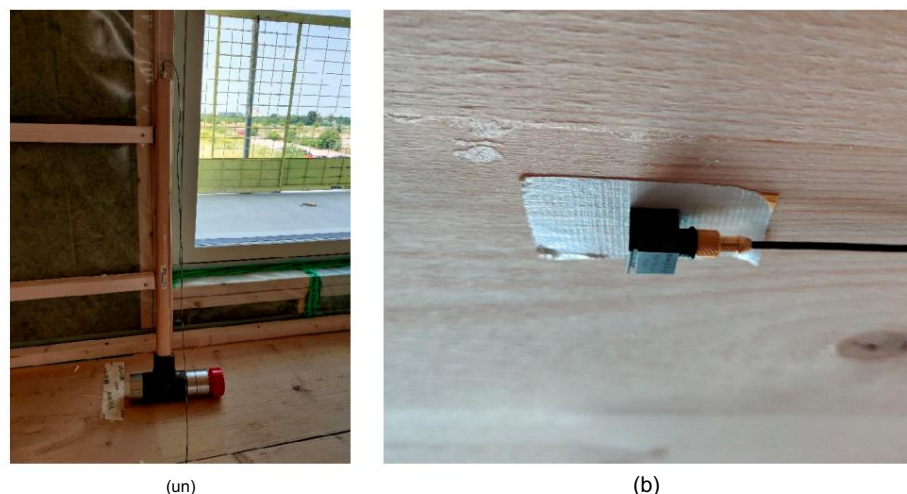


Figure 2. Images de mesures de l'équipement : (a) marteau à percussion à pointe résistante ; (b) accéléromètre monté avec du ruban adhésif double face.

Pour chaque jonction, deux à trois positions d'excitation ont été utilisées lors de la mesure du différence du niveau de vitesse moyen entre les éléments mesurés (Dv_{ij} et Dv_{ji}).

La norme [59] spécifie un minimum de quatre positions d'excitation pour les éléments de type A (par exemple CLT). Cependant, cela n'est pas toujours adapté aux mesures sur le terrain en raison de la taille des éléments et des ouvertures, même si les distances minimales sont vaguement envisagées.

En général, trois positions d'excitation ont été utilisées dans les projets. Cependant, deux jonctions du projet A ne pouvaient correspondre qu'à deux positions, ce qui a été considéré comme adéquat, car la différence dans l'indice de réduction des vibrations était intéressante et puisque la même méthode de mesure était appliquée pour chaque paire de jonctions. Le long des deux à trois positions d'excitation, un minimum de trois accéléromètres ont été utilisés sur chaque élément pour chaque position d'excitation conformément à la procédure de la réf. [59]. Les accéléromètres ont également été déplacés à différentes positions sur l'élément, et la procédure de mesure concernant les distances minimales a été suivie sur la base de la réf. [59]. Les positions d'excitation et de mesure se trouvaient toujours du même côté que les voies adjacentes. Par exemple, lors de la mesure de la trajectoire indirecte plafond-mur, les positions d'excitation et les positions de mesure du plafond/sol ont été effectuées sur le plafond plutôt que sur le sol. De plus, des mesures simultanées des éléments émetteurs et récepteurs ont été effectuées, ce qui est fortement recommandé par la norme lors de l'utilisation de la méthode transitoire. Les positions de mesure ont été enregistrées avec des accéléromètres fixés à la surface avec du ruban adhésif double face (voir Figure 2b). La norme [59] précise que la fixation des accéléromètres doit être rigide dans la direction normale à la surface des éléments, ce qui n'est pas toujours adapté aux mesures sur site, comme le souligne la Réf. [63]. Ainsi, du ruban adhésif double face est utilisé, et cela fonctionne de la même manière que la cire d'abeille pour des fréquences allant jusqu'à 3 150 Hz. Pour 3 150 Hz et au-dessus, une mauvaise fixation des accéléromètres pourrait se produire et provoquer des erreurs qui doivent être prises en compte [63]. En effet, il est préférable de monter les accéléromètres avec des vis et des aimants sur le CLT, plutôt que d'utiliser de la cire d'abeille ou du ruban adhésif double face, pour éviter une mauvaise fixation. Cependant, cela n'a été possible que dans certains projets.

Le temps de réverbération structurelle a été mesuré en utilisant les mêmes principes et procédures pour la différence des niveaux de vitesse moyens entre les éléments. Ici, la norme précise un minimum de trois positions d'excitation, ce qui correspond davantage à la procédure suivie dans les différents projets. Les temps de réverbération structurelle, $T_{s,j}$ et $T_{s,i}$, utilisés pour calculer les longueurs d'absorption équivalentes, a_j et a_i , selon l'équation (3) :

$$a_{nj} = \frac{2,2\pi \cdot S_j}{T_{s,j} \cdot c_0 \cdot f_{ré}} \cdot f \quad (3)$$

où S_j est la surface de l'élément mesuré, c_0 est la vitesse du son dans l'air, f est la fréquence et $f_{ré}$ est la fréquence de référence (égale à 1000 Hz [59]). L'évaluation des courbes de décroissance pour déterminer le temps de réverbération structurelle a suivi la procédure décrite dans les réf. [59,64]. La plage d'évaluation doit être comprise entre 5 et 15 dB, selon la réf. [59].

Cependant, des plages d'évaluation plus courtes sont préférées dans la réf. [65], comme également souligné dans la réf. [59]. Une plage d'évaluation de 10 dB a donc été utilisée, comme recommandé dans la réf. [59].

Le bruit aérien produit par les impacts du marteau a été enregistré en déconnectant les accéléromètres des éléments émetteurs et récepteurs, en les laissant pendre dans les airs pendant que les câbles étaient attachés aux éléments avec du ruban adhésif. Les mesures en question ont permis d'évaluer si le bruit aérien produit par le marteau, avec différentes pointes, influençait le résultat, tout en mesurant l'indice de réduction des vibrations.

Les quatre projets de construction mesurés dans cet article ont du CLT comme structure porteuse pour les murs et les sols intérieurs. Certains projets avaient également du CLT sur les façades. Dans cet article, les types de jonctions (X et T) étaient constitués de deux murs et d'un sol. Pour les jonctions en X, le sol était des deux côtés des murs, soit continu, soit divisé. Pour les jonctions en T, le sol s'est arrêté dans l'alignement des deux murs, sans aucune autre connexion par la suite.

Le projet A était un bâtiment de 10 étages avec une couche intermédiaire viscoélastique de 6 mm entre le sol et les murs au-dessus. Les éléments CLT ont été reliés à des supports montés

directement sur le CLT sans intercalaires élastiques (voir Figure 3a). Les mesures du projet A ont été effectuées sur six jonctions, donnant trois paires de jonctions : deux intérieures

Le projet A était un bâtiment de 10 étages avec une couche intermédiaire viscoélastique de 6 mm entre le sol et les murs au-dessus. Les éléments CLT ont été reliés à des supports montés directement sur le CLT sans intercalaires résilients (voir Figure 3a). Les mesures du projet A ont été effectuées sur six jonctions, donnant trois paires de jonctions : deux paires de jonctions en X intérieures et une paire de jonctions en T de façade. La différence dans le nombre d'étages entre les mesures du projet A était de quatre étages pour les trois paires de jonctions. Toutes les jonctions du projet A étaient constituées d'éléments de plancher en CLT de 180 mm d'épaisseur. Les trois jonctions mesurées plus bas dans le bâtiment étaient constituées d'éléments de plancher en CLT de 180 mm d'épaisseur. Les trois carrefours mesurés plus haut dans le bâtiment étaient constitués d'éléments muraux en CLT de 160 mm d'épaisseur. Pour les jonctions situées plus haut dans le bâtiment du projet A, toutes trois étaient constituées de 120–140 mm d'éléments muraux en CLT de 140 mm d'épaisseur (120 mm pour les éléments muraux supérieurs aux trois jonctions et 140 mm pour les éléments muraux intérieurs aux trois jonctions). Les jonctions appelées Int.Wall 2 avaient des étages continus, tandis que les jonctions appelées Int.Wall 1 n'avaient pas d'étages continus. 2 avait des planchers continus, tandis que les jonctions appelées Int.Wall 1 n'avaient pas de planchers continus.

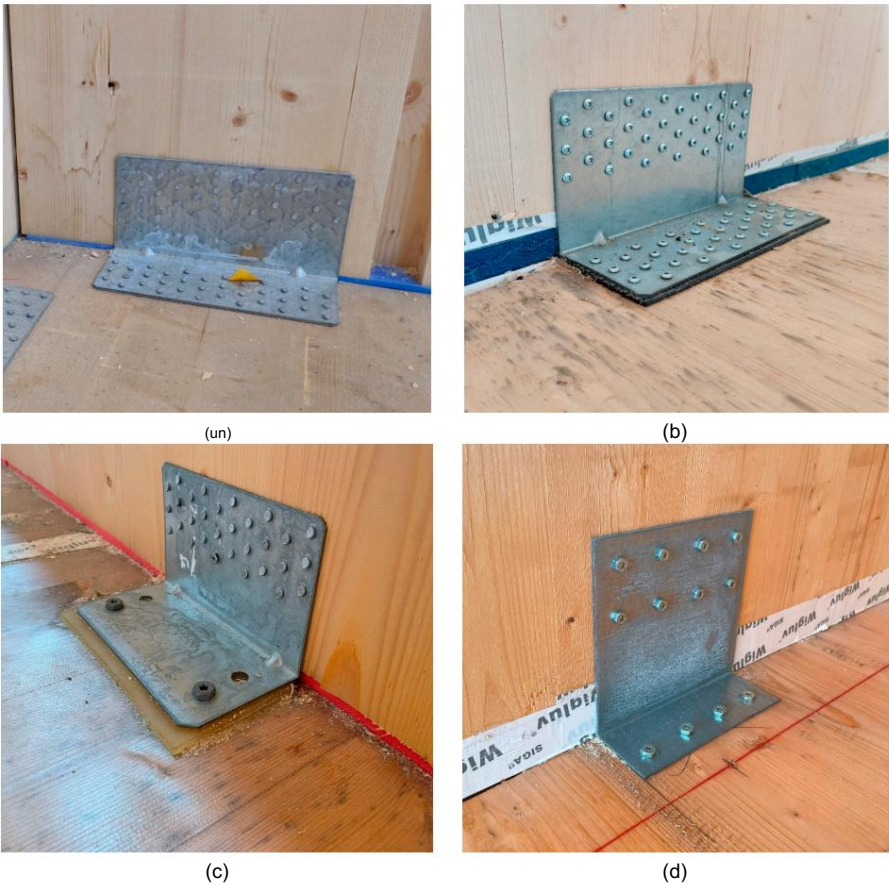


Figure 3. Images de mesure des différents détails de jonction. (a) Détail de la jonction du projet A avec un intercalaire viscoélastique de 6 mm entre le mur et le sol en CLT et aucun intercalaire entre le support et les éléments CLT. (b) Détail de la jonction pour le projet B avec un intercalaire viscoélastique de 25 mm entre les éléments CLT et le mur. (c) Détail de la jonction pour le projet C avec un intercalaire viscoélastique de 12 mm entre le support et les éléments CLT et un intercalaire résilient de 6 mm entre le support et les éléments en CLT. (d) Détail de la jonction pour le projet A sans intercalaire pour le projet C avec un intercalaire viscoélastique de 12 mm entre le mur et le sol en CLT et un élastique de 6 mm. Les images montrent des détails de jonction entre des éléments CLT et des supports métalliques, avec des intercalaires viscoélastiques ou résilients.

Les mesures du projet B ont eu lieu dans un bâtiment de six étages avec un intercalaire viscoélastique de 25 mm entre le sol et les murs au-dessus. Les éléments CLT étaient reliés par des supports et des vis, et une fine couche intermédiaire résiliente était située sur la partie inférieure des supports contre le sol (voir Figure 3b). Deux jonctions X avec planchers continus (une paire de jonctions) ont été mesurées avec une différence de trois étages. Les deux jonctions consistaient d'éléments de sol en CLT de 180 mm d'épaisseur et d'éléments de murs en CLT de 120 mm d'épaisseur.

Le projet C était un bâtiment de cinq étages (y compris le grenier) doté d'un revêtement viscoélastique de 12 mm intercalaire entre le sol et les murs au-dessus. Les éléments CLT étaient reliés à des supports montés directement sur le mur en CLT, avec une couche intermédiaire résiliente de 6 mm entre le support et le plancher CLT (voir Figure 3c). Des mesures ont été effectuées

des étages (une paire de jonctions) ont été mesurées avec une différence de deux étages. Les deux jonctions étaient constituées d'éléments de sol en CLT de 180 mm d'épaisseur et d'éléments de mur en CLT de 120 mm d'épaisseur.

Le projet C était un bâtiment de cinq étages (y compris le grenier) avec une couche intermédiaire viscoélastique de 12 mm entre le sol et les murs au-dessus. Les éléments CLT ont été reliés à des supports montés directement sur le mur en CLT, avec une couche intermédiaire résiliente de 6 mm entre le support et le sol en CLT (voir Figure 3c). Les mesures ont été effectuées sur deux jonctions en T, donnant une paire de jonctions sur une différence de deux étages. Les deux jonctions étaient constituées d'éléments de sol en CLT de 240 mm d'épaisseur et d'éléments de murs en CLT de 120 mm d'épaisseur.

Sur deux jonctions en T, produisant une paire de jonctions sur une différence de deux étages. Les deux carrefours de sol en CLT de 240 mm d'épaisseur et d'éléments de murs en CLT de 120 mm d'épaisseur étaient composés d'éléments intercalaire dans les jonctions verticales (entre sols et murs). Les sols et les murs en CLT ont été reliés avec des supports et des vis, également sans couche intermédiaire résiliente (voir Figure 3d). Une paire de jonctions T composée de deux jonctions verticales et de deux jonctions horizontales a été mesurée et intercalaire résiliente (voir Figure 3d). Les jonctions de jonction ont été mesurées sur deux jonctions en T de 250 mm d'épaisseur et d'éléments de sol en CLT de 130 mm d'épaisseur.

Les mesures du projet D ont eu lieu dans un immeuble de sept étages sans support résilient. Les jonctions de jonction ont été mesurées sur deux jonctions en T de 250 mm d'épaisseur et d'éléments de sol en CLT de 130 mm d'épaisseur.

Une description des épaisseurs et du module élastique des intercalaires résilients qui ont été utilisés dans les jonctions CLT verticales mesurées sont présentés dans le tableau A1.

3. Résultats

3.1. Évaluation du temps de réverbération structurelle

L'ISO 10848-1 [59] suggère que les mesures avec un marteau à percussion devraient être évaluées. L'ISO 10848-1 [59] suggère que les mesures avec un marteau à percussion devraient être évaluées.

Les mesures du temps de réverbération pour deux étages du projet C ont été effectuées avec différentes forces de frappe du marteau, combinées avec différents matériaux. Pour évaluer la résistance du jambon sur la pointe. Différents matériaux sont abordés dans la section 2. Pour évaluer la résistance des coup de marteau, les mesures du temps de réverbération pour deux étages du projet C sont comparées et affichées sur la figure 4. Le marteau a été frappé à la fois depuis le plafond et sont comparés et affichés sur la figure 4. Le marteau a été frappé depuis le plafond et le sol. Les impacts sur le plafond étaient moins forts que sur le sol. Le résultat et le sol. Les impacts sur le plafond étaient moins forts que sur le sol. Le

La figure 4 indique qu'il y avait une petite différence dans le temps de réverbération entre le résultat de la figure 4 indique qu'il y avait une petite différence dans le temps de réverbération entre mesures globales. Une comparaison a été faite entre des lignes du même type, par exemple les mesures globales. Une comparaison a été faite entre des lignées du même type, par exemple ple, bleu foncé uni par rapport au bleu clair uni. En outre, les mesures de différence, par exemple, le bleu foncé uni par rapport au bleu clair uni. De plus, les mesures de Les différents étages du projet C ont montré une légère variation du temps de réverbération par rapport aux différents étages du projet C ont montré une petite variation du temps de réverbération par rapport aux différents étages du projet C.

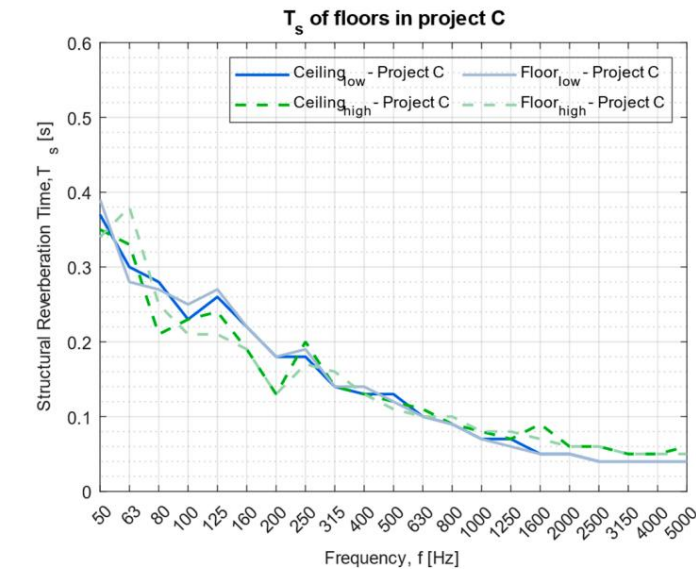
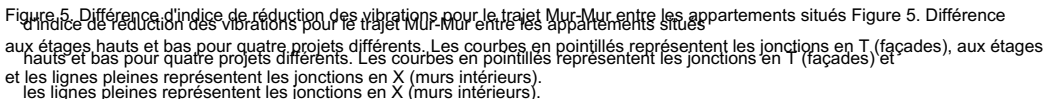
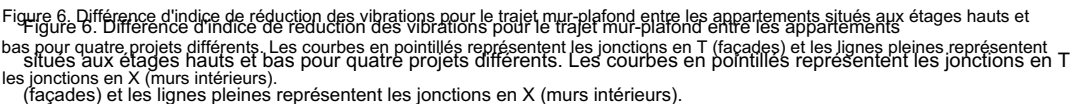


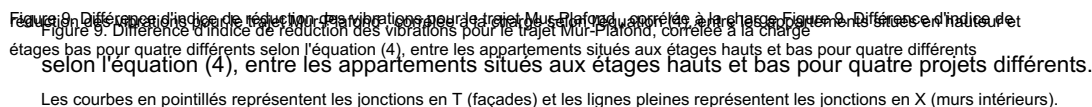
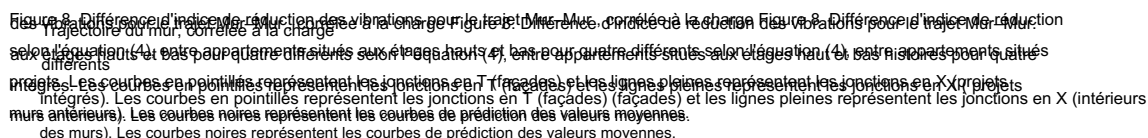
Figure 4. Différence de temps de réverbération structurelle des sols du projet C lors d'un marteau à percussion a été frappé par le dessous (plafond) et le dessus (sol). Les courbes en pointillés représentent le sol au niveau le plus haut qui a été frappé par le dessous (plafond) et par le haut (sol). Les courbes en pointillés représentent le plancher au niveau le plus élevé étage, et les lignes pleines représentent le sol de l'étage inférieur. étage, et les lignes pleines représentent le sol de l'étage inférieur.

3.2. Mesures de l'indice de réduction des vibrations

Basé sur les mesures de l'indice de réduction des vibrations de quatre projets CLT avec un total de 12 carrefours constitués de 36 chemins secondaires, les résultats ont indiqué qu'il y a une différence de l'indice de réduction des vibrations entre les appartements situés aux étages élevés par rapport à ceux situés aux étages bas. Sur la figure 5, la différence d'indice de réduction des vibrations pour le chemin Mur–Mur est affiché pour tous les projets. Les jonctions en T (façades) sont représentées avec des lignes pointillées et les jonctions X (murs intérieurs) sont affichées avec des lignes pleines. UN une différence positive sur la figure 5 indique que l'indice de réduction des vibrations diminue

[illegible]

L'équation (4) a d'abord été développée sur la base d'un processus itératif. Plus tard, il a été ajusté pour que l'axe y des deux méthodes de corrélation correspondait (corrélation avec le nombre d'histoires et corrélation avec la charge).



Pour le trajet Mur-Mur, les courbes de valeur moyenne sont affichées pour les jonctions X et les jonctions T, car une corrélation est trouvée entre les paires de jonctions et la différence entre les jonctions en X et les jonctions en T. La corrélation est précise pour les jonctions en T supérieures à 200 Hz, où les courbes se succèdent. Cependant, pour 200 Hz et moins, les courbes ne correspondent pas au facteur de charge proposé dans l'équation (4). Pour les jonctions X, une bonne corrélation se retrouve pour les fréquences supérieures à 500 Hz. La corrélation est également assez bonne pour les fréquences 500 Hz et moins, mais avec des écarts légèrement supérieurs. Globalement, le facteur de corrélation dans L'équation (4) aboutit à une meilleure corrélation entre les courbes de la figure 8 par rapport à l' équation (4). résultats dans la figure 5.

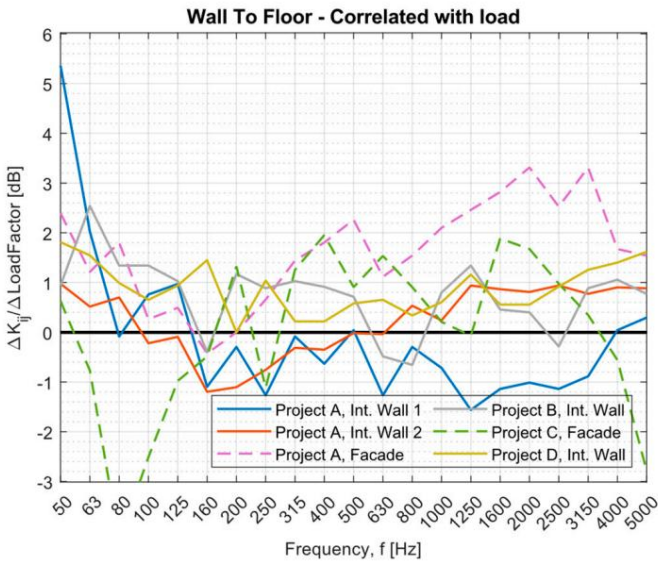


Figure 10. Différence d'indice de réduction des vibrations pour le trajet mur-sol, corrélée à la charge selon l'équation (4), entre les appartements situés aux étages hauts et bas pour quatre projets différents. Les courbes en pointillés représentent les jonctions en T (façades) et les lignes pleines représentent les jonctions en X (murs intérieurs). Les courbes en pointillés représentent les jonctions en T (façades) et les lignes pleines représentent les jonctions en X (murs intérieurs).

Pour le trajet Mur-Mur, les courbes de valeur moyenne sont affichées pour les jonctions X et les jonctions en T. Pour le trajet de transmission Mur-Plafond, le facteur de corrélation selon l'équation (4) donne une corrélation est trouvée entre les paires de jonctions et que la différence entre ne montre pas une bonne corrélation entre les courbes de la figure 9. Ainsi, la moyenne noire les jonctions en X et les jonctions en T. La corrélation est précise car les jonctions en T au-dessus de 200 Hz, où les courbes se suivent. Cependant, pour 200 Hz et moins, les courbes ne sont pas en corrélation avec le facteur de charge proposé dans l'équation (4). Pour les jonctions X, une bonne corrélation est trouvée pour les fréquences supérieures à 500 Hz. La corrélation est également assez bonne pour les fréquences inférieures ou égales à 500 Hz, mais avec des écarts légèrement plus élevés. Dans l'ensemble, le facteur de corrélation de l'équation (4) aboutit à une meilleure corrélation entre les courbes de la figure 8 par rapport aux résultats de la figure 5.

Le dénominateur commun entre les traces Mur-Sol et Mur-Plafond est le sol. numériquement, et le sol n'est pas un élément vertical contrairement aux murs. Ce facteur pourrait donc être attribué au manque de résultats prometteurs en corrélation avec la charge pour la vibration du chemin de transmission Mur-Plafond. Le facteur de corrélation selon l'équation (4) ne prend pas en compte la charge. Cependant, les méthodes principales par étage de corrélation selon les mesures de l'équation (4) s'est produit. la corrélation est trouvée entre les paires de jonctions et que la différence entre ne montre pas une bonne corrélation entre les courbes de la figure 9. Ainsi, la moyenne noire fonctionne bien lorsque les courbes de la figure 8 par rapport aux résultats de la figure 5. Cependant, les méthodes principales par étage de corrélation selon les mesures de l'équation (4) s'est produit. la corrélation est trouvée entre les paires de jonctions et que la différence entre ne montre pas une bonne corrélation entre les courbes de la figure 9. Ainsi, la moyenne noire fonctionne bien lorsque les courbes de la figure 8 par rapport aux résultats de la figure 5.

Le dénominateur commun entre les traces Mur-Sol et Mur-Plafond est le sol. numériquement, et le sol n'est pas un élément vertical contrairement aux murs. Ce facteur pourrait donc être attribué au manque de résultats prometteurs en corrélation avec la charge pour la vibration du chemin de transmission Mur-Plafond. Le facteur de corrélation selon l'équation (4) ne prend pas en compte la charge. Cependant, les méthodes principales par étage de corrélation selon les mesures de l'équation (4) s'est produit. la corrélation est trouvée entre les paires de jonctions et que la différence entre ne montre pas une bonne corrélation entre les courbes de la figure 9. Ainsi, la moyenne noire fonctionne bien lorsque les courbes de la figure 8 par rapport aux résultats de la figure 5.

Le dénominateur commun entre les traces Mur-Sol et Mur-Plafond est le sol. numériquement, et le sol n'est pas un élément vertical contrairement aux murs. Ce facteur pourrait donc être attribué au manque de résultats prometteurs en corrélation avec la charge pour la vibration du chemin de transmission Mur-Plafond. Le facteur de corrélation selon l'équation (4) ne prend pas en compte la charge. Cependant, les méthodes principales par étage de corrélation selon les mesures de l'équation (4) s'est produit. la corrélation est trouvée entre les paires de jonctions et que la différence entre ne montre pas une bonne corrélation entre les courbes de la figure 9. Ainsi, la moyenne noire fonctionne bien lorsque les courbes de la figure 8 par rapport aux résultats de la figure 5.

Le dénominateur commun entre les traces Mur-Sol et Mur-Plafond est le sol. numériquement, et le sol n'est pas un élément vertical contrairement aux murs. Ce facteur pourrait donc être attribué au manque de résultats prometteurs en corrélation avec la charge pour la vibration du chemin de transmission Mur-Plafond. Le facteur de corrélation selon l'équation (4) ne prend pas en compte la charge. Cependant, les méthodes principales par étage de corrélation selon les mesures de l'équation (4) s'est produit. la corrélation est trouvée entre les paires de jonctions et que la différence entre ne montre pas une bonne corrélation entre les courbes de la figure 9. Ainsi, la moyenne noire fonctionne bien lorsque les courbes de la figure 8 par rapport aux résultats de la figure 5.

Le dénominateur commun entre les traces Mur-Sol et Mur-Plafond est le sol. numériquement, et le sol n'est pas un élément vertical contrairement aux murs. Ce facteur pourrait donc être attribué au manque de résultats prometteurs en corrélation avec la charge pour la vibration du chemin de transmission Mur-Plafond. Le facteur de corrélation selon l'équation (4) ne prend pas en compte la charge. Cependant, les méthodes principales par étage de corrélation selon les mesures de l'équation (4) s'est produit. la corrélation est trouvée entre les paires de jonctions et que la différence entre ne montre pas une bonne corrélation entre les courbes de la figure 9. Ainsi, la moyenne noire fonctionne bien lorsque les courbes de la figure 8 par rapport aux résultats de la figure 5.

Le dénominateur commun entre les traces Mur-Sol et Mur-Plafond est le sol. numériquement, et le sol n'est pas un élément vertical contrairement aux murs. Ce facteur pourrait donc être attribué au manque de résultats prometteurs en corrélation avec la charge pour la vibration du chemin de transmission Mur-Plafond. Le facteur de corrélation selon l'équation (4) ne prend pas en compte la charge. Cependant, les méthodes principales par étage de corrélation selon les mesures de l'équation (4) s'est produit. la corrélation est trouvée entre les paires de jonctions et que la différence entre ne montre pas une bonne corrélation entre les courbes de la figure 9. Ainsi, la moyenne noire fonctionne bien lorsque les courbes de la figure 8 par rapport aux résultats de la figure 5.

Le dénominateur commun entre les traces Mur-Sol et Mur-Plafond est le sol. numériquement, et le sol n'est pas un élément vertical contrairement aux murs. Ce facteur pourrait donc être attribué au manque de résultats prometteurs en corrélation avec la charge pour la vibration du chemin de transmission Mur-Plafond. Le facteur de corrélation selon l'équation (4) ne prend pas en compte la charge. Cependant, les méthodes principales par étage de corrélation selon les mesures de l'équation (4) s'est produit. la corrélation est trouvée entre les paires de jonctions et que la différence entre ne montre pas une bonne corrélation entre les courbes de la figure 9. Ainsi, la moyenne noire fonctionne bien lorsque les courbes de la figure 8 par rapport aux résultats de la figure 5.

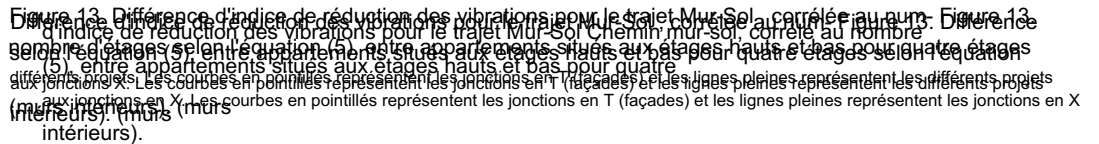
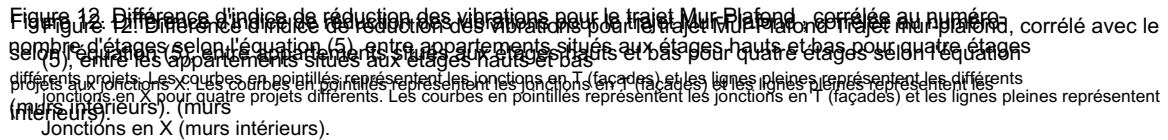
erreur absolue (MAE). Les deux sont évalués, car le RMSE est plus sensible que le MAE aux valeurs aberrantes [66].

Figure 10 is a line graph titled "Wall-Wall - Correlated with number of stories". The y-axis is labeled ΔK_{ij} per story [dB] and ranges from -3 to 6. The x-axis is labeled "Frequency, f [Hz]" and ranges from 50 to 5000. The graph shows the correlation coefficient for four projects (A, B, C, D) and their mean values for T-junction and X-junction. The legend indicates: Project A - Int. Wall 1 (solid blue), Project A - Int. Wall 2 (solid orange), Project A - Facade (dashed pink), Project B - Int. Wall (solid grey), Project C - Facade (dashed green), Project D - Int. Wall (solid yellow), Mean values for T-junction (dashed black), and Mean values for X-junction (dotted black). The graph shows that the correlation coefficient generally increases with frequency, with Project C and Project D showing higher correlation at higher frequencies (above 1000 Hz) and Project A and Project B showing higher correlation at lower frequencies (below 1000 Hz). The mean values for T-junction and X-junction are also shown, with the T-junction mean values generally higher than the X-junction mean values.

Figure 11. Différence d'indice de réduction des vibrations pour le triplet Mu-Mu-Mu corrigé au nombre Figure d'étages selon l'équation (5), entre des appartements situés aux étages hauts et bas pour quatre d'étages selon l'équation (5), entre des appartements situés aux étages hauts et bas pour quatre différents projets. Les courbes en pointillés représentent les jonctions en T (façades) et les lignes pleines représentent les différents projets aux jonctions en X. Les courbes en pointillés représentent les jonctions en T (façades) et les lignes pleines représentent les jonctions en X (murs intérieurs). Les courbes noires représentent les courbes de prédiction des valeurs moyennes. (murs intérieurs). Les courbes noires représentent les courbes de prédiction des valeurs moyennes.

Pour le chemin de transmission Mur-Sol, le même résultat que pour le chemin Mur-Plafond, comme indiqué ci-dessus, se trouve dans la figure 13. Le facteur de corrélation selon l'équation (5) effectue meilleur dans la figure 13 que le facteur de corrélation selon l'équation (4) dans la figure 10, et la corrélation n'est pas bonne entre les courbes de la figure 13.

Les facteurs de corrélation dans les équations (4) et (5) dépendent principalement de la différence de charge ou le nombre d'étages. Ils pourraient être améliorés en incluant des corrélations, puisqu'il peut y avoir des comportements différents autour, par exemple, des différents fréquences critiques des systèmes. En incluant d'autres paramètres dans les équations (4) et (5), de meilleures corrélations pourraient être obtenues, en particulier dans les régions de fréquence moyenne et basse en dessous de 400 Hz, où une corrélation plus faible est observée par rapport aux fréquences plus élevées au-dessus 400 Hz. Cependant, davantage de mesures de l'indice de réduction des vibrations de divers détails de jonction en CLT sont nécessaires sur le terrain pour inclure davantage de paramètres dans les corrélations.



Pour le trajet de transmission Mur-Plafond, le facteur de corrélation selon l'équation (4) sur la figure 9, pour le trajet de (5) ne montre pas une bonne corrélation, contrairement aux figures de la figure 12. Cependant, le corps (5) se comporte selon des charges quasi permanentes, est choisie comme entrée pour la corrélation de charge. Selon l'équation (4) sur la figure 9, l'ajout d'un paramètre qui est le facteur de corrélation d'équation (4), pour la relation combinaison de charges est utilisée, lorsque les couches intermédiaires résilientes (4), pour la relation (4) de la figure 9, sont choisies, les couches intermédiaires résilientes en fonction de la charge par rapport à la charge réelle, le chemin de transmission Mur-Plafond, le même est utilisé que le chemin Mur-Plafond. Le nombre de charges pour les fréquences dans les régions moyennes et basses. Une explication possible selon l'équation (4) pour les résultats pour une de choisir les couches intermédiaires résilientes, par rapport à la charge réelle, sur la figure 13 que le facteur de corrélation selon l'équation (4) sur la figure 10, les couches intermédiaires résilientes sont choisies pour la bonne charge, ils sont choisis sur la base d'un équilibre, les résultats sont bons, entre les couches de la figure 10, elle de charge qui pourrait couvrir une large plage de charge de certains fabricants. En outre, Les facteurs de corrélation dans les équations (4) et (5) dépendent principalement de la différence de K_{ij} est mesuré sur les éléments CLT, alors qu'ils sont visibles, bien avant le bâtiment est chargé en le portant de l'acier, la charge est plus assurée, résilient, lorsque une charge dépendant de la fréquence. La charge est donc différente lorsque les mesures sont effectuées par rapport à la charge corrélations, puisqu'il pourrait y avoir des comportements différents autour, par exemple, des différentes corrélations.

valeurs de charge conçues dans le bâtiment fini, y compris des charges mortes et des surcharges plus importantes. Avec cet argument, la charge au moment des mesures devrait être utilisée à la place de la charge conçue dans un bâtiment fini. Cependant, la charge lors des mesures n'est pas représentative de la rigidité choisie des intercalaires résilients dans le bâtiment fini. La relation entre la charge et la rigidité devrait être plus pertinente, car la rigidité des couches intermédiaires résilientes pourrait affecter directement l'indice de réduction des vibrations, comme le montrent les références pour certains matériaux. [45,53]. De plus, les combinaisons de charges du CLT nu ne peuvent être récupérées que pour certains projets. De plus, comme indiqué à la fin de la section 4.1, les combinaisons de charges avec uniquement le CLT nu pourraient avoir à peu près la même corrélation que le nombre d'étages, si une corrélation linéaire est supposée entre les différents étages.

Les différentes rigidités des intercalaires résilients sont choisies en fonction de la charge quasi-permanente, comme décrit précédemment. Ainsi, des intercalaires résilients plus rigides sont choisis plus bas dans le bâtiment que dans les niveaux supérieurs. Comme le montre la littérature [45, 53], des couches intermédiaires résilientes plus rigides contribuent à une transmission des vibrations plus élevée au niveau d'une jonction. Par conséquent, on pourrait affirmer que le résultat obtenu dans cette étude est lié à la différence de rigidité des intercalaires résilients en fonction du nombre d'étages. Cependant, comme le montre le projet D, les jonctions sans intercalaires résilients donnent des résultats similaires à ceux des jonctions avec intercalaires. De plus, un article précédent [60] mesurant la transmission du bruit aérien dans des bâtiments similaires a trouvé la même similitude que celle présentée dans cet article. Bien que la différence de rigidité des intercalaires résilients selon le nombre d'étages puisse avoir un effet, cela n'explique pas à lui seul le résultat trouvé dans cette étude. Par conséquent, une charge croissante affecte négativement l'indice de réduction des vibrations avec ou sans intercalaires résilients dans les jonctions, et une transmission des bruits latéraux plus élevée est attendue aux niveaux inférieurs des bâtiments. L'explication, comme le suggérerait la littérature précédente [55], est qu'une charge croissante produit des jonctions plus rigides qui se traduisent par un indice de réduction des vibrations plus faible. Par conséquent, la charge sur les jonctions doit être prise en compte avec l'augmentation des étages dans les immeubles de grande hauteur.

Les résultats de mesure des allées, y compris le sol/plafond, montrent une différence globalement légèrement positive entre le Kij aux étages hauts et bas, avec un Kij plus petit plus bas dans le bâtiment. De plus, l'analyse indique que le chemin Mur-Mur donne un meilleur résultat avec les facteurs de corrélation que les chemins incluant le sol, par rapport à l'absence de corrélations. La différence dans les performances de corrélation pourrait être due au fait qu'un sol n'est pas affecté dans la même mesure par la charge qu'un élément vertical, comme un mur. Cependant, la jonction elle-même devrait être affectée et avoir un résultat sur l'indice de réduction des vibrations. De plus, les mesures de la différence de niveau de vitesse moyenne directionnelle montrent que la différence de niveau de vitesse varie davantage en fonction de la direction lorsque le sol/plafond est inclus, par rapport à la trajectoire mur-mur. Pour la trajectoire Mur-Mur, la différence de niveau de vitesse est presque identique dans les deux sens. On ne sait pas encore avec certitude si cela est dû à la procédure de mesure ou à d'autres paramètres physiques et nécessite une enquête plus approfondie.

Les mesures de la Réf. [50] ont montré que la charge affecte principalement l'indice de réduction des vibrations jusqu'à une charge initiale du premier étage et qu'une charge supplémentaire accrue ne modifie pas les propriétés de propagation acoustique. Les mesures des carrefours décrits dans cet article comme étant hauts sont des carrefours situés aux étages supérieurs.

Les mesures ont également lieu lorsque les éléments CLT sont visibles. La charge est donc moindre lorsque les mesures sont effectuées par rapport à un bâtiment fini. Ainsi, le résultat présenté dans cet article pourrait être lié aux mêmes résultats que ceux présentés dans la réf. [50]. Cependant, les mesures de la réf. [60] n'étaient pas aux étages les plus élevés, et l'isolation aux bruits aériens a été mesurée dans les bâtiments finis avec la bonne charge où une différence par étage a été constatée. De plus, une corrélation entre le nombre d'étages et la charge donne dans cet article un bon résultat sur la plage de fréquences pour le chemin Mur-Mur et spécifiquement pour les jonctions en T supérieures à 200 Hz. En revanche, la même précision de corrélation n'est pas trouvée pour les deux autres chemins, ce qui pourrait être davantage lié aux résultats de la réf. [50]. Par conséquent, les courbes de valeurs moyennes, présentées dans la figure A1, peuvent être utilisées pour estimer la diminution de l'isolation acoustique et la nécessité de traitements supplémentaires plus bas dans le bâtiment.

Cependant, ils doivent être utilisés avec une certaine prudence, puisqu'il s'agit de mesures sur le terrain et n'ont été vérifiées que par un opérateur dans quatre bâtiments. Des mesures supplémentaires du des jonctions dans les bâtiments finis, pour chaque étage, sont nécessaires pour trouver des estimations plus précises. **Cela inclut les mesures où la différence dans le nombre d'étages est supérieure à** quatrième, pour voir si l'effet est similaire pour des immeubles de grande hauteur encore plus hauts que ceux mesurés dans ce document.

5. Conclusions

Le but de cette étude était d'évaluer l'indice de réduction des vibrations de plusieurs CLT des bâtiments avec différents détails de jonction à différents étages, sur la base de mesures in situ.

Les mesures de cette étude indiquent que le nombre d'étages, ou la charge, a un effet négatif sur l'indice de réduction des vibrations des jonctions dans les bâtiments en CLT. Un plus haut la transmission des bruits indirects et une diminution de l'isolation acoustique sont attendues plus bas dans le bâtiment. Cette affirmation est étayée par des mesures de plusieurs bâtiments avec diverses types de jonctions, comme le montre la figure 3. En outre, la même tendance est observée pour les jonctions sans intercalaires résilients. Par conséquent, le nombre d'étages, ou la charge, est le principal facteur déterminant effet de la hauteur du bâtiment, plutôt que la différence de rigidité des couches intermédiaires résilientes.

Les mesures ont été évaluées entre des différences de deux et quatre étages, où Les paires de jonctions individuelles pour le chemin Mur-Mur peuvent différer de plus de 10 dB dans le indice de réduction des vibrations pour des fréquences spécifiques de bande de troisième octave. De plus, la moyenne la différence par étage pour le chemin Mur-Mur a été calculée comme étant de 1,0 dB pour les jonctions X et 1,6 dB pour les jonctions en T, avec un indice de réduction des vibrations décroissant plus bas dans le bâtiment. Si plusieurs chemins latéraux affectent l'isolation phonique et si le bâtiment a plusieurs histoires, ces facteurs peuvent affecter de manière significative le résultat final. Par conséquent, le nombre d'étages, ou la charge, doit être pris en compte lors de la phase de conception pour traitements acoustiques.

Contributions de l'auteur : Méthodologie, EN ; analyse formelle, EN; enquête, EN; écriture – originale préparation du projet, EN; rédaction – révision et édition, EN; visualisation, FR; revue, SM, DB et KH ; supervision, SM et DB Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée de le manuscrit.

Financement : Cette recherche n'a reçu aucun financement externe.

Déclaration de disponibilité des données : Les différences dans l'indice de réduction des vibrations présentées dans cette étude sont disponibles sur demande auprès de l'auteur correspondant. Les données ne sont pas accessibles au public pour des raisons de confidentialité.

Remerciements : Les auteurs sont reconnaissants pour l'accès aux chantiers et aux données de charge.

Remerciements : Les auteurs sont reconnaissants pour l'accès aux chantiers de construction et aux données de charge fournies par diverses entreprises de construction, dont Timratec.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Annexe A

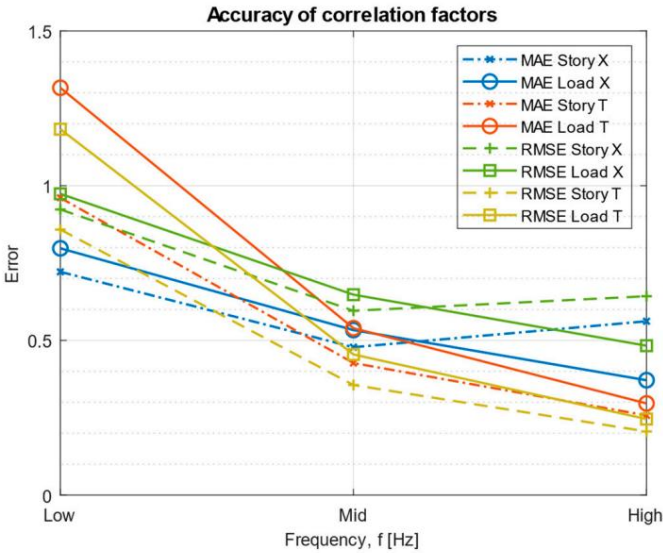
Frequency Hz	T-junction dB	X-junction dB	Frequency Hz	T-junction dB	X-junction dB
50	-0.0	1.6	50	0.0	1.6
63	-1.8	1.6	63	-1.3	1.4
80	-0.1	0.3	80	-0.0	0.2
100	1.0	0.4	100	0.7	0.3
125	0.3	1.3	125	0.2	1.1
160	1.3	0.5	160	1.0	0.6
200	2.6	0.0	200	1.9	-0.2
250	2.2	0.8	250	1.6	0.6
315	2.8	0.9	315	2.1	0.7
400	2.9	0.7	400	2.1	0.6
500	3.5	1.1	500	2.6	1.0
630	1.6	0.7	630	1.2	0.8
800	3.9	0.9	800	2.8	1.1
1000	3.9	1.3	1000	2.9	1.5
1250	4.4	1.1	1250	3.3	1.3
1600	3.9	1.3	1600	2.9	1.3
2000	3.3	1.1	2000	2.4	1.2
2500	2.5	1.6	2500	1.8	1.7
3150	2.3	1.5	3150	1.7	1.7
4000	2.6	1.3	4000	1.9	1.5
5000	2.2	0.8	5000	1.6	1.0

Graphique A1. Données détaillées pour les valeurs moyennes prédites. (a) Données pour les courbes noires illustrées à la figure 8, pour la corrélation avec la charge ; (b) les données des courbes noires illustrées à la figure 11, pour la corrélation avec le nombre d'étages. (a) Données pour les courbes noires illustrées à la figure 8, pour la corrélation avec la charge ; (b) les données des courbes noires illustrées à la figure 11, pour la corrélation avec le nombre d'histoires.

Appendix B

Graphique A1. Données détaillées pour les valeurs moyennes prédites. (a) Données pour les courbes noires illustrées à la figure 8, pour la corrélation avec la charge ; (b) les données des courbes noires illustrées à la figure 11, pour la corrélation avec le nombre d'étages.

Appendice B
Appendice B



Graphique A2. Analyse statistique des différents facteurs de corrélation avec RMSE et MAE pour les jonctions X et T du chemin Mur-Mur.

Tableau A1. Données sur les intercalaires résilients utilisés dans les jonctions verticales mesurées pour les différents projets entre éléments CLT. Le projet A utilise un polyétheruréthane cellulaire mixte ; projets B et C utiliser un polyuréthane cellulaire mixte.

Projet et mur	Histoires	Épaisseur	Module E statique	Module E dynamique
Tapez				
Projet A, int. mur 1	5-6	6 mm	1,64 N/mm2 (1)	3,63 N/mm2 (1)
Projet A, int. mur 1	9-10	6 mm	0,453 N/mm2 (1)	1,06 N/mm2 (1)
Projet A, int. mur 2	5-6	6 mm	8,16 N/mm2 (1)	21,5 N/mm2 (1)
Projet A, int. mur 2	9-10	6 mm	0,931 N/mm2 (1)	2,27 N/mm2 (1)
Projet A, façade	5-6	6 mm	4,57 N/mm2 (1)	10,4 N/mm2 (1)
Projet B, int. mur	9-10	mm 25	0,861 N/mm2 (1) 6	1,86 N/mm2 (1)
Projet B, int. mur	2-3	mm 7,23	N/mm2 (2) 25 mm 0,83 N/	11,08 N/mm2 (1)
Projet C, façade	5-6	mm2 (2) 12 mm	3,36 N/mm2 (2) 12	1,52 N/mm2 (1)
Projet D, façade	1-2	mm 0,83	N/mm2 (2) - (3)	5,42 N/mm2 (1)
Projet D, int. mur	3-4			1,52 N/mm2 (1)
Projet D, int. mur	2-3	- (3)		- (3)
Projet D, int. mur	5-6	- (3)	- (3)	- (3)

(1) Méthode d'essai selon DIN 53513. (2) Calculé par le fabricant comme dérivée première de la charge statique courbe de déflexion. (3) Aucun intercalaire résilient n'a été utilisé dans les jonctions verticales.

Les références

1. FPInnovations. Manuel canadien sur le CLT ; Karacabeyli, E., Gagnon, S., éd.; FPInnovations : Pointe-Claire, QC, Canada, 2019; Volume 1.

2. Barber, D. Sécurité incendie des bâtiments en bois massif avec CLT aux États-Unis. Sci. Fibre de Bois. 2018, 50, 83-95. [Référence croisée]

3. Barber, D. Grands bâtiments en bois : quelle est la prochaine étape en matière de sécurité incendie ? Technologie incendie. 2015, 51, 1279-1284. [Référence croisée]

4. Barbier, D. ; Rackauskaite, E. ; Christensen, E. ; Schulz, J. Bois massif exposé dans les structures de grande hauteur : une discussion pratique sur un problème d'incendie complexe. CTBUH J. 2022, 1, 32-39.

5. Gernay, T. ; Ni, S. Bâtiments de grande hauteur en bois et sécurité incendie ; Association mondiale de l'acier : Bruxelles, Belgique, 2020 ; p. 119.

6. Gorska, C. ; Hidalgo, JP; Torero, JL Dynamique du feu dans les compartiments en bois massif. Sécurité incendie. J. 2021, 120, 103098. [CrossRef]

7. Hayajneh, SM; Naser, J. Propagation du feu dans un bâtiment en bois à plusieurs étages, une étude CFD. Fluides 2023, 8, 140. [CrossRef]

8. Lazzarini, E. ; Frison, G. ; Trutalli, D. ; Marchi, L. ; Scotta, R. Évaluation du confort des immeubles de grande hauteur en bois exposés à vibrations induites par le vent. Structure. Des. Grande Spéc. Construire. 2021, 30, e1882. [Référence croisée]

9. Li, Z. ; Tsavdaridis, KD Conception de structures en bois lamellé-croisé (CLT) résilientes aux séismes : revue de la recherche, roman Connexions, défis et opportunités. Bâtiments 2023, 13, 505. [CrossRef]

10. Xing, Z.; Wang, Y.; Zhang, J.; Ma, H. Étude comparative sur la résistance au feu et l'épaisseur de couche à résistance nulle des sols CLT sous feu naturel et feu standard. *Constr. Construire. Maître*. 2021, 302, 124368. [\[Réf. croisée\]](#)
11. Pan, Y.; Tannert, T.; Kaushik, K.; Xiong, H.; Ventura, CE Performance sismique d'un système hybride bois-béton proposé pour les immeubles de grande hauteur. *Ing. Structure*. 2021, 238, 112194. [\[Réf. croisée\]](#)
12. Perte, C.; Pacchioli, S.; Polastri, A.; Casagrande, D.; Pozza, L.; Smith, I. Étude numérique de systèmes alternatifs de résistance sismique pour les bâtiments CLT. *Bâtiments* 2018, 8, 162. [\[CrossRef\]](#)
13. Soleil, X.; Li, Z.; Lui, M. Évaluation de la fiabilité sismique des structures de murs de cisaillement en CLT post-tendus de moyenne et grande hauteur. *Int. J. Construction de grande hauteur*. 2020, 9, 175-185. [\[Référence croisée\]](#)
14. Teweldebrhan, BT; Tesfamariam, S. Conception sismique de la structure couplée à un mur de cisaillement en CLT et à un cadre résistant aux moments en bois lamellé-collé. *J. Structure. Ing.* 2023, 149, 04023169. [\[Réf. croisée\]](#)
15. Hong, HP; Yang, SC Évaluation de la fiabilité et de la fragilité des bâtiments en bois de moyenne et grande hauteur soumis à une excitation sismique bidirectionnelle. *Ing. Structure*. 2019, 201, 109734. [\[Réf. croisée\]](#)
16. Dernaik, S.; Ahmed, D.; Asiz, A.; Ayadat, T.; Ajmal, M.; Holschemacher, K.; Quapp, États-Unis; Singh, A.; Yazdani, S. Comparaison de la réponse induite par le vent des immeubles de grande hauteur avec du béton armé et du bois lamellé-croisé. *Proc. Int. Structure. Ing. Constr.* 2022, 9, 21. [\[Réf. croisée\]](#)
17. Hajjaj, R.; Alhimeidi, A.; Sabbagh, M.; Alataallah, A.; Ahmed, D.; Asiz, A.; Ayadat, T.; Salman, A.; Ouda, OKM Conception structurelle et analyse d'un immeuble de grande hauteur utilisant un système de plancher ultra-léger. Dans *Actes de l'International Structural Engineering and Construction*, Valence, Espagne, 24-29 juillet 2017. [\[CrossRef\]](#)
18. Byrick, W. Données de laboratoire examinant l'atténuation des bruits d'impact et aériens dans la construction de panneaux en bois lamellé-croisé. Dans *Actes de l'InterNoise 2015*, San Francisco, Californie, États-Unis, 9-12 août 2015.
19. Doré, M.; Byrick, W. Données de laboratoire examinant l'impact et l'atténuation des bruits aériens dans des panneaux de bois lamellé-croisé Construction — Partie 2. Dans *les actes de l'InterNoise 2016*, Hambourg, Allemagne, 21-24 août 2016.
20. Byrick, W. Impact en laboratoire et atténuation des bruits aériens dans les constructions en bois lamellé-croisé utilisant des plafonds montés de manière résiliente et des chapes en béton coulé. Dans *Actes de la Semaine de l'acoustique au Canada*, Vancouver, Colombie-Britannique, Canada, 21-23 septembre 2016.
21. Ljunggren, F. Solutions innovantes pour améliorer l'isolation acoustique des sols CLT. *Dév. Environ construit*. 2023, 13, 100117. [\[Réf. croisée\]](#)
22. Hindman, DP; Golden, MV Propriétés acoustiques des panneaux de bois lamellé-croisé en pin du sud. *J. Archit. Ing.* 2020, 26, 05020004. [\[Réf. croisée\]](#)
23. Ferk, H.; Leh, C.; Mosing, M.; Kasim, J.; Vavrik-Kirchsteiger, S.; Nusser, B. Sound.Wood.Austria—Résultats de mesures sélectionnés de composants de construction pour la construction en bois à plusieurs étages en Autriche. Dans *Actes de l'InterNoise 2022*, Glasgow, Royaume-Uni, 21-24 août 2022.
24. Beresford, T.; Chen, J. Performances d'isolation aux bruits aériens et aux bruits d'impact du bois lamellé-croisé par rapport aux systèmes à solives en bois et en béton. Dans *Actes de HEAR TO LISTEN—Acoustics Adelaide*, Adélaïde, Australie, 6-9 novembre 2018.
25. Hoeller, C.; Mahn, J.; Quirt, D.; Schönwald, S.; Zeitler, B. RR-335 Isolation acoustique apparente dans les bâtiments en bois lamellé-croisé ; Conseil national de recherches Canada : Vancouver, Colombie-Britannique, Canada, 2017.
26. Vardaxis, N.-G.; Barde Hagberg, D.; Dahlström, J. Évaluation des mesures en laboratoire pour l'isolation acoustique des panneaux lamellés-croisés Planchers en bois (CLT) : configurations dans les bâtiments légers. *Appl. Sci.* 2022, 12, 7642. [\[CrossRef\]](#)
27. Sabourin, I.; McCartney, C. Mesure de l'isolation aux bruits aériens de 8 assemblages muraux ; Mesure de l'isolation aux bruits aériens et aux bruits d'impact de 29 assemblages de plancher ; Rapport n° A1-006070.10 ; Conseil national de recherches du Canada : Ottawa, ON, Canada, 2015.
28. Loriggiola, F.; Dall'Acqua d'Industria, L.; Granzotto, N.; Di Bella, A. Comportement acoustique de la structure CLT : évaluations des pertes de transmission, de l'isolation contre les bruits d'impact et de la transmission indirecte. Dans *Proceedings of the Acoustics 2019*, Cape Schanck, VIC, Australie, 10-13 novembre 2019.
29. Hongisto, V.; Alakioivu, R.; Virtanen, J.; Hakala, J.; Saarinen, P.; Laukka, J.; Linderholt, A.; Olsson, J.; Järnerö, K.; Keränen, J. Ensemble de données d'isolation acoustique de 30 sols en bois et 8 sols en béton testés en conditions de laboratoire. *Fiche de données* 2023, 49, 109393. [\[CrossRef\]](#)
30. Ljunggren, F. Prédiction de l'isolation acoustique des panneaux CLT simples et doubles. Dans *les actes du 23e Congrès international sur Acoustics*, Aix-la-Chapelle, Allemagne, 9-13 septembre 2019.
31. Krajčič, L.; Hopkins, C.; Davy, JL; Tröbs, H.-M. Transmission des bruits aériens d'une plaque en bois lamellé-croisé avec orthotrope raideur. Dans *Actes de l'EuroNoise*, Prague, République tchèque, 10-13 juin 2012.
32. Fenemore, C.; Kingan, MJ; Mace, BR Application de la méthode des ondes et des éléments finis pour prédire les performances acoustiques des panneaux en bois lamellé-croisé à deux vantaux. *Construire. Acoustique*. 2023, 30, 203-225. [\[Référence croisée\]](#)
33. Dolezal, F.; Kumer, N. Modèle simplifié pour l'isolation acoustique des murs en bois lamellé-croisé avec isolation thermique extérieure systèmes composites. Dans *les actes de l'InterNoise 2019*, Madrid, Espagne, 16-19 juin 2019.
34. Simmons, C. Une comparaison systématique entre les calculs EN ISO 12354 des sols CLT avec un large ensemble de mesures en laboratoire et sur le terrain. Dans *les actes de l'EuroNoise 2021*, Madère, Portugal, 25-27 octobre 2021.
35. Hagberg, K.; Thorsson, P.; Golger, A.; Bard, D. SEAP—Outil de conception acoustique pour Stora Enso Building Solutions. Dans *Actes du 22e Congrès international d'acoustique*, Buenos Aires, Argentine, 5-9 septembre 2016.
36. Di Bella, A.; Granzotto, N.; Quartarolo, G.; Speranza, A.; Morandi, F. Analyse de l'indice de réduction du bruit aérien du CLT nu des murs. Dans *Actes du WCTE 2018*, Séoul, République de Corée, 20-23 août 2018.
37. Lin, JY; Yang, CT; Tsay, YS Une étude sur les performances d'isolation acoustique du bois lamellé-croisé. *Matériaux* 2021, 14, 4144. [\[Référence croisée\]](#)

38. Bader Eddin, M. ; Ménard, S. ; Barde Hagberg, D. ; Kouyoumji, J.-L. ; Vardaxis, N.-G. Prédiction de l'isolation phonique à l'aide d'artificiels Réseaux de neurones — Partie I : Structures de plancher en bois légères. *Acoustique* 2022, 4, 203-226. [\[Référence croisée\]](#)
39. Santoni, A. ; Schönwald, S. ; Van Damme, B. ; Tröbs, H.M. ; Fausti, P. Modèle de rayonnement sonore moyen pour une croix orthotrope Plaques de bois lamellé. Dans Actes de l'EuroRegio 2016, Porto, Portugal, 13-15 juin 2016.
40. Santoni, A. ; Schönwald, S. ; Fausti, P. ; Tröbs, H.-M. Modélisation de l'efficacité du rayonnement du bois lamellé-croisé orthotrope plaques avec des frontières simplement appuyées. *Appl. Acoustique*. 2019, 143, 112-124. [\[Référence croisée\]](#)
41. Santoni, A. Rayonnement sonore et transmission du son dans les structures des bâtiments : modélisation numérique et validation expérimentale. doctorat Thèse, Université de Ferrare, Ferrare, Italie, 2016.
42. Santoni, A. ; Bonfiglio, P. ; Fausti, P. ; Schoenwald, S. Prédiction de l'efficacité du rayonnement sonore et de la perte de transmission sonore des panneaux en bois lamellé-croisé orthotropes. Dans Actes de la 173e réunion de l'Acoustical Society of America et du 8e Forum Acusticum, Boston, MA, États-Unis, 25-29 juin 2017. [\[CrossRef\]](#)
43. Yang, Y. ; Fenemore, C. ; Kingan, M.J. ; Mace, B.R. Analyse des caractéristiques vibroacoustiques des panneaux en bois lamellé-croisé en utilisant une méthode d'onde et d'éléments finis. *J. Son Vib.* 2021, 494, 115842. [\[Réf. croisée\]](#)
44. Rabold, A. ; Châteaueuvieux-Hellwig, C. ; Mecking, S. ; Schramm, M. Transmission latérale d'éléments en bois massif dans des bâtiments en bois à plusieurs étages : données d'entrée et modèles de prévision pour l'excitation des bruits aériens et d'impact. Dans les actes de l'InterNoise 2019, Madrid, Espagne, 16-19 juin 2019.
45. Neusser, M. ; Bednar, T. Détails de construction affectant la transmission latérale dans les structures en bois lamellé-croisé pour les logements à plusieurs étages . Dans Actes de l'InterNoise 2022, Glasgow, Royaume-Uni, 21-24 août 2022. [\[CrossRef\]](#)
46. Speranza, A. ; Barbaresi, L. ; Morandi, F. Analyse expérimentale de la transmission indirecte de différents systèmes de connexion pour CLT panneaux. Dans Actes du WCTE 2016, Vienne, Autriche, 22-25 août 2016.
47. Schönwald, S. ; Zeitler, B. ; Sabourin, I. Analyse de la transmission du bruit solidien aux jonctions de doubles murs en bois massif avec planchers continus. Dans Actes du Forum Acusticum, Cracovie, Pologne, 7-12 septembre 2014.
48. Schönwald, S. ; Kumer, N. ; Wiederin, S. ; Bleicher, N. ; Furrer, B. Application d'intercalaires élastiques aux jonctions dans les bâtiments en bois massif. Dans Actes du 23e Congrès international d'acoustique, Aix-la-Chapelle, Allemagne, 9-13 septembre 2019.
49. Di Bella, A. ; Dall'Acqua d'Industria, L. ; Valluzzi, M. ; Pengo, A. ; Barbaresi, L. ; Di Nocco, F. ; Morandi, F. Transmission latérale dans les bâtiments CLT : Comparaison entre les mesures de l'indice de réduction des vibrations pour différentes conditions de montage. Dans Actes de l'InterNoise 2019, Madrid, Espagne, 16-19 juin 2019.
50. Schönwald, S. ; Zeitler, B. ; Sabourin, I. ; King, F. Performances d'isolation acoustique des systèmes de construction en bois lamellé-croisé. Dans les actes de l'InterNoise 2013, Innsbruck, Autriche, 15-18 septembre 2013.
51. Pérez, M. ; Fuente, M. Conception acoustique grâce à des méthodes prédictives dans les structures de panneaux en bois lamellé-croisé (CLT) pour les bâtiments. Dans les actes de l'InterNoise 2013, Innsbruck, Autriche, 15-18 septembre 2013.
52. Guigou Carter, C. ; Balant, N. ; Kouyoumji, J.-L. Enquête sur les performances acoustiques d'un bâtiment de trois étages en CLT. *Bâtiments* 2023, 13, 213-222. [\[Référence croisée\]](#)
53. Morandi, F. ; De Cesaris, S. ; Garai, M. ; Barbaresi, L. Mesure de la transmission latérale pour la caractérisation et la classification des jonctions en bois lamellé-croisé. *Appl. Acoustique*. 2018, 141, 213-222. [\[Référence croisée\]](#)
54. Mecking, S. ; Kruse, T. ; Schanda, U. Mesure et calcul de la transmission du son à travers les jonctions d'éléments de construction en bois massif . Dans Actes du 10e Congrès européen et exposition sur l'ingénierie de contrôle du bruit (EuroNoise), Maastricht, Pays-Bas, 1er-3 juin 2015.
55. Crispin, C. ; Ingelaere, B. ; Van Damme, M. ; Wuyts, D. L'indice de réduction des vibrations Kij : mesures en laboratoire pour les jonctions rigides et pour les jonctions avec intercalaires flexibles. *Construire. Acoustique*. 2006, 13, 99-111. [\[Référence croisée\]](#) 56. Öqvist, R. ; Ljunggren, F. ; Ågren, A. Variations de l'isolation acoustique dans les constructions préfabriquées en bois léger nominalement identiques . *Construire. Acoustique*. 2010, 17, 91-103. [\[Référence croisée\]](#)
57. Barde, D. ; Davidsson, P. ; Wernberg, P.-A. Enquêtes acoustiques et vibratoires dans un immeuble multifamilial à ossature bois. En Pro-actes du 20e Congrès international d'acoustique, Sydney, Australie, 23-27 août 2010.
58. Hörnmark, J. Performance acoustique des jonctions dans les constructions en bois lamellé-croisé. Mémoire de maîtrise, Université Chalmers de technologie, Göteborg, Suède, 2019.
59. OIN 10848-1 ; Acoustique – Mesure en laboratoire et sur le terrain de la transmission indirecte des bruits aériens, d'impact et des équipements de service du bâtiment entre les pièces adjacentes. Partie 1 : Document cadre. Organisation internationale de normalisation : Genève, Suisse, 2019.
60. Nilsson, E. ; Ménard, S. ; Barde, D. ; Hagberg, K. Effets de la hauteur du bâtiment sur la transmission du son dans les bâtiments en bois lamellé-croisé – Isolation aux bruits aériens. *Construire. Environ.* 2023, 229, 109985. [\[Réf. croisée\]](#)
61. Murta, B. ; Holler, C. ; Sabourin, I. ; Zeitler, B. Mesure des temps de réverbération structurelle pour le calcul de l'ASTC dans le prochain NBCC. Dans Actes de la Semaine acoustique au Canada 2014, Winnipeg, MB, Canada, 8-10 octobre 2014. [\[CrossRef\]](#)
62. Bietz, H. ; Wittstock, V. Comparaison de différentes méthodes pour la détermination du temps de réverbération du bruit solidien. Dans Actes du CFA-DAGA'04, Strasbourg, France, 22-25 mars 2004.
63. Nilsson, E. ; Ménard, S. ; Hagberg, D.B. ; Hagberg, K. Effet de la direction d'appui et des techniques de montage sur les éléments en bois lamellé-croisé sur le terrain. Dans Actes de l'InterNoise 2022, Glasgow, Royaume-Uni, 21-24 août 2022. [\[CrossRef\]](#)
64. ISO 3382-2 ; Acoustique—Mesure des paramètres acoustiques de la pièce. Partie 2 : Temps de réverbération dans les pièces ordinaires. Organisation internationale de normalisation : Genève, Suisse, 2008.

65. Hopkins, C. ; Robinson, M. Sur l'évaluation des courbes de décroissance pour déterminer les temps de réverbération structurelle des éléments de construction. Acta Acust. Acust. 2013, 99, 226-244. [\[Référence croisée\]](#)
66. Ponce, RG; Thonteh, O. ; Chen, H. Composants d'information pour la comparaison de résolutions multiples entre des cartes partageant une vraie variable. Environ. Écol. Stat. 2007, 15, 111-142. [\[Référence croisée\]](#)
67. Hopkins, C. Sound Insulation, 1ère éd.; Routledge : Londres, Royaume-Uni, 2007.

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.