

École des Ponts

ParisTech

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

2019

Projet de Fin d'Etudes

Département Génie Civil et Construction

Francisco Raul LOBO RODRIGUES

Elève double diplôme

Tuteur professionnel : Adrien Escoffier

Tuteur académique : Arthur Lebée

Développement des techniques constructives en Bois

Etude d'optimisation des planchers CLT

Projet réalisé au sein de Elioth (EGIS Concept)

4, rue Dolorès Ibarruri 93188 MONTREUIL

04/02/2019 - 19/07/2019

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mes parents pour tout le soutien qu'ils m'ont apporté non seulement pour mon semestre PFE, mais tout au long de mes études en France, je ne pourrais pas continuer sans ses mots de réconfort chaque fois que j'en aurais besoin. Je remercie aussi mon tuteur académique, Arthur Lebé, pour son suivi régulier et pour le temps consacré à mon PFE. Je tiens également à remercier tous les membres de l'équipe Elioth qui m'ont chaleureusement accueilli dans l'entreprise et qui se sont toujours occupés de mon intégration et de mon encadrement dans l'équipe. En particulier, un grand merci à Adrien Escoffier, François Latour et Koliann Mam pour le suivi et l'accompagnement donné tout au long de mes études et pour leurs conseils réguliers, leur aide et leur confiance. Un merci aussi à Sophie Monteagudo et Timothée Serra, pour leurs réflexions et feedbacks de temps en temps qui m'ont aidé à progresser sur ma recherche. Je serai toujours reconnaissant pour tout ce que vous m'avez appris au cours de ce semestre.

Résumé

Ce rapport présente une étude sur la compréhension et l'optimisation du calcul des planchers CLT effectuée en deux temps.

La première étape se concentre sur la vérification et la comparaison des méthodes de calcul des planchers CLT et les vérifications aux états limites ultimes et de service, ainsi qu'un descriptif des approches pour modéliser les panneaux via éléments finis à partir des plaques 2D-orthotropes et les logiciels utilisés.

Dans un second temps, une étude de vibration a été développée, basée sur une recherche bibliographique passant par les annexes nationales et leurs documents de référence. Ensuite, l'introduction de l'outil Footfall a permis de mener une comparaison avec les formules pour vérifier leur compatibilité et pertinence. Pour finaliser, l'inclusion des panneaux multi-travées et des panneaux couturés a été détaillée, ainsi qu'une analyse de sensibilité du confort vibratoire à d'autres paramètres, afin d'optimiser les planchers en termes d'épaisseur.

Mots-clés : CLT, plancher, orthotrope, bois, vibration, confort

Abstract

This report presents a study on the understanding and optimization of the calculation of CLT floors carried out in two phases.

The first step focuses on the verification and comparison of CLT floor calculation methods and the verification of ultimate and serviceability limit states, as well as a description of approaches to model panels via finite elements from 2D-orthotropic plates and the software used.

In a second step, a vibration study was developed, based on a literature search through the national annexes and their reference documents. Then, the introduction of the Footfall tool made it possible to compare with the formulas to check their compatibility and relevance. To finalize, the inclusion of multi-bay and stitched panels was detailed, as well as an analysis of the sensitivity of vibration comfort to other parameters, in order to optimize the floors in terms of thickness.

Keywords: CLT, floor, orthotropic, timber, vibration, comfort

Table des matières

Remerciements	2
Résumé	3
Abstract.....	4
Table des matières	5
Liste des tableaux	7
Liste des figures.....	8
Liste des abréviations	11
Introduction	12
Motivation et études préalables	13
1. Conception des planchers dans le cadre d’un projet IGH	13
2. Compréhension du comportement mécanique du panneau CLT	14
3. Optimisation épaisseur x portée	16
4. Enjeux vis-à-vis de la vibration.....	17
5. Réduction de l’impact environnemental	18
Plancher CLT : outils et méthodes de calcul	20
1. Principe.....	20
2. Méthodes de calcul.....	21
2.1. Méthode gamma	21
2.2. Analogie de cisaillement	22
2.3. Timoshenko	23
3. Logiciels de calcul.....	24
3.1. Bemessung KLH	24
3.2. Calculatis by Stora Enso	26
3.3. CLTDesigner	27
4. Calcul par éléments finis	28
4.1. Modèle de plaque 2D orthotrope.....	28
4.2. ACORD-Bat3D	32
4.3. Modèle de plaque ACORD x GSA	33
5. Etats limites	35
5.1. ELU	35
5.2. ELS.....	35

6. Etude comparative.....	36
Dynamique des planchers.....	39
1. Objectif.....	39
2. Descriptif des planchers de la Tour Silva.....	39
3. References	42
3.1. Eurocode 5.....	42
3.2. Annexe Nationale Autrichienne (ÖNORM)	44
3.3. Annexe Nationale Finlandaise (SFS).....	48
3.4. JRC – Méthode OS-RMS90.....	52
4. Vibration de planchers sur plusieurs appuis.....	55
4.1. Critère de fréquence	55
4.2. Critère de raideur.....	57
4.3. Application sur la Tour Silva	58
5. Calcul temporel par éléments finis.....	58
5.1. Footfall analysis GSA	58
5.2. Modèle mathématique	59
6. Résultats	60
6.1. Hypothèses et modélisation.....	60
6.2. Etude de cas isostatique à 1 travée.....	64
6.3. Etude de cas hyperstatique à 2 ou 3 travées.....	67
6.4. Effet de raideur supplémentaire en raison du couturage	74
6.5. Etude de sensibilité.....	77
Conclusion.....	80
Bibliographie	82

Liste des tableaux

Tableau 1 - Critères de flèche aux ELS.....	36
Tableau 2 - Comparatif des méthodes aux ELU et ELS	37
Tableau 3 - Comparatif des méthodes aux ELU et ELS en pourcentage.....	37
Tableau 4 - Comparatif des logiciels vis-à-vis la vibration	38
Tableau 5 - Analyse de fréquence et souplesse d'un plancher à multi-travées	58
Tableau 6 - Récapitulatif des résultats comparatifs pour le plancher isostatique	67
Tableau 7 - Récapitulatif des résultats comparatifs selon les méthodes proposées	73
Tableau 8 - Récapitulatif des résultats prenant en compte le couturage	77
Tableau 9 - Etude de sensibilité de la vibration selon ÖNORM vis-à-vis de l'épaisseur.....	77
Tableau 10 - Sensibilité de la vibration sur GSA vis-à-vis de l'épaisseur.....	78
Tableau 11 - Sensibilité de la vibration selon ÖNORM vis-à-vis de la charge permanente....	78

Liste des figures

Figure 1 - CLT x BLC.....	14
Figure 2 - Cisaillement roulant (Karacabeyli & Douglas, 2013).....	15
Figure 3 - Comportement de la section aux ELS.....	15
Figure 4 - Comportement de la section aux ELU.....	16
Figure 5 - Principe de sollicitation des panneaux CLT sur 2 et 4 appuis.....	16
Figure 6 - Exemple de plan de calepinage des planchers CLT.....	17
Figure 7 - Complexes plancher CLT et mixte et leurs respectifs valeurs d'empreinte carbone	19
Figure 8 - Représentation du terme a_i	22
Figure 9 - Représentation du terme z	23
Figure 10 - Valeurs calculées de κ (Autret, Mariette, & Amosse, 2016).....	24
Figure 11 - Interface Bemessung KLH.....	25
Figure 12 - Exemple de résultat sur Calculatis.....	27
Figure 13 - Interface CLTDesigner.....	27
Figure 14 - Matrice de raideur de panneau CLT.....	29
Figure 15 - p et q pour le calcul de matrice de raideur.....	30
Figure 16 - Définition des donnés d'entrée sur GSA.....	31
Figure 17 - Déformé $ u $ GSA x ACORD.....	34
Figure 18 - Deux différentes théories de plaques pour une plaque fléchie.....	35
Figure 19 - Plan des planchers d'étage type.....	40
Figure 20 - Section CLT 200 L5s Stora Enso.....	40
Figure 21 - Zone critique en termes de vibration.....	41
Figure 22 - Charges d'exploitation appliquées sur plancher critique.....	41
Figure 23 - Extrait de l'Eurocode concernant le critère de vibration.....	42
Figure 24 - Extrait d'Eurocode des valeurs et ratios recommandés pour a et b	42
Figure 25 - Performance vibratoire selon ÖNORM.....	45
Figure 26 - Extrait du calcul de la fréquence propre (Hamm, Richter, & Winter, 2009).....	46
Figure 27 - Coefficient pour la fréquence propre de plancher à deux travées selon ÖNORM	46
Figure 28 - Extrait du calcul de l'accélération de réponse (Hamm, Richter, & Winter, 2009)	48
Figure 29 - Classes de perception vibratoire selon (Toratti & Talja, 2006).....	49
Figure 30 - Photos des essais de perception vibratoire à partir de la vibration des tasses, verres et feuilles.....	49

Figure 31 - Critères limites selon document de référence (Toratti & Talja, 2006).....	50
Figure 32 - Coefficient k de la flèche limite en fonction de la portée du plancher.....	51
Figure 33 - Fréquence fondamentale et masse modale selon JRC.....	53
Figure 34 - Coefficient d'amortissement selon JRC.....	53
Figure 35 - Abaques 1% et 9% d'OS-RMS90.....	54
Figure 36 - Classes d'accessibilité selon JRC.....	54
Figure 37 - Représentation de plancher à deux-travées.....	55
Figure 38 - Poutre continue sur plusieurs appuis.....	56
Figure 39 - Deux premier mode propre de vibration d'une poutre à deux travées.....	57
Figure 40 - Plus-value de raideur due à l'addition des travées.....	57
Figure 41 - Coefficient de Fourier modélisant la marche (Nguyen, 2013).....	60
Figure 42 - Courbe de modélisation de la force d'une marche à 2 Hz.....	60
Figure 43 - Charges d'exploitation simplifiées.....	61
Figure 44 - Tableau Excel pour le calcul des planchers selon ÖNORM.....	61
Figure 45 - Propriétés 2D orthotrope sur GSA.....	62
Figure 46 - Propriétés 2D orthotrope sur ACORD-Bat.....	63
Figure 47 - Fonctionnalités disponibles sur ACORD.....	63
Figure 48 - Plancher sur deux appuis.....	64
Figure 49 - Fréquence fondamentale du plancher isostatique sur GSA.....	65
Figure 50 - Modes propre 2 et 3 du plancher isostatique sur GSA. A titre indicatif.....	65
Figure 51 - Plancher isostatique sur GSA soumis à une charge de 1 kN à mi-travée.....	65
Figure 52 - Accélération de réponse à la marche des usagers sur plancher isostatique.....	66
Figure 53 - Fréquence fondamentale du plancher isostatique sur ACORD.....	66
Figure 54 - Modes propre 2 et 3 du plancher isostatique sur ACORD. A titre indicatif.....	66
Figure 55 - Plancher isostatique sur ACORD soumis à une charge de 1 kN à mi-travée.....	67
Figure 56 - Plancher simplifié sur trois appuis à gauche.....	68
Figure 57 - Plancher simplifié sur trois appuis à droit.....	69
Figure 58 - Fréquence fondamentale du plancher sur GSA.....	69
Figure 59 - Modes propre 2 et 3 du plancher sur GSA. A titre indicatif.....	70
Figure 60 - Plancher sur GSA soumis à une charge de 1 kN à mi-travée de la plus large portée	70
Figure 61 - Plancher sur GSA soumis à une charge de 1 kN à mi-travée des autres deux portées	70

Figure 62 - Accélération de réponse à la marche des usagers.....	71
Figure 63 - Fréquence fondamentale du plancher sur Acord	71
Figure 64 - Modes propre 2 et 3 du plancher sur Acord. A titre indicatif.....	72
Figure 65 - Plancher sur Acord soumis à une charge de 1 kN à mi-travée de la plus large portée	72
Figure 66 - Classification du planchers selon JRC	73
Figure 67 - Schéma indicatif de trois panneaux couturés côte à côte	74
Figure 68 - Planchers couturés simplifiés sur trois appuis.....	75
Figure 69 - Modélisation sur GSA des panneaux côte à côte	75
Figure 70 - Fréquence fondamentale du panneau central sur GSA.....	76
Figure 71 - Panneau central sur GSA soumis à une charge de 1 kN à mi-travée de la plus	76
Figure 72 - Accélération de réponse à la marche des usagers du panneau central	76

Liste des abréviations

CLT - Le bois lamellé croisé (Cross Laminated Timber ou X-Lam en anglais) est un matériau de construction à base de bois, qui se présente sous la forme d'un panneau multicouche et constitué de couches de lamelles ou lames de bois collées entre elles. Chaque couche contient des lamelles disposées dans un seul sens. Les couches sont croisées à 90 degrés et collées entre elles afin d'augmenter la rigidité et la stabilité des panneaux dans toutes les directions.

BLC - Le bois lamellé-collé, aussi appelé plus simplement lamellé-collé ou bois lamellé, est un matériau qui s’obtient par collage de plusieurs lamelles en bois dont le fil est essentiellement parallèle.

IGH - L'immeuble de grande hauteur, appelé dans le langage commun tour ou gratte-ciel. En France, de façon réglementaire, un IGH est un bâtiment dont le plancher bas du dernier niveau est situé, par rapport au niveau du sol, à plus de 50 mètres pour les immeubles à usage d'habitation ou à plus de 28 mètres pour tous les autres immeubles.

JRC - *Joint research center*, le Centre commun de recherche (CCR en français) est le laboratoire de recherche scientifique et technique de l'Union européenne. Cette direction générale de la Commission européenne a comme but apporter les conseils scientifiques et le savoir-faire techniques nécessaires pour soutenir les orientations politiques choisies par l'Union.

EN - *European norms*, les Eurocodes sont les normes européennes de dimensionnement et de justification des structures de bâtiment et de génie civil.

AN - Les annexes nationales sont des documents de caractère normatif publiés par chaque pays ultérieurement à la diffusion de l’Eurocode afin de le compléter à niveau national.

ÖNORM - *Österreichische Norm*, l’annexe nationale autrichienne publiée par *Austrian Standards International*.

SFS - *Suomen Standardisoimisliitto SFS ry*, l'organisme central de normalisation en Finlande, correspondant à l’annexe nationale finlandaise.

Introduction

La construction en bois, et plus particulièrement en panneaux CLT, connaît en ce moment un développement spectaculaire en France sous l'impulsion des impératifs de réduction des émissions carbone et des labels environnementaux associés. Il faut néanmoins surmonter certains obstacles pour que la filière nationale atteigne un certain niveau de force, de fiabilité et d'autonomie.

Un des enjeux fréquemment rencontrés est la réduction du coût de la construction en bois, en comparaison avec une construction en béton. Le surcoût observé vis-à-vis d'une construction en béton est de l'ordre de 10% d'après les retours d'expérience récents. Ce chiffre est toutefois en baisse continue au fur et à mesure de la montée en puissance de la filière bois, ainsi que le savoir-faire des acteurs qui y interviennent.

C'est pourquoi il est intéressant de mener une étude d'optimisation des planchers. En sachant que la majorité du volume total de matériau de structure est mis en œuvre dans les planchers dans le cas d'un bâtiment classique, réduire l'épaisseur de ces planchers signifie réduire notablement les coûts, ce qui peut viabiliser et encourager de plus en plus le choix du bois comme matériau constructif.

Motivation et études préalables

1. Conception des planchers dans le cadre d’un projet IGH

La construction en bois de grande hauteur n’est pas un phénomène nouveau. Le Canada et les pays nordiques par exemple comptent une longue histoire de construction en bois de grande hauteur à partir d’éléments massifs en bois ou en brique atteignant jusqu’à neuf étages. Au début du 20^e siècle, l’utilisation du bois en structure diminue fortement, du fait du développement industriel des produits de construction acier et béton armé et des préoccupations croissantes en matière d’incendie et de développement durable. Cette tendance tend toutefois à se renverser. En effet, au cours des dernières décennies, le développement des produits et des processus de fabrications du bois d’ingénierie (bois lamellé-collé, CLT, lamibois etc.) a entraîné un renouveau important de la construction bois qui ouvrent maintenant la voie aux bâtiments bois de grande hauteur. Au début du 21^e siècle, des nombreux bâtiments innovants de 8 à 10 étages ont été érigés partout dans le monde, démontrant que le bois est une fois de plus un matériau de construction pratique pour les édifices en hauteur. (FPInnovations, 2014)

La conception des planchers est un point central du projet d’un immeuble de grand hauteur et ce pour diverses raisons, liées au programme, à l’économie du projet, et à l’empreinte environnementale de la construction :

- La hauteur des complexes de plancher est un point critique de la conception du projet, afin de respecter les hauteurs sous planchers, souvent contractuelles dans les baux et plans de vente.
- Les prix étant en général proportionnel au volume de bois, et les planchers représentant la plus grande part du volume de matière d’un bâtiment, il convient d’optimiser l’épaisseur des planchers.
- Limiter le volume de bois mis en œuvre, c’est aussi limiter l’impact environnemental du bâtiment.

Les planchers doivent respecter de nombreuses contraintes : porter les charges verticales, transférer les charges horizontales aux contreventement (rôle de diaphragme), respecter les limites de déformation, respecter les critères de confort vibratoire, empêcher la propagation d’un incendie, empêcher les transmissions acoustiques et permettre le passage des réseaux.

Il est notoire que le bois en tant que plancher structurel présente plusieurs inconvénients qui peuvent dimensionner la structure. Le plancher bois est souvent aujourd’hui plus cher que le

béton, plus souple, très sensible aux basses fréquences, combustible et sensible aux vibrations dû à la marche des usagers. Cependant une bonne conception de planchers bois permet de profiter au mieux des avantages du bois, tout en compensant ses inconvénients par des choix astucieux.

2. Compréhension du comportement mécanique du panneau CLT

L'utilisation des planchers CLT, généralement en tant qu'éléments bidimensionnels, a été très courante dans les structures d'ingénierie modernes en bois. Les éléments CLT représentent des panneaux multicouches constituées d'une succession de couches de panneaux collées et croisées, empilées perpendiculairement. La séquence d'empilement des couches dans le sens de l'épaisseur est généralement symétrique par rapport au plan médian de la plaque. Les panneaux de chaque couche sont généralement disposés côte à côte et peuvent être collés ensemble à chant. Les éléments CLT sont disponibles en 3 à 9 couches. Généralement des éléments à 3 et 5 couches sont utilisés pour les murs, des éléments à 5 et 7 couches pour les planchers et des éléments à 9 couches pour des applications spéciales à portance élevée. L'épaisseur de chaque couche se situe entre 6 et 45 mm et l'épaisseur du panneau peut atteindre 320 millimètres pour des portées jusqu'à environ 7 mètres. (Karacabeyli & Douglas, 2013)

La spécificité du CLT réside dans le fait que, contrairement au bois lamellé-collé classique, les plis successifs ont des orientations différentes (rotation de 90° d'un pli à l'autre) conférant un caractère bidimensionnel orthotrope au panneau.

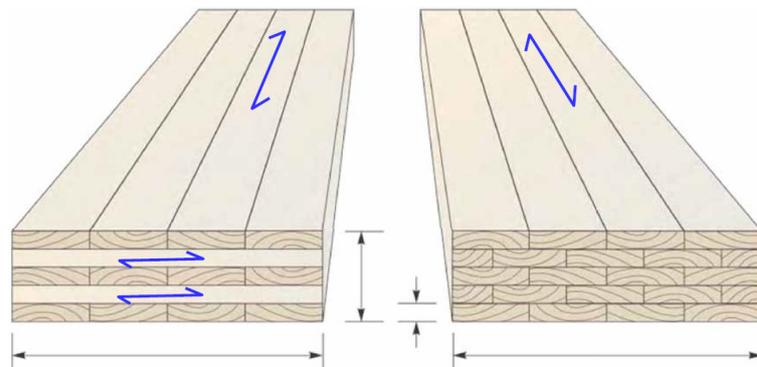


Figure 1 - CLT x BLC

L'un des enjeux des méthodes de calculs du CLT dans une configuration de plancher est la prise en compte du cisaillement roulant. Celui-ci correspond au cisaillement perpendiculaire à la fibre, qui a tendance à faire rouler les fibres les unes sur les autres, ce qu'illustre l'appellation de cisaillement « roulant ». Ce phénomène, sujet d'essais et d'études multiples, assouplit considérablement la section de panneau en flexion, d'où son importance lors d'un dimensionnement. (Fellmoser & Blass, 2004)

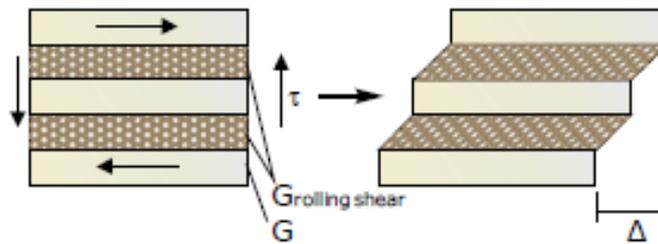


Figure 2 - Cisaillement roulant (Karacabeyli & Douglas, 2013)

L'autre enjeu en question pour le dimensionnement des planchers CLT est son comportement aux états limite et de service. D'un côté, le cisaillement roulant pilote la deflexion de la section en service, ce qui force le calcul d'une raideur équivalente que considère la fleche additionnelle. D'autre côté, les plis parallèles à la portée pilotent le calcul de la section résistant aux sollicitations. Le comportement des sections est illustré ci-dessous.

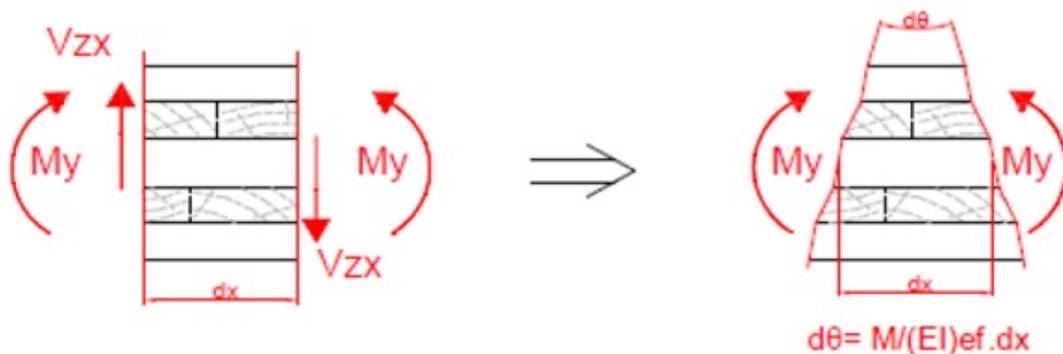


Figure 3 - Comportement de la section aux ELS

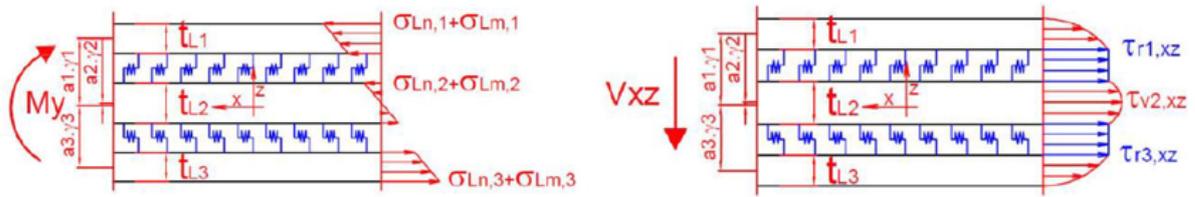


Figure 4 - Comportement de la section aux ELU

3. Optimisation épaisseur x portée

La conformation enchevêtrée du bois lamellé-collé améliore le comportement hors plan uniaxial. Horizontalement, les éléments en tant que panneaux sont principalement sollicités dans une direction uniaxiale. Dans certains cas, comme c'est le cas pour les panneaux appuyés sur les quatre cotés ou les porte-à-faux bilatéraux, la répartition de la charge peut être effectuée dans les deux sens, mais ce n'est pas le cas le plus souvent. Normalement, les plaques CLT sont ainsi posées sur deux appuis comme des poutres bi-appuyées et assemblés avec les plaques voisines. Notamment, la fonction épaisseur x portée pilote le dimensionnement des planchers

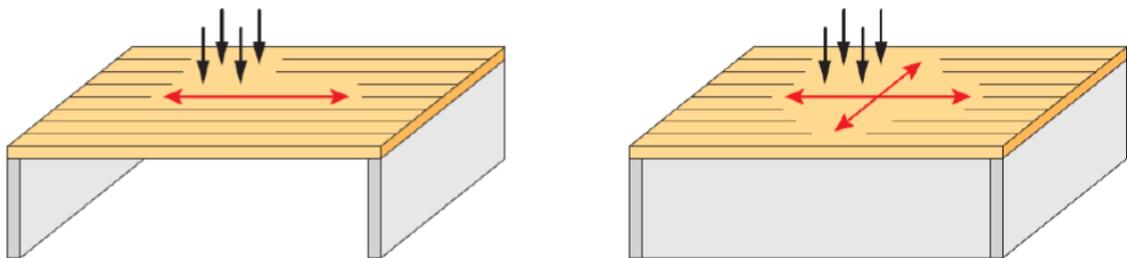


Figure 5 - Principe de sollicitation des panneaux CLT sur 2 et 4 appuis

Néanmoins, les plans de calepinage usuels des plans courants des bâtiments montrent qu'il est possible d'optimiser les épaisseurs à partir d'une conformation hyperstatique, en appuyant le plancher sur trois ou quatre (ou même plus) supports afin de créer un comportement de poutre en plusieurs travées. Cela entraîne une réduction des contraintes aux ELU et des flèches aux ELS, ce qui permet la réduction des épaisseurs pour une même portée.

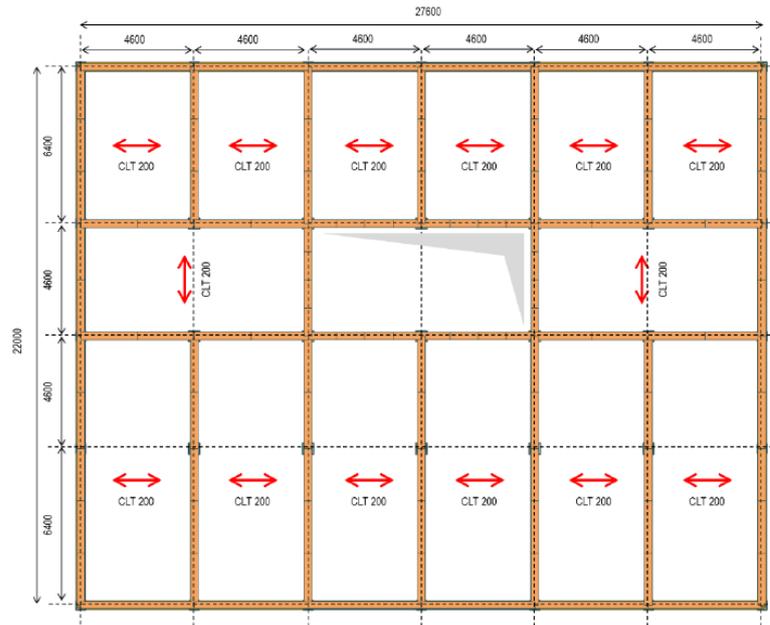


Figure 6 - Exemple de plan de calepinage des planchers CLT

4. Enjeux vis-à-vis de la vibration

La possibilité d'une charge anthropique entraînant des vibrations excessives des structures a été reconnue depuis longtemps. En 1831, des soldats marchant sur un pont en fonte ont généré des vibrations qui ont provoqué l'effondrement du pont, ce qui explique pourquoi certains ponts affichent maintenant des avis ordonnant aux soldats d'arrêter la marche rythmée lors de la traversée. Il y a eu d'autres effondrements de planchers et de structures de stades induits par des foules dansant ou sautant à l'unisson. (Arup, 2009)

L'introduction de la construction légère de longue portée en bois a fait craindre que la marche normale cause des vibrations inconfortables pour les occupants des immeubles. Jusqu'à ce moment-là, on s'assurait de l'aptitude au service des planchers à l'aide de critères simples fondés sur la raideur, tels que la limitation des déformations du plancher à un certain ratio de la portée ou vérifier que la fréquence propre était supérieure à une certaine limite.

Depuis de nombreuses années, les exigences en matière d'aptitude au service font partie intégrante de la conception structurale. Au début, il ne s'agissait que de limites de déformation pour éviter que les éléments de second-œuvre ne se fissurent et que les occupants du bâtiment ne remarquent pas l'affaissement des planchers. Celles-ci se sont avérées adaptées pendant des décennies, jusqu'à ce que des progrès commencent à être réalisés, avec des structures de plus en plus efficaces et légères et que les bureaux à *open space* plutôt que cloisonnés deviennent

plus courants. Malheureusement, les utilisateurs de certains de ces bâtiments ont fait part de sensation d'inconfort dues aux vibrations ressenties . (Arup, 2009)

Le premier remède proposé à ce problème a été de limiter la fréquence propre des poutres de plancher, car on pensait que si cette fréquence était maintenue au-dessus du pas de marche, la résonance ne devrait pas se produire. Dans le cas d'agencements de planchers simples, le fait que cette fréquence pouvait être obtenue par un simple calcul manuel a favorisé cette approche.

Toutefois, un certain nombre de problèmes sont apparus avec cette solution :

- Les planchers peuvent être excités et mis en résonance à des harmoniques plus élevées que la fréquence des pas d'un piéton.
- Si une portée plus faible conduit à une fréquence propre plus élevée, le plancher présente une masse plus faible, et donc plus faciles à exciter.

Ceci, combiné à la tendance moderne des étages de forme complexe qui complique le calepinage des panneaux CLT, les bureaux à aire ouverte et le stockage électronique plutôt que l'utilisation de bibliothèques et de classeurs (réduisant la masse et l'amortissement des planchers) a rendu le problème des vibrations plus difficile à évaluer et à résoudre.

Dans la réalité normative actuelle du marché européen, l'analyse bibliographique sur le confort vibratoire montre que certaines études ont abouti à la proposition de seuils de confort en termes de valeurs d'accélération ou de vitesse verticale du plancher en vibration, permettant d'élargir le domaine d'application de l'Eurocode 5 en termes de valeurs de fréquence et de catégorie d'usage du plancher.

5. Réduction de l'impact environnemental

Les labels environnementaux intégrant notamment la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), se généralise sur les projets de construction moderne, et deviennent des objectifs de conception à part entière pour le bon déroulement d'un projet. De ce point de vue, les planchers bois présentent plusieurs avantages par rapport à un plancher « traditionnel » en béton : moindre impact sur l'environnement, du fait notamment du stockage de carbone (1 m³ de bois représente environ 1 tonnes de CO₂ stocké), matériau bio-sourcé et renouvelable, structure légère et préfabrication permettant un chantier en filière sèche.

Le pole environnement chez Elioth a mené une étude en fin 2018 avec une analyse de cycle de vie et un bilan carbone de différents systèmes de planchers. Il s'agit d'une étude comparative qui prends en compte deux typologies à fonctionnalité égales en termes de performance structurelle, incendie et acoustique. La conclusion est que le plancher mixte bois-béton est

capable de réduire les émissions d'environ 28% par rapport au plancher CLT. Cela s'explique par la réduction du volume bois, une dalle béton réalisée e ciment CEMIII faible en émission, à la plus-value carbone due à l'encapsulage total des planchers CLT pour des questions d'incendie, et par la réduction du faux-plafond avec les solives bois visibles en sous-face. Bien entendu, un solution CLT conduit à un volume de CO2 stocké plus important.

L'étude repose sur le prédimensionnement d'un complexe de planchers typiques d'un espace de bureaux, de 6,5 mètres de portée. Cette étude précise l'importance d'étudier et de bien comprendre ces deux typologies de planchers, ainsi que tous les enjeux qui pilotent son dimensionnement structurel.

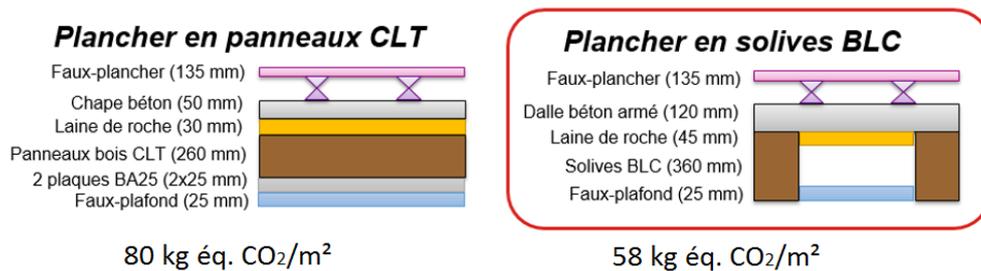


Figure 7 - Complexes plancher CLT et mixte et leurs respectifs valeurs d'empreinte carbone

Plancher CLT : outils et méthodes de calcul

1. Principe

En Europe, diverses méthodes ont été proposées pour déterminer les propriétés mécaniques du CLT. Cependant, jusqu'ici, aucune approche analytique n'a été universellement acceptée par les fabricants et concepteurs. Dans ce rapport trois approches sont présentées (Autret, Mariette, & Amosse, 2016), et permettent d'obtenir les propriétés équivalentes d'un élément 2D à une seule couche homogène :

- La Méthode Gamma
- La Méthode Analogie de cisaillement de Kreuzinger
- La Méthode Timoshenko

La théorie d'assemblage mécanique des poutres (méthode Gamma), notamment disponible en annexe de l'Eurocode 5 (NF EN 1995-1-1 annexe B), semble être l'approche analytique la plus commune en Europe. C'est en particulier la méthode préconisée dans divers avis techniques de fabricants, tels que KLH, STORA ENSO, et BinderHolz. Cette méthode ne considère pas l'apport direct des couches croisées dans la rigidité effective en flexion, mais seulement en cisaillement roulant à travers un coefficient γ appliqué à la rigidité en flexion des couches longitudinales.

Les méthodes Kreuzinger (fondée sur une analogie de cisaillement) et Timoshenko (approche additionnelle reposant sur la théorie des plaques et des coques) définissent de façon très similaire les propriétés de rigidité en flexion des panneaux CLT. Leur divergence se situe au niveau des propriétés de rigidité en cisaillement, pour lesquelles l'approche Timoshenko détermine un coefficient réducteur κ appliqué à la somme des rigidités individuelles des couches.

Une deuxième manière d'attaquer le calcul des panneaux est de se servir des logiciels qui ont déjà développé une bibliothèque spécifique pour le CLT, comme c'est le cas de ACORD-Bat et RFEM. Ces logiciels rassemblent un modèle de plaques à une partie *post-processing* qui permet d'obtenir à partir des résultats du modèle à couche équivalente, les efforts dans la section en prenant en compte le comportement multicouche du CLT.

Une dernière approche serait de déterminer une manière de modéliser un panneau de CLT dans un logiciel de calcul aux éléments finis de manière simplifiée comme des éléments 2D orthotropes. Pour cela il faut se baser sur le formalisme du logiciel employé pour proposer un

Ecole Nationale des Ponts et chaussées – Projet de fin d’Etudes
 matériau équivalent, homogène selon ses directions d’orthotropie, qui approche au mieux le comportement mécanique d’un panneau de CLT multicouche.

2. Méthodes de calcul

Dans cette section, les trois méthodes de calcul des panneaux CLT sont présentées (Autret, Mariette, & Amosse, 2016).

2.1. Méthode gamma

Selon la théorie des poutres assemblées mécaniquement, à l’origine développée pour les poutres en I ou en T liées à l’aide d’attaches mécaniques, la rigidité en flexion des éléments recomposés (poutres assemblées mécaniquement, panneaux CLT, etc) est définie par une rigidité effective EI_{eff} et par un facteur d’efficacité d’assemblage γ , utilisé pour prendre en compte le glissement des attaches ou ici dans le cas du CLT la déformation en cisaillement de la couche perpendiculaire des panneaux. Ce coefficient varie entre 0, qui signifie l’absence totale de lien, et 1, qui représente une liaison mécanique parfaite, dont se rapprochent les éléments structuraux encollés.

- Pour les panneaux CLT

$$\gamma = f\left(\frac{\bar{h}}{G_R b}\right)$$

Avec \bar{h} et b les dimensions de la couche concernée et G_R le module de cisaillement roulant.

- Pour les poutres assemblées mécaniquement, comme dans le cas des planchers mixtes bois-béton

$$\gamma = f\left(\frac{s}{K}\right)$$

Avec s l’espace entre les connecteurs et K leur raideur en cisaillement.

Seules les couches longitudinales, c’est-à-dire les couches qui agissent dans la direction de la charge, sont considérées pour calculer la rigidité de flexion EI_{eff} . La rigidité de cisaillement n’est quant à elle pas prise en compte dans les couches longitudinales du CLT, mais est incluse dans les couches croisées au travers du cisaillement roulant.

$$EI_{eff} = \sum_{i=1}^n (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2)$$

Avec,

$$I_i = \frac{bh_i^3}{12}; A_i = bh_i$$

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \left(\pi^2 \times \frac{E_i A_i}{l^2} \times \frac{\bar{h}}{G_R b} \right)}$$

Le terme a_i représente la distance entre le centre de masse de la couche i et le centre de masse du panneau comme montré ci-dessous.

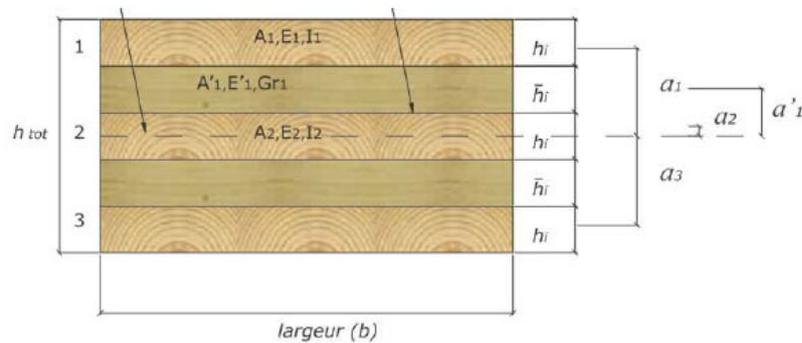


Figure 8 - Représentation du terme a_i

2.2. Analogie de cisaillement

Selon la documentation disponible (Thiel & Schickhofer, 2010), cette méthode de calcul permet d’obtenir des résultats plus précis. En effet, elle considère les différents modules d’élasticité et de cisaillement de chaque couche. Selon l’analogie de cisaillement, les caractéristiques d’une section multicouches croisées sont modélisés par deux poutres virtuelles, assemblées par des éléments de rigidité infinie, auxquelles sont respectivement appliqués la somme de la résistance inhérente de flexion des plis longitudinaux et croisés et la déformation due au cisaillement du panneau ainsi que la flexibilité de toutes les connexions. En combinant alors le moment de flexion et les forces de cisaillement des deux poutres, on obtient le résultat final pour la section totale croisée. (Karacabeyli & Douglas, 2013)

$$EI_{eff} = \sum_{i=1}^n (E_i I_i + E_i A_i z_i^2)$$

$$GA_{eff} = \frac{(h_{tot} - \frac{h_1}{2} - \frac{h_n}{2})^2}{\frac{h_1}{2bG_1} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{bG_i} + \frac{h_n}{2bG_n}}$$

Avec,

$$I_i = \frac{bh_i^3}{12} ; A_i = bh_i ; z_i = Z - (h_{tot} - a_i)$$

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n E_i A_i y_i}{\sum_{i=1}^n E_i A_i}$$

Le terme z représente la distance entre le centre de gravité de chaque pli i et l'axe neutre comme montré ci-dessous.

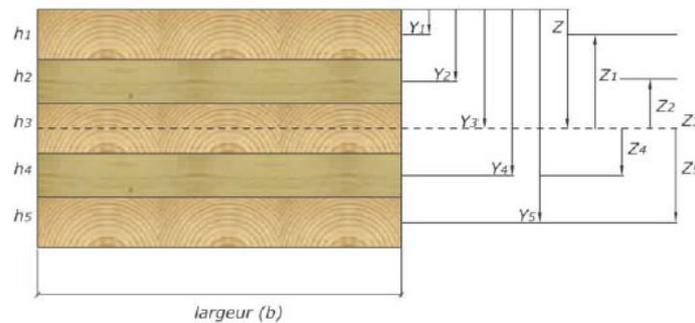


Figure 9 - Représentation du terme z

2.3. Timoshenko

La théorie de Timoshenko est basée sur les hypothèses suivantes : tout d'abord, contrairement à la théorie de Bernoulli, les sections droites ne restent pas perpendiculaires à l'axe neutre lors de la déformation de la poutre. Sous l'action de forces transversales et d'efforts de cisaillement induits, des déformations de cisaillement - contredisant l'hypothèse basée sur la théorie de Navier-Bernoulli – sont produites, menant à des divergences dans le calcul des contraintes et de la rigidité de cisaillement. Un facteur de cisaillement κ permet de corriger l'erreur dans le calcul des contraintes et de la rigidité de cisaillement, mais il faut préciser que le facteur est plus compliqué dans le cas du CLT qu'une poutre homogène classique, du fait d'une distribution des efforts de cisaillement plus complexe avec les plis croisés. La méthode de calcul de la contrainte de cisaillement dans la section est basée sur l'équilibre longitudinal local des contraintes de flexion et, en conséquence, est identique à celle utilisée envers la poutre de Bernoulli. Ce phénomène est aussi appelé contrainte de cisaillement secondaire.

Dans l'hypothèse d'une cohérence des différents plis, la rigidité de flexion peut être considérée comme étant la somme des rigidités de flexion prédominantes et des sections des points « Steiner » individuels. Il est nécessaire de prendre les déformations dus au cisaillement en considération dans le calcul du bois lamellé-croisé.

$$EI_{eff} = \sum_{i=1}^n (E_i I_i + E_i A_i a_i^2)$$

$$GA_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i A_i}{\kappa}$$

Avec,

$$I_i = \frac{bh_i^3}{12}; A_i = bh_i$$

$$\kappa = K_{10} + \frac{K_{14,4} - K_{10}}{4,4} \times \left(\frac{G_{//}}{G_R} - 10 \right)$$

number of layers #l	main load direction		
	κ_{10}	$\kappa_{13.8}$	$\kappa_{14.4}$
3	4,854	6,468	6,723
5	4,107	5,441	5,652
7	3,873	5,116	5,313

Figure 10 - Valeurs calculées de κ (Autret, Mariette, & Amosse, 2016)

3. Logiciels de calcul

Dans cette section, les logiciels utilisés par les bureaux d’études, Elioth y compris, sont présentés, en soulignant toujours les avantages et désavantages vis-à-vis du calcul des planchers ainsi que quelques remarques supplémentaires. Notamment, tous les logiciels sont basés sur la norme européenne (NF EN 1995-1-1, 2005) et l’annexe nationale autrichienne (ÖNORM B 1995-1-1, 2014).

Tout au long de cette section, les applications numériques détaillées sont basées sur la configuration et complexe de plancher utilisé pour le projet de la Tour Carmelha. Il s’agit d’un CLT 7s 240 et de 5 mètres de portée isostatique et 3 mètres de largeur, avec des sollicitations de 2,5 kN/m² comme charge permanente fragile et 1,5 kN/m² comme charge d’exploitation.

3.1. Bemessung KLH

Le logiciel Bemessung KLH est une feuille Excel programmée pour effectuer un calcul statique des panneaux CLT du fabricant KLH.

Avantages :

- Présente trois méthodes pour le calcul de la section carbonisée (performance incendie)
- Mène un calcul de performance vibratoire clair et consistant avec la norme autrichienne

Ecole Nationale des Ponts et chaussées – Projet de fin d’Etudes

- Permet le calcul sur plusieurs travées ou même en porte-à-faux

Désavantages :

- Ne permet pas de prendre en compte les propriétés mécaniques des CLT des autres fabricants
- Procédure complexe pour différencier la part de charges fragiles dans les charges permanentes
- Quelques bugs dus à la programmation sous Excel
- Note de calcul et rapport détaillé difficile à comprendre
- Calcule toujours la flèche sous sollicitation unitaire pour un cas isostatique bi-appuyé, même s’il y a plusieurs travées

Remarques :

- Permet aussi d’avoir un calcul des planchers nervurés CLT-BLC et des planchers caissons CLT-BLC-CLT.

systeme

travée	longueurs ℓ_i [m]	g 1,k [kN/m ²]	Charges surfaciques [kN/m ²] et ponctuelles				pos. x x [m]
			g 2,k [kN/m ²] G	n k [kN/m ²] NA	s k [kN/m ²] S2	w k [kN/m ²] W	
porte-à-faux Li							
travée 1	5,00	1,32	2,50	1,50			
travée 2							
travée 3							
travée 4							
travée 5							
travée 6							
travée 7							
porte-à-faux Re							
charges permanentes							
A: surfaces habitables							
site à moins de 1000 m d'altitude							
charges dues à l'action du vent							

KLH-Elément KLH 2018
Plancher KLH
type DL
élément 7s 240 DL
 pli extérieur perpendiculaire au sens de portée

couche i	épaisseur d _i [mm]	orientation °	matériau
1	30	0	KLH (C24)
2	40	90	KLH (C24)
3	30	0	KLH (C24)
4	40	90	KLH (C24)
5	30	0	KLH (C24)
6	40	90	KLH (C24)
7	30	0	KLH (C24)
8			
9			
d	240	7 s	KLH (C24)

résultats du calcul

déterminant	81 %
moment	25 %
force de cisaillement	14 %
courbure	
apparence	48 %
prévention des dégâts	81 %
vibration	DKL I
incendie /combustion	
moment	15 %
force de cisaillement	6 %

calculs des vibrations
classe de plancher (DKL) automatique

pris en compte oui

KLH seul ou avec un revêtement de sol léger (<= 50 kg/m²)

Figure 11 - Interface Bemessung KLH

3.2. Calculatis by Stora Enso

Le logiciel Calculatis est un logiciel de conception technique pour le CLT développé par le fabricant Stora Enso. Le logiciel est disponible en ligne et peut être utilisé via un navigateur web.

Avantages :

- Différencie bien la charge fragile de celle non-fragile
- Intègre plusieurs configurations statiques pour les appuis et les chargements
- Possibilité d'exporter une note de calcul bien détaillée et avec une mise en forme assez claire

Désavantages :

- Ne contient pas les caractéristiques mécaniques des autres fabricants
- La valeur par default pour les limites de flèche est fautive, tout comme le coefficient d'amortissement
- Ne prend pas en compte le cisaillement roulant dans le calcul de la raideur pour la vérification du confort
- Le calcul de la fréquence propre pour la vérification du confort n'intègre aucune part des charges d'exploitation (en général pour le calcul de la fréquence propre, 20% des charges d'exploitation s'exerçant sur les planchers est considéré pour le calcul de la masse)

Remarques :

- Permet d'évaluer des diverses typologies de plancher et de mur, en menant même un calcul éléments finis pour le déplacement des murs et des planchers fonctionnant en diaphragme.
- Permet aussi de calculer des poteaux et poutres, en bois ainsi qu'en acier.
- Offre un calcul assez complet des assemblages CLT, BLC et acier.

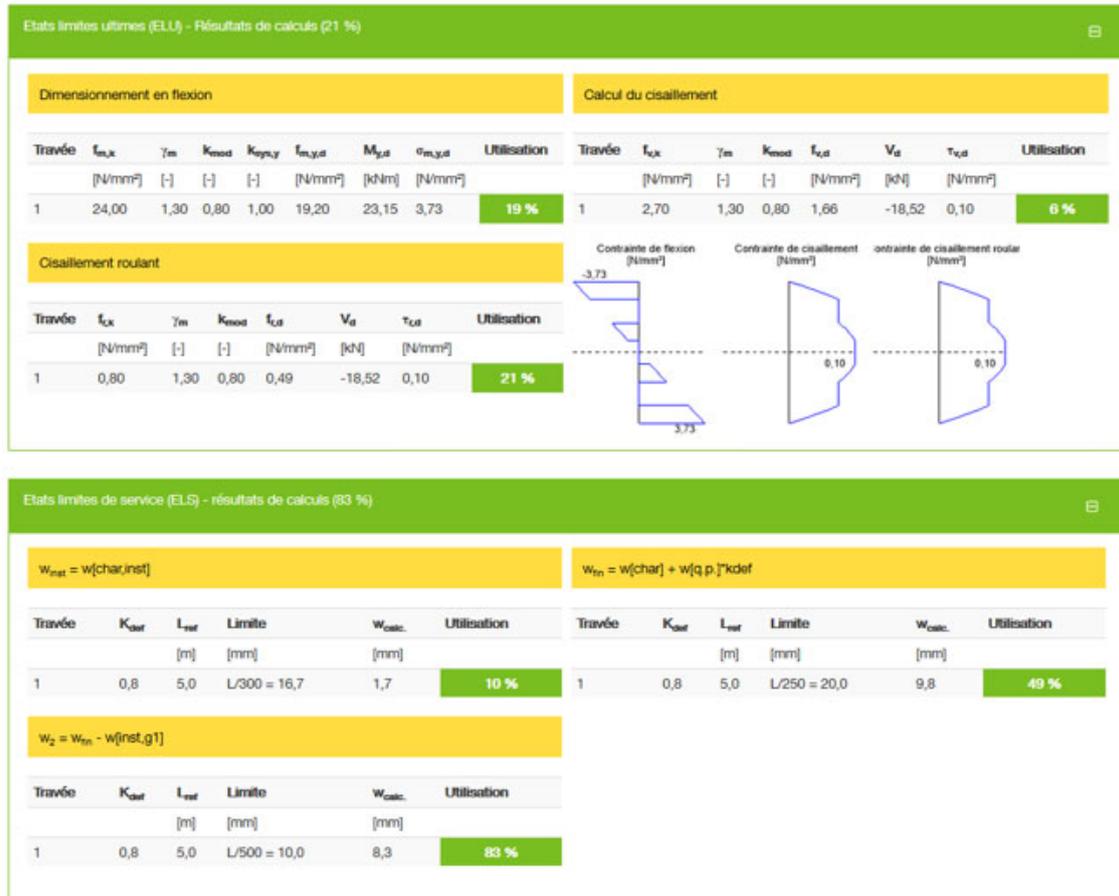


Figure 12 - Exemple de résultat sur Calculatis

3.3. CLTDesigner

Le CLTDesigner, organisé en modules comme les autres, est le logiciel développé par TU Graz, Université autrichienne responsable par une grande part des études notables et des progrès scientifiques concernant les panneaux CLT. Il s’agit d’une interface Java gratuite qui calcule des panneaux en et hors plan.

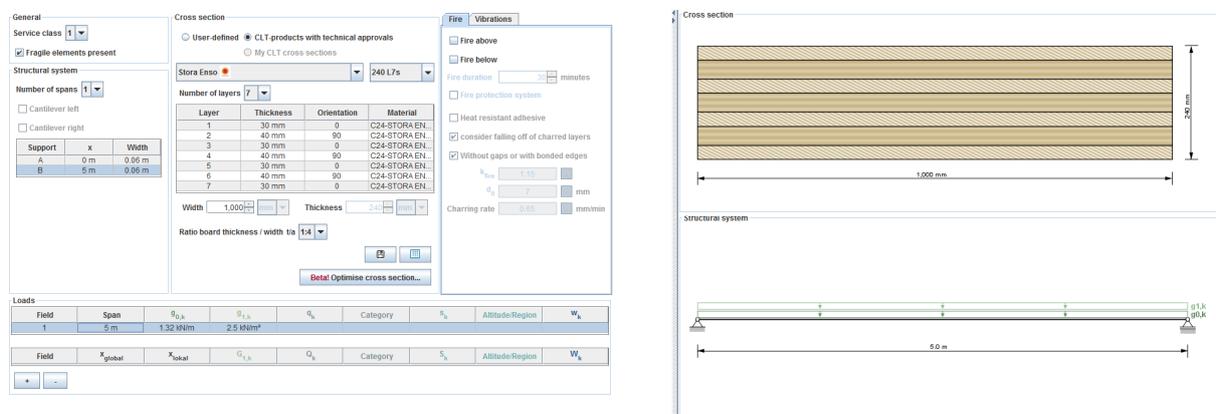


Figure 13 - Interface CLTDesigner

Avantages :

- Présente une base de donnée des panneaux de plusieurs fabricants
- Permet d'étudier les trois méthodes de calcul présentées dans la section précédente
- Mène le calcul de confort vibratoire selon plusieurs normes et annexes nationales
- Exporte un rapport de calcul clair et bien détaillé

Désavantages :

- Ne prend pas en compte les charges permanentes fragiles comme donnée d'entrée
- De fait, ne calcule pas la flèche nuisible

Remarques :

- Calcule aussi la matrice de raideur d'un panneau pour possiblement l'utiliser dans un logiciel élément finis
- Intègre le calcul de plancher nervuré CLT-BLC

4. Calcul par éléments finis

4.1. Modèle de plaque 2D orthotrope

Pour modéliser le comportement mécanique du CLT, qui est un matériau multicouche anisotrope, l'utilisation d'élément fini de type coque orthotrope permet d'approcher correctement ce comportement. L'utilisation de ce type d'élément nécessite de définir une matrice de raideur qui va piloter le comportement de l'élément dans l'ensemble des directions. Les éléments de cette matrice sont définis suivant le document de référence AdivBois (Autret, Mariette, & Amosse, 2016), et a déjà été implémenté chez Elioth suite à un ancien projet de fin d'études. (Puech, 2017)

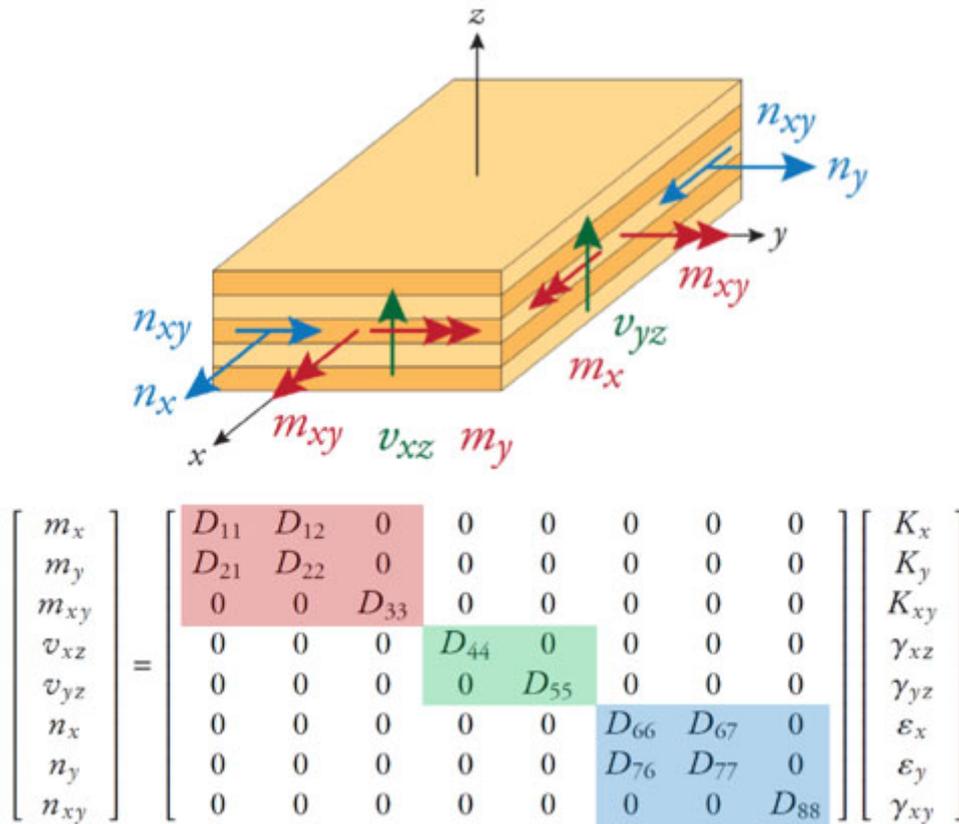


Figure 14 - Matrice de raideur de panneau CLT

La matrice de rigidité générale qui pilote le comportement d’une coque hors de son plan est donc défini de la manière suivante :

$$\begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_{xy} \\ v_{xz} \\ v_{yx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 & 0 & 0 \\ D_{21} & D_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_z \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix}$$

Dans le cas du CLT, la matrice étant diagonale seuls les coefficients D_{11} , D_{22} , D_{33} , D_{44} et D_{55} sont non nuls et peuvent être définis de la manière suivante :

$$D_{11} = E_x I = E_{0,mean} I_{1,eff}$$

Avec $I_{1,eff}$ inertie des plis parallèles au sens 1.

$$D_{22} = E_y I = E_{0,mean} I_{y,eff}$$

Avec $I_{2,eff}$ inertie des plis parallèles au sens 2.

$$D_{33} = G_{xy} A = G_{s,mean} A$$

$$\text{Avec } G_{s,mean} = \frac{G_{0,mean}}{1+6.p.\left(\frac{t_{max}}{150}\right)^{q+2}}$$

$$D_{44} = G_{zx} A = K(G_{0,mean} A_{1,eff} + G_{r,mean} A_{2,eff})$$

$$D_{55} = G_{yz}A = K(G_{0,mean}A_{2,eff} + G_{r,mean}A_{1,eff})$$

Avec $A_{1,eff}$ et $A_{2,eff}$ les aires des plis parallèles aux sens 1 et 2 respectivement.

Les valeurs de p et q sont définis suivant (Brandner & Dietsch, 2015).

No. of layers N [-]	p [-]	q [-]
3	0.53	-0.79
5	0.43	-0.79
7	0.39	-0.79

Figure 15 - p et q pour le calcul de matrice de raideur

K est coefficient de correction de la raideur en cisaillement calculé suivant le rapport Pro-Holz (Wallner-Novak, Koppelhuber, & Pock, 2014).

$$3s : 0,15 \leq K \leq 0,18$$

$$5s : 0,18 \leq K \leq 0,20$$

$$7s : 0,25 \leq K \leq 0,29$$

$$9s : 0,26 \leq K \leq 0,29$$

L’étude est définie dans le cadre de l’utilisation du logiciel GSA, développé par ARUP et employé couramment par Elioth, qui permet la modélisation d’éléments finis 1D et 2D. Ce logiciel propose l’utilisation de matériaux orthotropes, pour lesquelles doivent être définis 9 variables : un module d’Young E, un module de cisaillement G et un coefficient de Poisson ν dans chacune des 3 directions.

Dans le cas d’un élément « plaque » 2D orthotrope, les variables utilisées sont donc $E_x, E_y, E_z, G_{xy}, G_{yz}, G_{zx}$, ainsi que ν_{xy}, ν_{yz} , et ν_{zx} .

En outre, le module E_z transversal au panneau ne servira pas dans la suite de l’étude, correspondant à des compressions/tractions perpendiculaires à la fibre qui n’apparaissent pas dans le fonctionnement en plancher. E_z prendra donc la valeur du module d’Young transversal de l’essence de bois massif utilisé pour le panneau de CLT choisi. De même seul le coefficient de Poisson correspondant à des déformations dans le plan du panneau sera sollicité : ν_{yz} et ν_{zx} prendront la valeur du coefficient de Poisson du matériau bois utilisé. L’étude est donc limitée à déterminer $E_x, E_y, G_{xy}, G_{yz}, G_{zx}$ et ν_{xy} . (Puech, 2017)

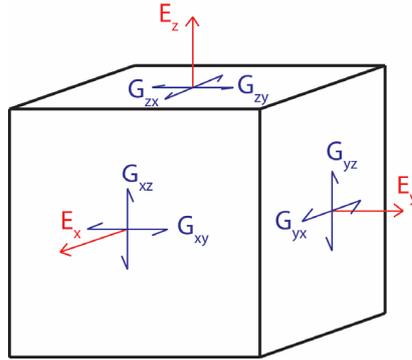


Figure 16 - Définition des données d'entrée sur GSA

$$E_x = E_{0,mean} \frac{I_{1,eff}}{I}$$

$$E_y = E_{0,mean} \frac{I_{2,eff}}{I}$$

$$G_{xy} = G_{0,mean} \frac{1}{1 + 6.p. \left(\frac{t_{max}}{150}\right)^{q+2}}$$

$$G_{zx} = \frac{K(G_{0,mean}A_{1,eff} + G_{r,mean}A_{2,eff})}{A}$$

$$G_{yz} = \frac{K(G_{0,mean}A_{2,eff} + G_{r,mean}A_{1,eff})}{A}$$

Il faut souligner que les flèches obtenues grâce au modèle GSA sont cohérentes avec celles du modèle mathématique, mais les contraintes ont besoin d'un traitement *post-processing* afin de remonter sur les contraintes et efforts dans chacune des couches. On voit ainsi qu'il faut corriger la valeur de la contrainte lue dans GSA par un facteur d'inertie efficace approprié selon la direction de flexion.

Dans le cas d'une section d'un plancher isotrope fléchié d'un moment M , les contraintes de flexion dans les fibres extrêmes à une hauteur v de l'axe neutre seraient données par :

$$\sigma_{m,GSA} = \frac{M}{I} \cdot v$$

En pratique, le niveau de contrainte à la côte y d'un panneau de CLT se base sur :

- Le module d'Young (axial ou transversal) du pli observé
- L'inertie efficace du panneau
- La méthode choisie pour modéliser le comportement du panneau en plancher

Dans la section de CLT fléchié on a une valeur de contrainte à la côté v dans la direction x :

$$\sigma_{m,x}(v) = \frac{E_i \cdot M_x}{(EI)_l} \cdot v$$

Les (EI) correspondent aux raideurs effectives en flexion, qui est calculé en prenant en compte seulement les plis au sens 1 parallèle à la portée.

En combinant la relation employée par GSA et celles pour le CLT :

$$\sigma_{m,x,d} = \frac{E_x I}{(EI)_l} \cdot \sigma_{m,x,GSA}$$

Ou bien,

$$\sigma_{m,x,d} = \frac{E_i \cdot M_{x,GSA}}{(EI)_l} \cdot v$$

Pour le cisaillement, le même raisonnement conduit à :

$$\tau_{GSA} = \frac{V}{A}$$

Tandis que :

$$\tau_{x,d} = \frac{V \cdot (ES)_l}{b \cdot (EI)_l}$$

Où les (ES) désignent les moments statiques pondérés des modules d’Young de la section de CLT obtenus comme étant :

$$(ES)_l = \sum E_i \cdot a_i \cdot A_i$$

Avec une sommation qui s’effectue sur les lamelles contenues dans la demi-section haute du panneau, en tenant compte de l’orientation des plis via le module axial du pli considéré.

D’où il vient :

$$\tau_{x,d} = \frac{A_{gross} \cdot (ES)_l}{b \cdot (EI)_l} \tau_{V,GSA}$$

Ou bien,

$$\tau_{x,d} = \frac{(ES)_l \cdot V_{GSA}}{b \cdot (EI)_l}$$

Là on voit qu’il faut corriger la valeur de la contrainte lue dans GSA par un facteur approprié. Il est à noter que sous GSA, les éléments 2D uniformément chargés présentent des sur-contraintes sur les bords du panneau. Seules les contraintes selon l’axe de symétrie du panneau seront utilisées pour la comparaison. (Puech, 2017)

4.2. ACORD-Bat3D

Le logiciel ACORD édité par la société Itech s'est enrichi d'un nouveau module CLT depuis fin d'année 2018. Il intègre le CLT, que ce soit dans un comportement de flexion (planchers) comme de diaphragme (murs).

Quelques fonctionnalités du calcul CLT sur ACORD sont listées ci-après.

- Élément fini composite anisotrope avec prise en compte du cisaillement roulant
- Bibliothèque éditable de l'ensemble des références des produits CLT du marché européen
- Définition des liaisons non linéaires entre plaques
- Assistants de calcul de la raideur de liaison (dans la zone de compression d'un mur sur une dalle CLT par exemple)
- Résultats de vérification réglementaire de chaque panneau détaillés (valeur de tous les critères de vérification et cas dimensionnant pour chacun d'entre eux)
- Résultats des efforts circulant dans les assemblages entre panneaux
- Descentes de charges sur la périphérie de chaque panneau
- Note de calcul détaillé (formules utilisées et applications numériques explicites)

ACORD, en termes de calcul de planchers dans le cadre d'un projet de bâtiment de grand hauteur, se montre comme la meilleur option d'interface et plateforme de modélisation en ce moment, puisqu'il intègre un calcul éléments finis assez complet des panneaux CLT au reste de l'ossature bois et nous permet d'étudier différents calepinages d'étage courant avec des configurations particulières. Cela offre ainsi la possibilité d'étudier le comportement des panneaux sur plusieurs travées, la mise en place des panneaux avec des formes plus complexes que les CLT rectangulaires standards, comme c'est le cas de la Tour Silva étudiée dans le prochain chapitre.

4.3. Modèle de plaque ACORD x GSA

Après la modélisation et comparaison de quelques planchers sur GSA et sur ACORD, une différenciation vis-à-vis de la forme de la déformé attire l'attention. Comme montré ci-dessous, sur GSA la zone critique en rouge se ressemble à la « selle d'un cheval », alors que ce n'est notamment pas la même allure de la déformé sur ACORD.

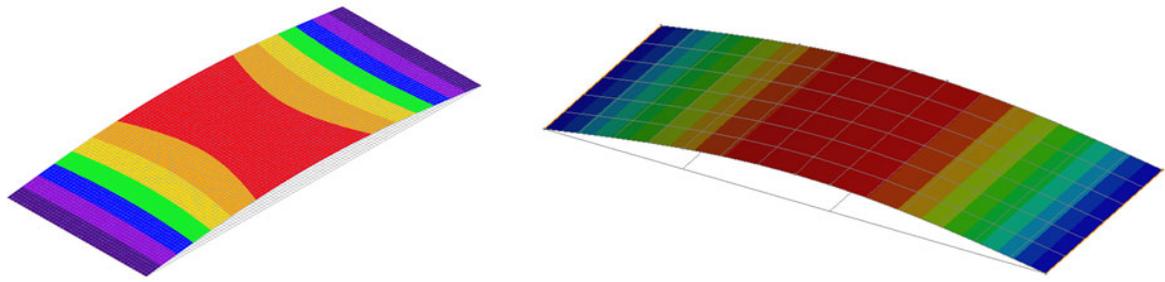


Figure 17 - Déformé $|u|$ GSA x ACORD

La situation des bords des plaques selon les deux modèles mène à soupçonner que chaque logiciel utilise une théorie de plaques différente. Cette possibilité a déjà été identifiée par des études au milieu du siècle passé (Mansfield & Kleeman, 1955), ce qui ne diminue pas la relevance et la consistance des deux logiciels.

Prenons l'exemple d'une plaque rectangulaire, fléchie en appliquant un moment sur les deux bords opposés : la prédiction de forme de la théorie de Kirchhoff est un paraboloid hyperbolique de courbure maximale k et de courbure minimale $-v.k$, avec des moments de flexion $M_\xi = D.k$ dans la direction maximale et $M_\eta = 0$ dans la direction minimale (avec $D=E.h^3/[12.(1-v^2)]$ la rigidité de plaque, E et v le module de Young et le coefficient de Poisson du matériau). La théorie inextensionnelle par contre prédit une forme cylindrique, avec $M_\xi = D.k$ dans la direction de courbure maximale, et $M_\eta = v.D.k$ dans la direction de courbure minimale. Ce moment M_η non nul est la force interne nécessaire pour maintenir la règle à plat au lieu de la courbure, rendant la forme développable au lieu de la double courbure.

Néanmoins, au bord latéral, la condition de bord libre impose $M_\eta = 0$. Ainsi le long du bord il doit y avoir une zone de transition où M_η évolue de $v.D.k$ à zéro. Le comportement de la plaque dans cette zone peut être décrit : localement, la plaque s'écarte très légèrement de la forme développable, induisant des forces d'étirement locales N_ξ . La plaque étant incurvée, les forces d'étirement N_ξ induisent une force hors plan sur le bord de la plaque, ce qui permet d'équilibrer la diminution du moment M_η . Des équations évaluant l'évolution des forces internes dans la couche limite ont déjà été étudiées, pour des plaques à bords droits ou courbes. Les forces internes de la couche limite peuvent entraîner une variation non négligeable des contraintes près du bord de la plaque. (Royer de Vericourt, 2011)

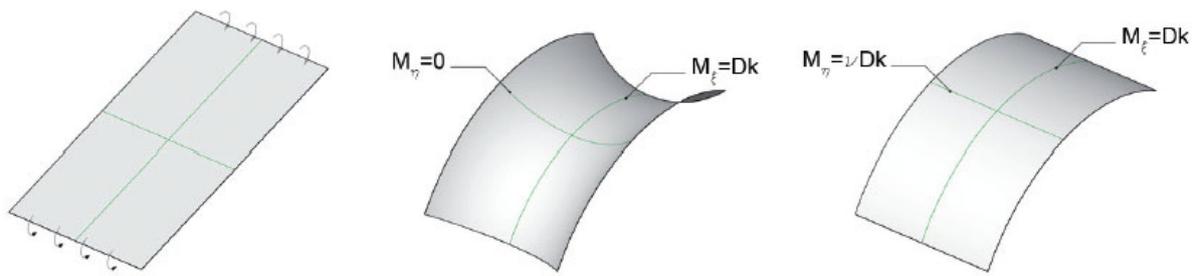


Figure 18 - Deux différentes théories de plaques pour une plaque fléchie

5. Etats limites

5.1. ELU

Un plancher doit respecter trois critères de limitation des contraintes :

- Contrainte de flexion sur les plis 0, en cote $y = \pm h/2$
- Contrainte de cisaillement des plis 0, en cote $y = 0$
- Contrainte de cisaillement niveau colle, normalement soit à la cote 0 soit en cote $y = \pm e/2$, avec e l'épaisseur du pli central

Au cours des études des calculs aux ELU, on voit que les contraintes n'entraînent presque jamais le calcul dimensionnant, sauf dans les cas très particulier où les charges d'exploitation trop élevés en comparaison avec les charges permanentes. Du contraire comme d'habitude, ce qui pilote le dimensionnement est l'état de service.

Dans la grande majorité des cas, les études montrent que la vérification des contraintes sous combinaisons ELU n'est pas le critère dimensionnant des planchers, sauf dans les cas très particuliers où les charges d'exploitation sont très élevées en comparaison avec les charges permanentes. Au contraire, ce qui pilote le dimensionnement est l'état de service.

5.2. ELS

Un plancher doit respecter trois critères de limitation des déformations :

- Flèche instantanée w_{inst}
- Flèche finale w_{fin} (compris fluage)
- Flèche active w_2 (ou flèche nuisible)

La flèche instantanée est généralement limitée à $L/300$. Pour un plancher bois, elle n’est pratiquement jamais dimensionnante car les autres critères sont presque toujours plus pénalisants.

La flèche finale est limitée à $L/200$ dans l’Eurocode, à $L/250$ dans les avis techniques des panneaux CLT. Certains fabricants recommandent de considérer $L/300$ ou $L/400$, sans préciser de raison physique ou empirique.

Le critère de flèche active, qui est le critère dimensionnant dans la plupart des cas étudiés, dépend des éléments de second œuvre supportés par le plancher et de la nature du plancher. La flèche finale peut être limitée indirectement par les contraintes de hauteur sous plafond du bailleur.

En première approche, les critères suivants et les combinaisons suivantes pour le calcul des flèches peuvent être retenus.

Tableau 1 - Critères de flèche aux ELS

Flèche	Combinaison	Critère
W_{inst}	Q	L / 300
W_{fin}	$(1+k_{def})(G_1 + G_2) + (1+\psi_2k_{def})Q$	L / 250
W_2	$k_{def}G_1 + (1+k_{def})G_2 + (1+\psi_2k_{def})Q$	varie

G_1 : Charges permanentes avant pose des éléments fragiles

G_2 : Charges permanentes après pose des éléments fragiles

Q : Charges permanentes après pose des éléments fragiles

La flèche active peut être limitée à :

- Min ($L/500$; $L/1000 + 5\text{mm}$) pour un sol fragile
- Min ($L/350$; $L/750 + 5\text{mm}$) pour un sol souple

De manière simplifiée on considère en général un sol rigide pour un logement ou un hôtel et un sol souple pour un bureau.

6. Etude comparative

Pour comparer les méthodes et tirer des conclusions vis-à-vis de leur efficacité et consistance, on a mené un calcul comparatif du plancher de la Tour Carmelha en partant de toutes les méthodologies présentées dans ce rapport et en analysant l’écart par rapport à la méthode Gamma. Les résultats sont compilés dans les tableaux ci-après.

Tableau 2 - Comparatif des méthodes aux ELU et ELS

CLT 240 L7s 5x3						
Méthodes de calcul	ELU			ELS		
	$\sigma_{m,y,d}$	$\tau_{v,d}$	$\tau_{r,d}$	W_{inst}	W_{fin}	W_{active}
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[mm]	[mm]	[mm]
Methode Gamma	3,73	0,10	0,10	1,6	9,3	7,9
Analogie de cisaillement				1,6	9,4	8,0
Timoshenko				1,6	9,4	8,0
KLH	3,73	0,10	0,10	1,6	9,5	8,1
Calculatis	3,73	0,10	0,10	1,7	9,8	8,3
CLTDesigner	3,73	0,10	-	1,6	9,5	-
GSA (2D Ortho)	3,87	0,10	0,10	1,7	10,1	8,6
ACORD-Bat3D	3,51	0,10	0,10	1,5	8,6	-

Tableau 3 - Comparatif des méthodes aux ELU et ELS en pourcentage

Méthodes de calcul	ELU			ELS		
	$\sigma_{m,y,d}$	$\tau_{v,d}$	$\tau_{r,d}$	W_{inst}	W_{fin}	W_{active}
Méthode Gamma	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Analogie de cisaillement				0%	1%	1%
Timoshenko				0%	1%	1%
KLH	0%	0%	0%	0%	2%	3%
Calculatis	0%	0%	0%	6%	5%	5%
CLTDesigner	0%	0%	-	0%	2%	-
GSA (2D Ortho)	4%	5%	5%	6%	9%	9%
ACORD-Bat3D	6%	0%	0%	6%	8%	-

Globalement, ces résultats montrent que les logiciels de calcul et les méthodologies présentés sont compatibles entre eux, avec des erreurs maximales d'environ 5% aux ELU et 9% aux ELS, ce qui est satisfaisant en termes de dimensionnement et conception des planchers. Donc, ce qui va piloter les choix de planchers – ainsi que l'optimisation de ces épaisseurs – dans le cadre d'un projet sont les critères de performance vibratoire, sujet qui sera largement traité dans le chapitre suivant.

En première approche comparative vis-à-vis du confort vibratoire, les méthodologies de calcul de fréquence propre, accélération, flèche à 1kN et vitesse, ainsi que l'influence d'une possible raideur transversal au cas où le plancher est appuyé sur les quatre coté, ont été étudiés afin de vérifier la compatibilité des différentes approches. Le tableau ci-après résume les résultats.

Tableau 4 - Comparatif des logiciels vis-à-vis la vibration

Vibration					
	Largeur	Fréquence	Accélération	Raideur	Vitesse
Calculatis	Pas de raideur transversale. Que le cas bi-appuyé	G	Hamm and Richter $\alpha = \exp(-0,4f_1)$	$W_{flexion}$ Pas de multi-travée	-
KLH	Effet de la largeur du plancher si 4 appuis (Hamm and Richter)	G + 0,7 kN/m ²	Hamm and Richter $\alpha = \exp(-0,4f_1)$	$W_{flexion} + W_{GA}$ Pas de multi-travée	-
CLTDesigner	Vérification selon EN 1995-1-1 Vérification selon NF EN 1995-1-1/NA:2010-05 Vérification selon DIN 1052 Vérification selon Hamm/Richter Vérification selon Hamm/Richter modifié				

Calculatis ne prend que la charge permanente en compte dans le calcul de la fréquence propre et ne considère pas le cisaillement roulant dans le critère de souplesse, et est le moins sécuritaire des logiciels. KLH par contre paraît être trop conservatif vu qu'il rajoute 70 kg/m² à la charge permanente. CLTDesigner mène un calcul assez complet, en tenant compte toutes les méthodologies connues et préconisées dans les normes étudiées, mais il n'est pas couramment utilisé comme logiciel de calcul puisqu'il ne contient pas le critère de flèche active. De plus, aucun des logiciels étudiés ne considère proprement le critère de raideur pour un plancher multi-travée, en calculant la flèche d'une poutre isostatique sur une portée correspondant à la plus large travée au lieu de considérer la poutre multi-travée elle-même, ce qui est une analyse simpliste et qui donne une marge d'optimisation.

A partir de cette comparaison initiale, il s'avère nécessaire de mener une étude comparative plus poussée qui vérifie les formules contenues dans les normes et annexes nationales - qui a conduit à l'élaboration d'une feuille de calcul - et l'analyse des méthodes alternatives capables de mener une justificative plus précise du confort vibratoire sous la marche des usagers.

Dynamique des planchers

1. Objectif

Comme il a déjà été évoqué au cours du chapitre précédent, l'analyse bibliographique sur le confort vibratoire mécanique montre que certaines études ont abouti à la proposition de seuils de confort en termes de valeurs d'accélération ou de vitesse verticale du plancher en vibration, permettant d'élargir le domaine d'application de l'Eurocode 5 en termes de valeurs de fréquence et de catégorie d'usage du plancher.

Les objectifs de cette deuxième partie du rapport sont ainsi :

- Faire un état de l'art sur les méthodes de calcul préconisées par les normes européennes et la littérature scientifique.
- Etudier des différentes méthodes de façon comparative.
- Analyser le potentiel d'optimisation des différentes méthodologies pour diminuer l'épaisseur des planchers CLT, ainsi que les paramètres qui pilotent cette vérification.
- Appliquer les méthodes sur les planchers de la Tour Silva à Bordeaux.
- Etudier la sensibilité des méthodes aux variables, notamment le couturage des panneaux, l'épaisseur et la charge permanente
- Contribuer au développement en cours des normes de calcul des planchers en CLT (intégration à venir dans l'Eurocode 5)

2. Descriptif des planchers de la Tour Silva

Dans le cas courant, les panneaux CLT sont continus et reposent sur 4 appuis (configuration hyperstatique) et couturés entre eux et avec les poutres. Les appuis sont réalisés par les poutres de rive en bois et les deux poutres centrales en acier. Etant donné la géométrie des plateaux, certains panneaux seront sur 3 appuis ou bien sur 2 appuis avec un appui parallèle au sens de la portée. Les appuis périphériques permettent d'empêcher le pianotage et le déplacement vertical différentiel. Ces cas particuliers renforcent la nécessité d'une étude spécifique.

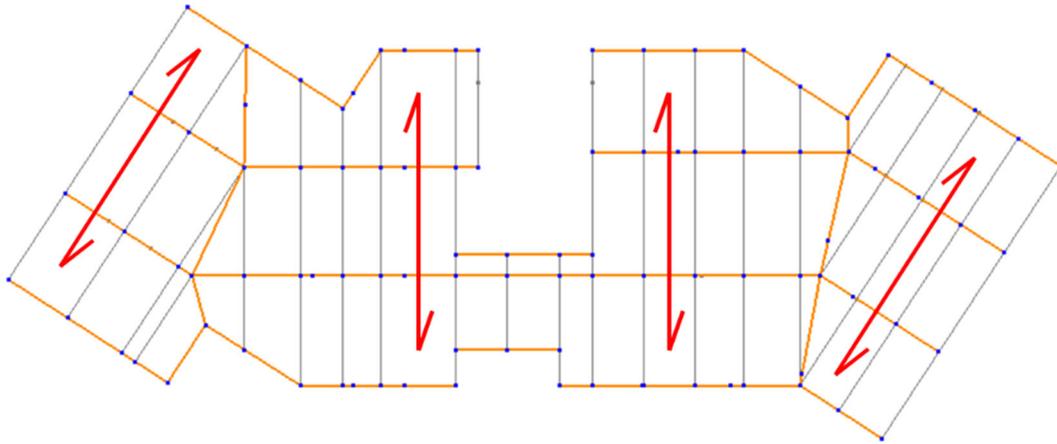


Figure 19 - Plan des planchers d'étage type

Après un dimensionnement aux ELU et ELS, le panneau CLT qui justifie les critères et optimise le plancher en termes d'épaisseur est le 200 L5s, montré ci-dessous.

Section: CLT 200 L5s				
	Couche	Epaisseur	Orientation	Matériau
	1	40,0 mm	0°	Epicéa C24
	2	40,0 mm	90°	Epicéa C24
	3	40,0 mm	0°	Epicéa C24
	4	40,0 mm	90°	Epicéa C24
	5	40,0 mm	0°	Epicéa C24
t_{CLT}	200,0 mm			

Figure 20 - Section CLT 200 L5s Stora Enso

Ci-dessous un récapitulatif des complexes acoustiques, complexes d'étanchéité, réseaux suspendus et cloisons considérés comme charge permanentes pour ce projet.

Revêtement de sol	40 daN/m ²
Chape fluide (ép. éq. 4,5 cm)	110 daN/m ²
Dalle d'isolation à plots et tubes plancher chauffant	20 daN/m ²
CLT 200 L5s	500 kg/m ³ = 100 daN/m ²
Isolant acoustique LR (5 cm)	5 daN/m ²
Panneaux Promatect 100 (2 x 20 mm)	40 daN/m ²
Structure secondaire faux-plafond et divers réseaux	35 daN/m ²
Cloisons	80 daN/m ²

Total 430 daN/m²

Ecole Nationale des Ponts et chaussées – Projet de fin d'Etudes

Les charges d'exploitation sont conformes à NF EN 1991-1-1-6 et indiquées ci-dessous :

Logements 150 daN/m²

Circulations étages, escaliers 250 daN/m²

De façon conservative, on s'intéresse à l'étude du panneau composant le plancher le plus critique en termes de confort vibratoire, notamment le plancher souligné ci-dessous.

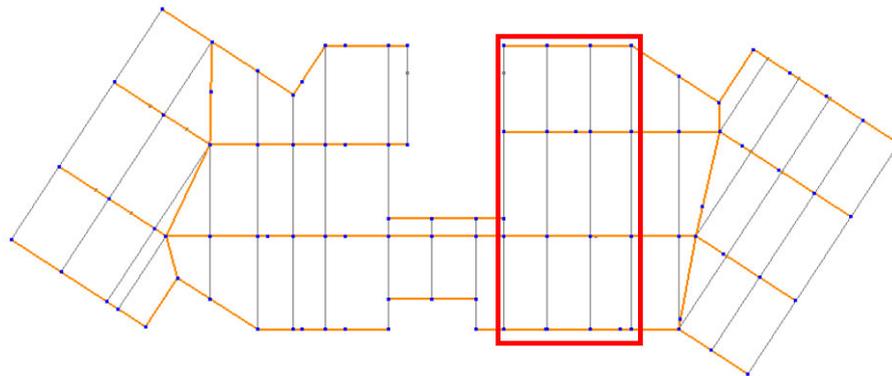


Figure 21 - Zone critique en termes de vibration

Le panneau ainsi que l'ensemble des charges appliquées sont modélisées sur ACORD-Bat. Une largeur de 2,4 m a été adoptée pour les panneaux de la zone critique.

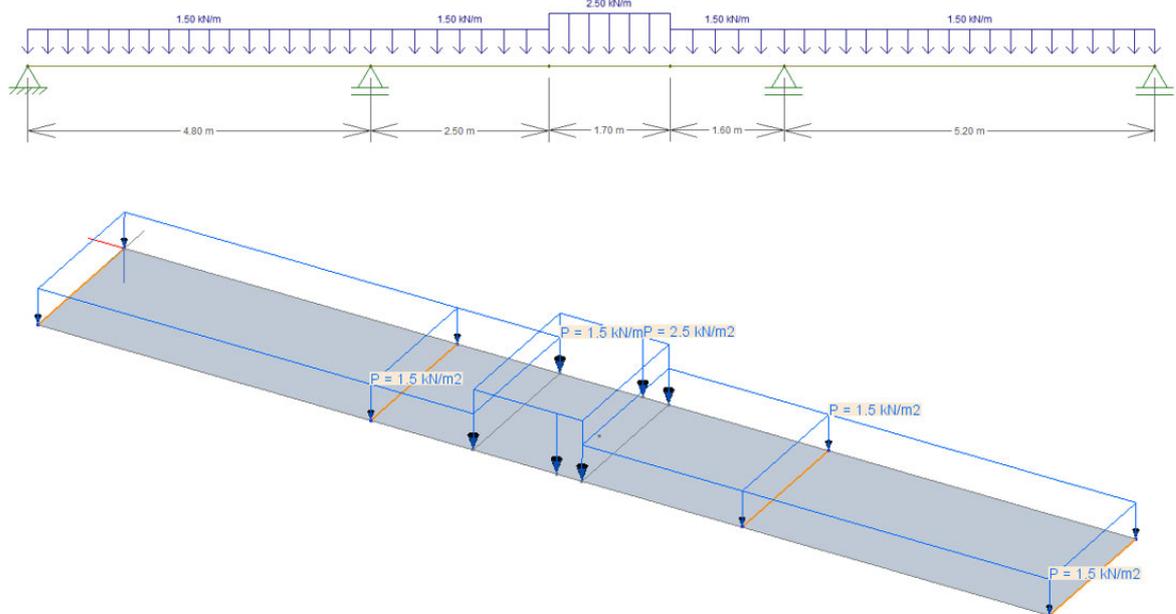


Figure 22 - Charges d'exploitation appliquées sur plancher critique

3. References

3.1. Eurocode 5

En ce qui concerne le confort vibratoire, selon l'Eurocode 5, les planchers en bois en général (les planchers CLT ne sont pas mentionnés particulièrement) soumis à la marche d'une personne doivent satisfaire les exigences aux états limites ultimes et de service dont ceux de vibrations, comme montré dans la section 7.3.3 de (NF EN 1995-1-1, 2005).

7.3.3 Planchers résidentiels

(1) Pour les planchers résidentiels avec une fréquence fondamentale inférieure à 8Hz ($f_1 \leq 8$ Hz), il convient de mener une étude spécifique.

(2) Pour les planchers résidentiels avec une fréquence fondamentale supérieure à 8 Hz ($f_1 > 8$ Hz), il convient de satisfaire les exigences suivantes :

$$\frac{w}{F} \leq a \quad \text{mm/kN} \quad \dots (7.3)$$

et :

$$v \leq b^{(f_1 \zeta - 1)} \quad \text{m/(Ns}^2) \quad \dots (7.4)$$

Figure 23 - Extrait de l'Eurocode concernant le critère de vibration

Où :

- w est la déformation instantanée maximale causée par une charge concentrée F appliquée en tout point du plancher, tenant compte de la redistribution de la charge au sein du plancher.
- ζ est le coefficient d'amortissement modal du plancher
- a et b sont limites établis par la norme et sont donnés par le graphique ci-après

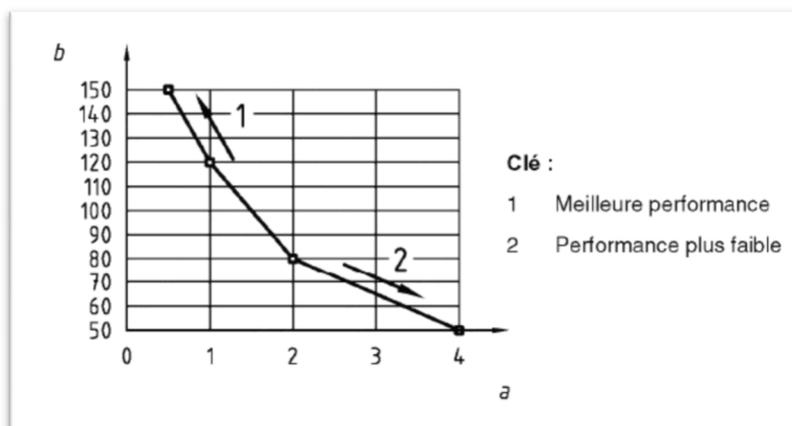


Figure 24 - Extrait d'Eurocode des valeurs et ratios recommandés pour a et b

La fréquence fondamentale d'un plancher rectangulaire appuyé sur les quatre côtés est définie par :

$$f_1 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}}$$

Où :

- m est la masse par unité de surface en kg/m^2
- l est la portée du plancher en m
- $(EI)_l$ est la rigidité équivalente en flexion de plaque du plancher selon un axe perpendiculaire à la direction des solives – ou axe fort – en Nm^2/m

La réponse en vitesse à une impulsion unitaire de ce même plancher est à son tour définie par :

$$v = \frac{4(0,4 + 0,6n_{40})}{mbl + 200}$$

Où :

- m est la masse par unité de surface en kg/m^2
- l est la portée du plancher en m
- b est la largeur du plancher en m
- n_{40} est le nombre de modes de première ordre avec des fréquences naturelles inférieures à 40 Hz, calculé selon :

$$n_{40} = \left\{ \left(\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \left(\frac{b}{l} \right)^4 \frac{(EI)_l}{(EI)_b} \right\}^{0,25}$$

$(EI)_b$ est la rigidité équivalente en flexion de plaque, en Nm^2/m , du plancher selon un axe parallèle aux solives – ou axe faible – où $(EI)_b < (EI)_l$.

L'Eurocode précise aussi qu'il convient de mener les calculs de fréquence propre, vitesse et souplesse en supposant que le plancher n'est pas chargé, c'est-à-dire en ne considérant que la masse qui correspond au poids propre du plancher et aux autres actions permanentes. A titre d'exemple, la bibliographie sur le dimensionnement des passerelles préconise la prise en compte de 20% de la charge d'exploitation dans le calcul de la fréquence propre.

La vérification de ces critères de vibrations pose différents problèmes quant à mise en application. Tout d'abord, les critères d'acceptabilité sont donnés uniquement pour des planchers résidentiels et dont la fréquence est supérieure à 8 Hz. D'autres critères pourraient être définis selon la catégorie d'usage du plancher et sa fréquence fondamentale.

D'autre part, il n'est fait aucune mention à la méthodologie de calcul à suivre dans le cas de plancher de fréquence propre inférieure à 8 Hz. Par exemple, il est envisageable de recourir à des modélisations aux éléments finis mais cette approche n'apparaît pas.

De plus, les grandeurs physiques utilisées pour ces critères d'acceptabilité sont définies de façon simpliste, ce qui réduit considérablement la mise en application de cette vérification. Par exemple, la détermination du fondamental ainsi que la vitesse sous impulsion unitaire n'est possible, via l'Eurocode, que pour des planchers rectangulaires simplement appuyés sur les quatre côtés. Ceci ne reflète pas les cas réels car les conditions aux limites peuvent être différentes, comme des planchers appuyés sur 3 ou, tel que c'est souvent le cas pour des panneaux CLT, 2 côtés.

3.2. Annexe Nationale Autrichienne (ÖNORM)

Sur la base des travaux menés à partir d'essais sur des planchers bois et du CLT principalement avec une chape lourde (Hamm, Richter, & Winter, 2009), l'annexe autrichienne (ÖNORM B 1995-1-1, 2014) propose les classes suivantes avec les exigences associées (Faye, Guigou, & Coguenanff, 2017) :

Classe I :

- Planchers séparatifs de logements ou de bureaux ou salles de réunion
- Planchers à solives avec chape flottante humide et ajout de masse
- Planchers massifs (CLT y compris) avec chape flottante humide ou sèche et ajout de masse

La fréquence fondamentale doit être supérieure à 8 Hz et la flèche inférieure à 0,25 mm. Si le critère de souplesse est vérifié, mais le critère de fréquence fondamentale ne l'est pas ou vice versa, on procède à la vérification complémentaire suivante concernant l'accélération.

$$a_{rms} \leq 0,05 \text{ m/s}^2$$

Classe II :

- Planchers au sein du même logement, utilisation usuelle
- Planchers à solives avec chape flottante humide ou sèche et ajout de masse
- Planchers massifs (CLT y compris) avec chape flottante humide ou sèche et ajout de masse

La fréquence fondamentale doit être supérieure à 6 Hz et la flèche inférieure à 0,50 mm. Comme pour la classe I, si au moins un des deux critères n'est pas satisfait, le critère vibratoire ne l'est pas et on procède à la vérification de l'accélération.

$$a_{rms} \leq 0,10 \text{ m/s}^2$$

Classe III :

Planchers sans exigence vis-à-vis de ce critère ou planchers sous locaux non-habités

Les classes et les critères, ainsi que les mode d'utilisations recommandés, sont montrés ci-dessous.

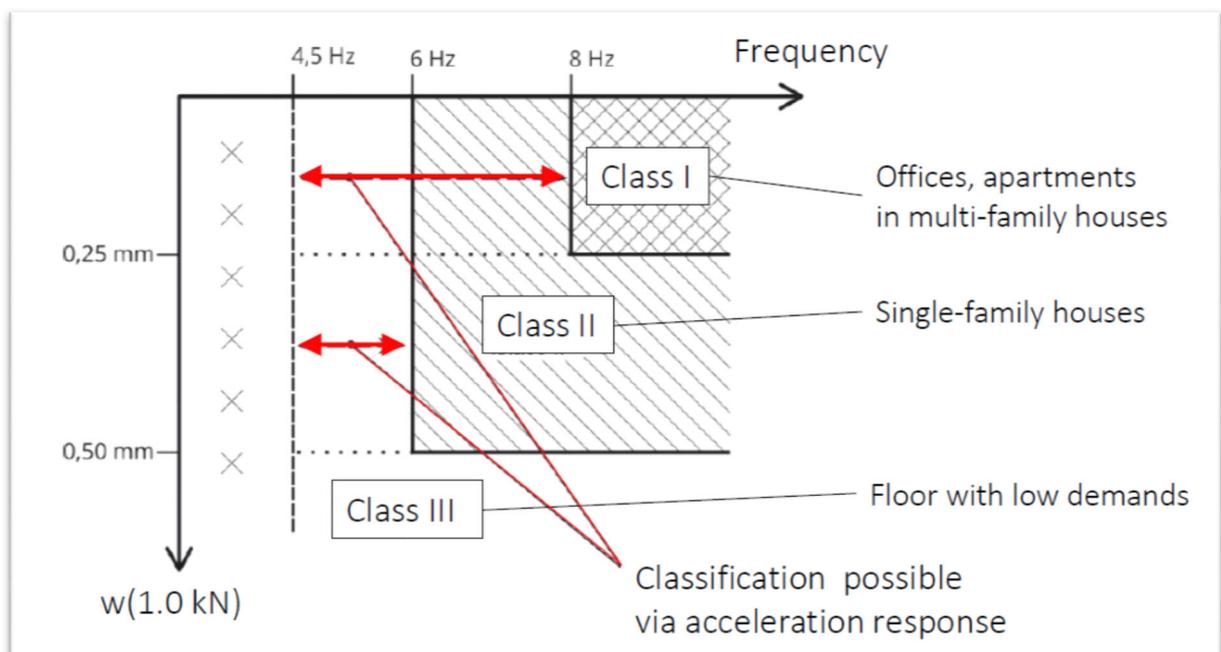


Figure 25 - Performance vibratoire selon ÖNORM

Vis-à-vis du calcul de fréquence fondamentale, cette annexe nationale introduit la prise en compte de la raideur transversal $(EI)_b$, en se limitant aux planchers articulés sur les quatre bords.

Pour les planchers sans la prise en compte de la raideur transversal

$$f_1 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}}$$

Pour les planchers avec la prise en compte de la raideur transversal

$$f_1 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{l}{b}\right)^4 \cdot \frac{(EI)_b}{(EI)_l}}$$

Bien que ce ne soit pas précisé de façon explicite dans le document, la prise en compte de la raideur transversale semble différencier le cas bi-appuyé de celui avec appuis périphériques. Ceci est décrit dans l’étude base de cette AN. (Hamm, Richter, & Winter, 2009)

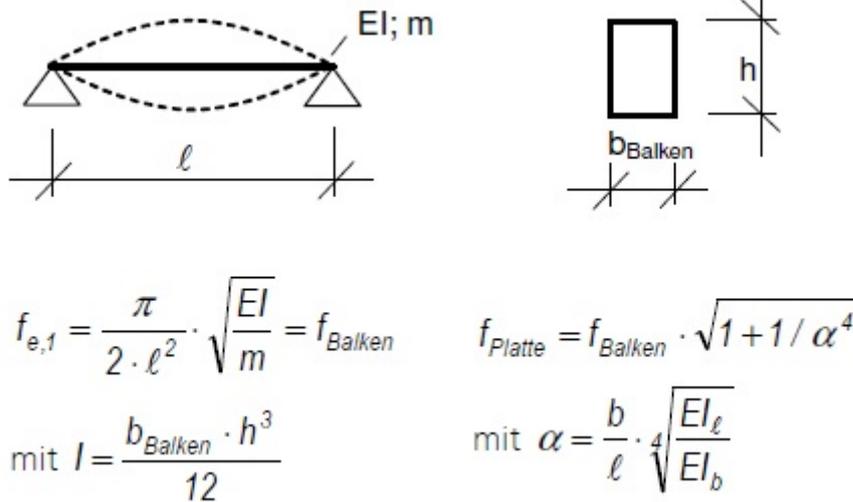


Figure 26 - Extrait du calcul de la fréquence propre (Hamm, Richter, & Winter, 2009)

La norme autrichienne introduit aussi un facteur multiplicatif pour le cas d’un plancher à deux travées, où la fréquence propre peut être déterminée par les formules précédentes multipliées par un coefficient dépendant du ratio entre les deux portées, selon le tableau ci-dessous.

l_2/l	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
$k_{e,2}$	1,000	1,090	1,157	1,206	1,245	1,282	1,318	1,359	1,410	1,474	1,562

Figure 27 - Coefficient pour la fréquence propre de plancher à deux travées selon ÖNORM

Où,

- l est la travée avec la plus grande portée
- l_2 est la travée avec la moins grande portée
- les valeurs intermédiaires peuvent être interpolés linéairement

Vis-à-vis du calcul de déformation sous charge unitaire, cette AN introduit :

- Une formule pour la déformation, qui correspond à la flèche d’une poutre bi-appuyée soumise à une charge unitaire à mi-portée.

$$w_{1kN} = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot (EI)_l \cdot b_F}$$

- Une largeur effective b_F (pour les cas où la raideur transversal est prise en compte) déterminée comme suit :

$$b_F = \min \left\{ \frac{b}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{(EI)_b}{(EI)_l}} \right.$$

Dans cette méthode, on peut souligner le fait que la formule de la déformation ne prend pas en compte le cisaillement roulant, puisqu'elle utilise la raideur des plis longitudinaux $(EI)_l$ au lieu de la raideur efficace $(EI)_{eff}$ à partir de la méthode Gamma décrite dans l'Eurocode. Pour l'étude comparative, on va considérer l'effet du cisaillement roulant des plis transversaux, ce qui augmente la flèche et place donc du côté de la sécurité.

Vis-à-vis du calcul de l'accélération de réponse impulsionnelle cette AN précise des coefficients d'amortissement modal ζ pour diverses configurations de plancher :

- $\zeta = 1\%$ plancher léger sans chape flottante ou avec chape légère
- $\zeta = 2\%$ plancher avec chape flottante
- $\zeta = 2,5\%$ plancher CLT sans chape flottante ou avec chape légère
- $\zeta = 3\%$ plancher CLT ou massif cloué avec chape flottante
- $\zeta = 4\%$ plancher CLT avec chape flottante et ajout de masse

L'accélération est ainsi déterminée comme suit :

$$a_{rms} = \frac{0,4 \cdot \alpha \cdot F_0}{2 \cdot \zeta \cdot M^*}$$

Où,

- α est le coefficient de Fourier en fonction de la première fréquence propre, avec $\alpha = e^{-0,4 \cdot f_1}$
- F_0 est la force correspondant au poids d'une ^personne marchant sur le plancher en question, normalement considérée comme 700 N
- ζ est le coefficient d'amortissement modal, comme montré précédemment
- M^* est la masse modale, donnée par :

$$M^* = m \cdot \frac{l}{2} \cdot b_F$$

- où m est la masse linéique

L'annexe nationale autrichienne précise que cette formule est utilisée dans les cas d'un plancher sur quatre appuis. Cependant, les logiciels de calcul de panneaux CLT (Calculatis, Bemessung KLH...) s'en servent pour les planchers bi-appuyés, en s'agissant d'une faute de méthodologie de calcul développée à ce sujet. L'étude allemande qui a inspiré l'approche de l'ÖNORM présente par contre une méthode alternative pour les planchers lourds (comme les planchers mixte bois-béton ou les planchers en large portée) dans les cas où la fréquence propre se situe dans la plage de diffusion de la deuxième ou de la troisième harmonique, à portée uniaxiale ou biaxiale.

$$a \left[\frac{m}{s^2} \right] = \frac{F_{dyn}}{M \cdot 2D} = \frac{0,4 \cdot F(t) [N]}{m [kg/m^2] \cdot 0,5\ell [m] \cdot 0,5b [m] \cdot 2D}$$

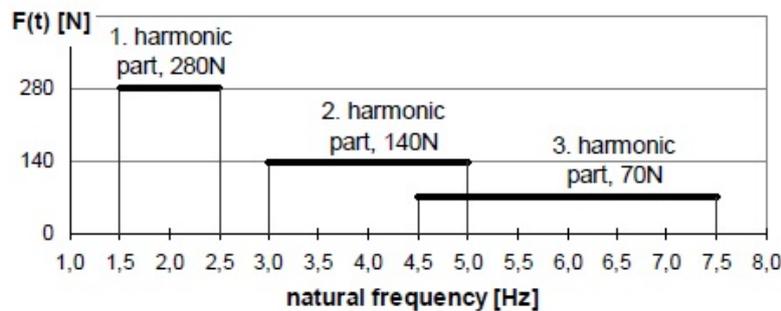


Figure 28 - Extrait du calcul de l'accélération de réponse (Hamm, Richter, & Winter, 2009)

3.3. Annexe Nationale Finlandaise (SFS)

Des travaux finlandais publiés en 2006 (Toratti & Talja, 2006) proposent cinq classes de confort vibratoire de planchers. Ces travaux ont servi de point de départ aux dispositions de l'Annexe Nationale finlandaise de l'Eurocode 5 (SFS-EN 1995-1-1) et ont proposé une pré-classification en fonction de la fréquence et une classification des ouvrages selon le niveau de sensibilité souhaité, comme montré ci-dessous.

Body perception	Vibration of articles
A The vibrations are usually imperceptible.	The clinking of glassware and the leaf movements of a plant are usually imperceptible.
B The vibrations are barely perceptible.	The clinking of glassware is usually imperceptible and the leaf movements are barely perceptible.
C The vibrations are perceptible. Base class	The clinking of glassware is barely perceptible. The leaf movements perceptible
D The vibrations are clearly perceptible.	The clinking of glassware the leaf movements are clearly perceptible.
E The vibrations are strongly perceptible.	The clinking of glassware and the leaf movements of a plant are strongly perceptible

Figure 29 - Classes de perception vibratoire selon (Toratti & Talja, 2006)



Figure 30 - Photos des essais de perception vibratoire à partir de la vibration des tasses, verres et feuilles

Il est proposé de classer les planchers selon leur fréquence fondamentale, et si elles sont inférieures, supérieures ou égales à 10 Hz. A cet effet, une équation de fréquence fondamentale tenant compte la rigidité transversale est proposée en complément de l’équation de l’EN 1995-1-1.

Ci-après, en accord avec le tableau ci-dessus, une classification des ouvrages est proposée :

- Classe A : exigence très élevée au sein du même logement ; exigence normale entre logements contigus
- Classe B : exigence élevée au sein du même logement ; exigence basse entre logements contigus
- Classe C : exigence normale au sein du même logement – classe de référence
- Classe D : exigence basse au sein du même logement
- Classe E : aucune exigence

Selon le document de base, d’un côté, pour les planchers de fréquence inférieure à 10 Hz, les critères portent sur l’accélération, mais le même document ne mentionne pas de règles simplifiées pour la détermination des valeurs d’accélération. D’autre côté, pour les planchers de fréquence supérieure à 10 Hz, les exigences relatives aux flèches sont très sévères et portent sur la vitesse et sur la déformation maximale.

Les critères limites sont proposés sur la base de cette classification pour différentes vérifications, comme montré ci-dessous (Kupferle, 2016) :

Emphasized for low-frequency floors		Emphasized for high-frequency floors				
Class	Vibration values				Deflection values	
	a_{rms} [m/s ²]	v_{max} [mm/s]	v_{rms} [mm/s]	$ u_{max} $ [mm]	Global deflection ^{a)} δ_θ [mm/kN]	Local deflection ^{b)} δ_l [mm/kN]
A	≤0.03	≤4	≤0.3	≤0.05	≤0.12	≤0.12
B	≤0.05	≤6	≤0.6	≤0.1	≤0.25	≤0.25
C	≤0.075	≤8	≤1.0	≤0.2	≤0.5	≤0.5
D	≤0.12	≤10	≤1.5	≤0.4	≤1.0	≤1.0
E	>0.12	>10	>1.5	>0.4	>1.0	>1.0

Figure 31 - Critères limites selon document de référence (Toratti & Talja, 2006)

Finalement, cette classification n’a pas été reprise dans l’AN, et certains critères proposés ont été amendés. L’annexe nationale finlandaise précise que le critère vibratoire doit s’appliquer également aux bureaux, commerces, ou locaux de rassemblement du public (catégories d’usage A, B, C, D).

Vis-à-vis du calcul de fréquence fondamentale, cette AN fixe une limite plus sévère que celle de l’EN 1995-1-1. En revanche, elle l’est moins que dans sa version initiale :

- $f_1 \geq 9 \text{ Hz}$; les planchers n'y satisfaisant pas devant faire l'objet d'une analyse spécifique

Au-delà de ce critère, l'AN considère que l'équation de l'EN 1995-1-1 s'applique au cas d'un plancher appuyé sur 2 côtés et introduit une équation de calcul de la fréquence fondamentale pour d'un plancher appuyé sur 4 côtés qui tient compte de la rigidité transversale (à noter les similarités avec celle de l'AN Autrichienne).

$$f_1 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \cdot \sqrt{1 + \left[2 \left(\frac{l}{b} \right)^2 + \left(\frac{l}{b} \right)^4 \right] \cdot \frac{(EI)_b}{(EI)_l}}$$

Vis-à-vis du calcul de déformation sous charge unitaire, cette AN introduit deux équations pour le calcul de la déformation sous charge unitaire prenant en compte de manière différenciée la largeur effective :

$$w_{1kN} = \frac{F \cdot L^2}{42 \cdot (EI)_l \cdot k_\delta}$$

Où,

$$k_\delta = \min \left\{ \frac{B}{L}; \sqrt[4]{\frac{(EI)_b}{(EI)_l}} \right\}$$

De plus, pour le limite du critère de souplesse, l'AN définit une valeur stricte de flèche maximale, qui augmente pour les planchers de petite dimension, correspondant aux planchers dont la dimension la plus grande n'excède pas 6,00 m :

$$w_{lim} = k \cdot 0,5 \text{ mm/kN}$$

Où k se lit du graphique ci-dessous en fonction de la plus grande dimension du plancher (la portée pour le plancher bi-appuyé).

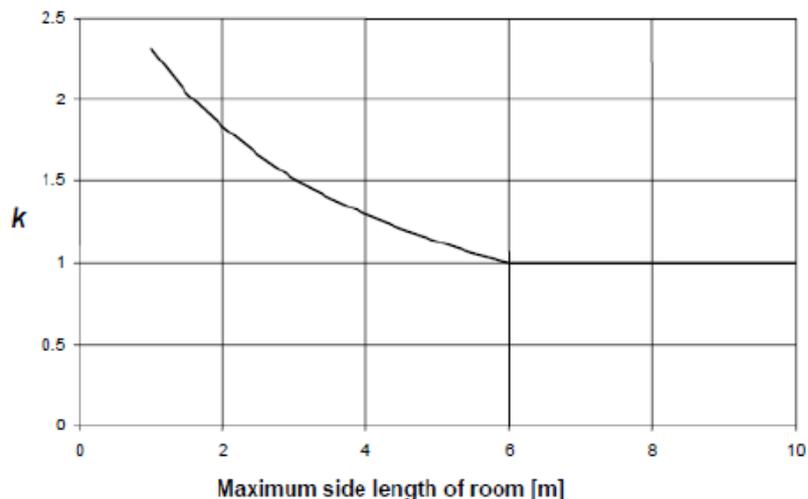


Figure 32 - Coefficient k de la flèche limite en fonction de la portée du plancher
Francisco Raul Lobo Rodrigues – Département Génie Civil et Construction

Cette AN n'apporte aucun complément vis-à-vis du calcul de vitesse et d'accélération de réponse impulsionnelle.

3.4. JRC – Méthode OS-RMS₉₀

Le rapport technique du Joint Research Center (JRC European commission, 2009) de la Commission Européenne et un guide de contrôle vibratoire des planchers en structure métalliques (HIVOSS - Human induced Vibrations of Steel Structures), co-publié par plusieurs organismes, présente une approche intéressante de classification des ouvrages et de vérification, développée pour potentiellement être inclus dans la révision de l'Eurocode 3.

Cette méthode utilise comme paramètre d'évaluation final l'OS-RMS₉₀ : l'accélération *one step – root mean square*, ou valeur efficace de la vitesse (verticale) sous l'effet de la marche d'une personne couvrant 90% des personnes marchant normalement sous pas unique (*one step*).

La procédure de dimensionnement décrite dans ce guide est une procédure simplifiée à trois pas qui sert pour la vérification d'un projet de plancher vis-à-vis de vibrations sous l'action des usagers :

1. D'abord, on détermine les caractéristiques du plancher de base.
 - fréquence propre : le guide donne plusieurs équations et abaques couvrant les cas usuels.
 - masse modale : le guide donne plusieurs équations et abaques couvrant les cas usuels.
 - amortissement : obtenu par addition de l'amortissement (modal, en % de l'amortissement critique) de la structure, du mobilier et des finitions spécifiées dans un tableau issu des travaux support du rapport.

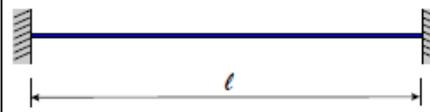
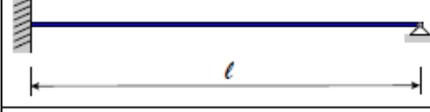
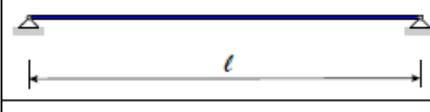
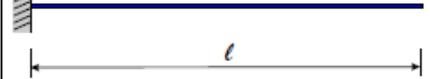
Supporting Conditions	Natural Frequency	Modal Mass
	$f = \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0.37\mu l^4}}$	$M_{\text{mod}} = 0,41 \mu l$
	$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0.2\mu l^4}}$	$M_{\text{mod}} = 0,45 \mu l$
	$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0.49\mu l^4}}$	$M_{\text{mod}} = 0,5 \mu l$
	$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0.24\mu l^4}}$	$M_{\text{mod}} = 0,64 \mu l$

Figure 33 - Fréquence fondamentale et masse modale selon JRC

Dans le présent document, on se limite au cas de poutre bi-appuyée, dont la formule donnée est en accord avec celle des normes. Toutefois, on considère que l’amortissement à 6% (ou plus) préconisé par le JRC est élevé, puisqu’il s’agit d’une estimation trop déviée de celle des normes et annexes nationales. Elles sont en tout cas montrées ci-dessous à titre indicatif.

Type	Amortissement (% de l'amortissement critique)
Amortissement de la structure D_1	
Bois	6%
Béton	2%
Acier	1%
Mixte acier-béton	1%
Amortissement du mobilier D_2	
Bureaux avec cloisons de 1 à 3 personnes	2%
Bureaux sans armoires ni étagères	0%
Bureaux ouvert "open space".	1%
Librairies	1%
Résidentiel	1%
Ecoles	0%
Salles de sport	0%
Amortissement des finitions D_3	
Faux-plafond	1%
Faux-plancher	0%
Chape flottante	1%
Amortissement total $D = D_1 + D_2 + D_3$	

Figure 34 - Coefficient d'amortissement selon JRC

2. Lecture de la valeur d’OS-RMS₉₀ : le guide fournit des abaques de lecture pour chaque amortissement de 1% à 9% en fonction de la masse modale et de la fréquence propre au format ci-contre.

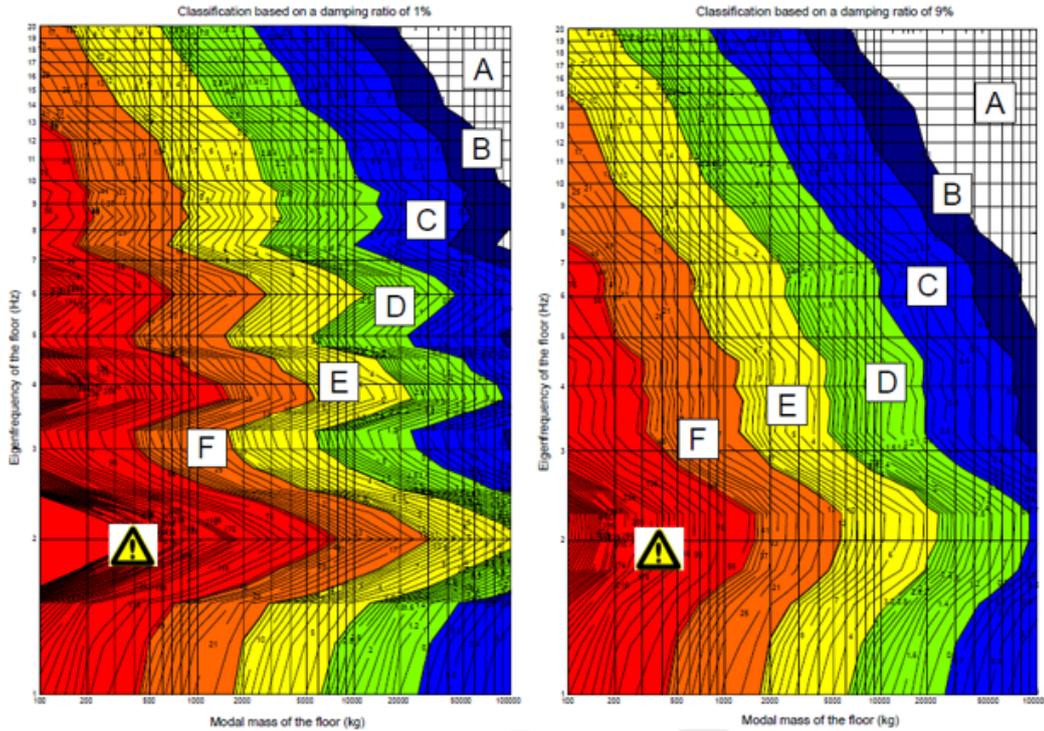


Figure 35 - Abaques 1% et 9% d'OS-RMS₉₀

- Détermination de la classe d’acceptabilité A, B, C, D, E ou F par lecture des abaques précédents et comparaison à la classification des planchers et recommandations en fonction de leur usage.

Classe	OS-RMS ₉₀		Utilisation du plancher										
	Limite inférieure	Limite supérieure	Endroit sensible	Santé	Education	Résidentiel	Bureau	Réunion	Commerce	Hôtel	Prison	Industriel	Sport
A	0,0	0,1	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé
B	0,1	0,2	Critique	Recommandé	Recommandé	Recommandé							
C	0,2	0,8	Non recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé
D	0,8	3,2	Non recommandé	Critique	Recommandé	Recommandé	Recommandé						
E	3,2	12,8	Non recommandé	Non recommandé	Critique	Critique	Critique						
F	12,8	51,2	Non recommandé	Non recommandé	Non recommandé	Non recommandé	Non recommandé	Non recommandé	Non recommandé	Non recommandé	Non recommandé	Critique	Critique

Recommandé
 Critique
 Non recommandé

Figure 36 - Classes d'accessibilité selon JRC

4. Vibration de planchers sur plusieurs appuis

Cette section étudie les particularités de la vibration de planchers continus sur plusieurs appuis - avec un intérêt particulier pour les panneaux à 3 et 4 appuis puisque c'est le cas d'usage courant dans les projets actuellement - dans les critères de fréquence et raideur vis-à-vis de l'Eurocode.

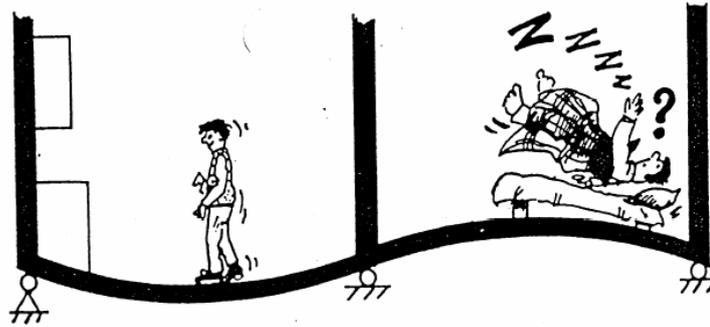


Figure 37 - Représentation de plancher à deux-travées

4.1. Critère de fréquence

On s'intéresse dans ce paragraphe à étudier les modes de vibrations en flexion de poutres droites continues multi-supportées, basé sur le document de référence des cours de Dynamique des Structures à l'ENPC (Pecker, 2019).

Pour une travée, en termes de fréquence fondamentale, la solution donnant les modes propres s'écrit suivant la forme :

$$\varphi(s) = A\sin(as) + B\cos(as) + C\operatorname{ch}(as) + D\operatorname{sh}(as)$$

Les conditions de contour de la travée s'écrivent en désignant par M_0 et M_1 les moments aux deux extrémités.

$$\varphi(0) = \varphi(L) = 0, M_0 = EI\varphi''(0), M_1 = EI\varphi''(L)$$

En appliquant les conditions en $s=0$ et $s=L$ et avec $aL=u$, on trouve que :

$$\begin{cases} \frac{M_0}{2EI} (\operatorname{ch} u - \cos u) + Da^2 \operatorname{sh} u + Aa^2 \sin u = 0 \\ -\frac{M_1}{EI} + \frac{M_0}{2EI} (\operatorname{ch} u - \cos u) + Da^2 \operatorname{sh} u - Aa^2 \sin u = 0 \end{cases}$$

Soit en résolvant par rapport à A et D :

$$\begin{cases} 2Da^2 \operatorname{sh} u = \frac{1}{EI} (M_1 - M_0 \operatorname{ch} u) \\ 2Da^2 \sin u = \frac{1}{EI} (M_0 \cos u - M_1) \end{cases}$$

Les rotations d'extrémité sont ainsi données par :

$$\begin{cases} 2EIa\omega_0 = 2EIa\varphi'(0) = -K(u)M_0 - H(u)M_1 \\ 2EIa\omega_1 = 2EIa\varphi'(L) = H(u)M_0 + K(u)M_1 \end{cases}$$

D'où,

$$K(u) = \frac{1}{th u} - \frac{1}{tg u} \quad , \quad H(u) = \frac{1}{\sin u} - \frac{1}{sh u}$$

Pour une poutre continue uniforme comme montré ci-dessous, la continuité des rotations à chaque appui donne la relation suivant, qui est connue en mécanique des structures sous le nom de formule des « trois moments ».

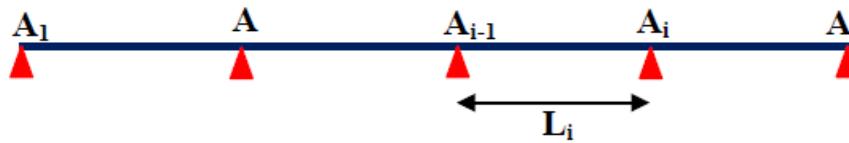


Figure 38 - Poutre continue sur plusieurs appuis

$$H(aL_i)M_{i-1} + [K(aL_i) + K(aL_{i+1})]M_i + H(aL_{i+1}) = 0$$

On écrit enfin la relation des trois moments pour chacun des appuis intermédiaires avec des conditions de moments nuls aux appuis 0 et n. On obtient le système linéaire $\underline{\underline{X}} \underline{\underline{M}} = 0$, dont le déterminant doit être nul pour fournir une solution non identiquement nulle.

$$\det(\underline{\underline{X}}) = \begin{vmatrix} K(aL_1) + K(aL_2) & H(aL_2) & \cdots \\ H(aL_2) & K(aL_2) + K(aL_3) & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{vmatrix} = 0$$

Par exemple, dans le cas à deux travées identiques on a :

$$K(aL) = 0, \text{ si } \sin aL \neq 0$$

Dont,

- Soit $\sin aL = 0$, et on retombe sur les cas de poutre bi-appuyé
- Soit $tg(aL) = th(aL)$, et on retombe sur le cas de poutre appuyé-encasté

Les deux premières fréquences propres de vibration sont donc indiquées ci-dessous. En rappelant que la fréquence concernée dans le calcul de confort vibratoire est toujours celle du premier mode propre, soit la fréquence fondamentale.

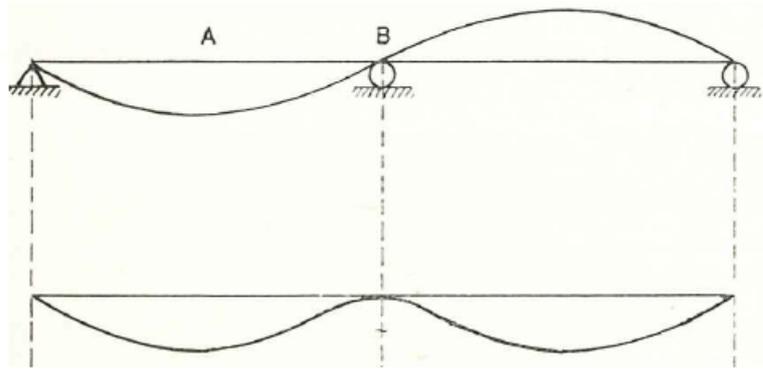


Figure 39 - Deux premier mode propre de vibration d'une poutre à deux travées

Pour généraliser :

- 2 travées L_1 et L_2 :

$$K(aL_1) + K(aL_2) = 0$$

- 3 travées L_1, L_2 et L_3 :

$$(K(aL_1) + K(aL_2))(K(aL_2) + K(aL_3)) - (H(aL_2))^2 = 0$$

D'où,

$$f = \frac{1}{2\pi} (\min(a))^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho S}}$$

4.2. Critère de raideur

Ensuite, on essaie d'estimer la plus-value de raideur – ou la moins-value de flèche – apportée par l'addition d'une travée pour une poutre continue sur les appuis également espacés.

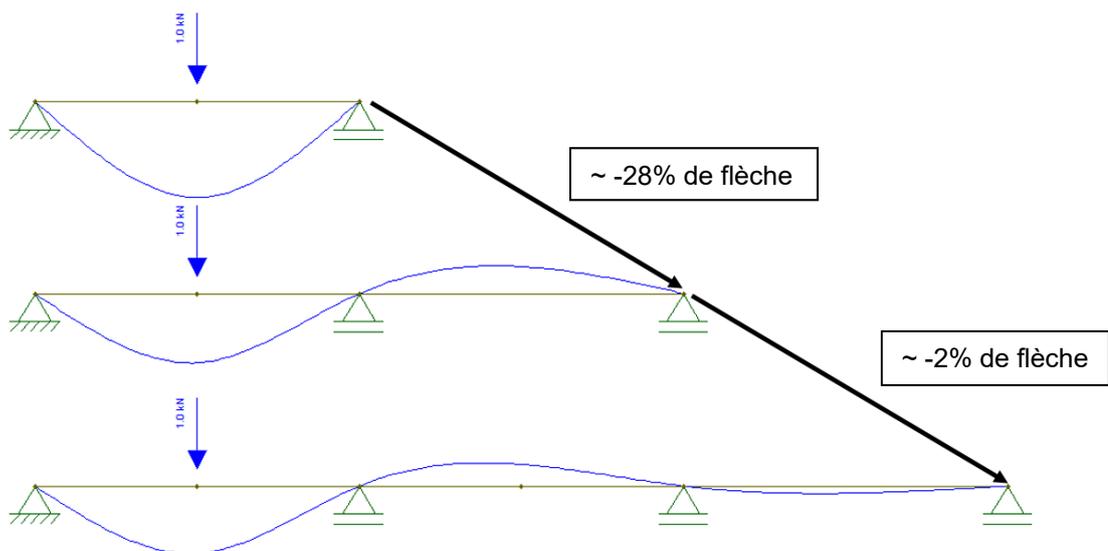


Figure 40 - Plus-value de raideur due à l'addition des travées

C'est-à-dire, en passant d'une travée à deux, la flèche est réduite en 28% alors que de deux à trois travées il n'y a que 2% de différence.

4.3. Application sur la Tour Silva

Finalement, à l'aide de Wolfram Mathematica pour résoudre les équations de fréquence propre, on reprend le panneau CLT de la Tour Silva pour comparer les poutres continues à 1, 2 et 3 travées.

Tableau 5 - Analyse de fréquence et souplesse d'un plancher à multi-travées

	f_1	w_{1kN}
	[Hz]	[mm]
L = 4,80	8,16	0,39
L = 5,80	5,59	0,69
L = 5,20	6,95	0,50
$L_1 = 4,80 / L_2 = 5,80$	6,37	0,54
$L_1 = 5,80 / L_2 = 5,20$	6,11	0,53
$L_1 = 4,80 / L_2 = 5,80 / L_3 = 5,20$	6,59	0,40

Cette analyse montre que passer d'une à deux travées est absolument avantageux, alors que de deux à trois pas trop. Il faut souligner que le temps d'implémentation et de calcul pour un plancher à trois travées est assez important, ce qui nous ferait choisir de rester sur deux travées au cas où il est possible.

5. Calcul temporel par éléments finis

5.1. Footfall analysis GSA

GSA Footfalls est un outil du logiciel GSA qui analyse les structures à l'aide de méthodes développées par Arup et à travers de la littérature scientifique. Les fonctions de charge dynamique appropriées pour la marche et d'autres activités humaines recommandées par Arup Research et l'American Institute of Steel Construction (AISC) sont automatiquement disponibles, y compris les forces à utiliser avec les escaliers. (Arup, 2009)

Une analyse par éléments finis bien menée est le seul moyen fiable de prédire la réponse de tout plancher qui ne fait pas partie d'une forme rectangulaire régulière, comme c'est le cas des planchers sur le projet Silva. Même avec une forme assez régulière, l'analyse par éléments finis

est souvent plus rapide et fiable que les calculs manuels. En utilisant GSA, on obtient des prédictions rapides et précises de la réponse à la résonance et transitoire du plancher aux forces de chute, y compris les facteurs de réponse, les accélérations de pointe et RMS et les vitesses.

L'analyse de GSA permet de localiser les régions de réponse haute et basse pour déterminer les endroits critiques pour les équipements ou les activités sensibles. Elle permet également d'évaluer rapidement le gain associé à des modifications localisées apportées aux structures de plancher afin de répondre aux critères de conception pour les humains ou les équipements sensibles. Il est possible de définir exactement où examiner un modèle, la vérification des zones particulières, telles que l'effet d'un couloir à côté d'une salle d'opération. Il est également possible d'examiner la résonance d'une structure soumise à des machines vibrantes et à des charges de danse en utilisant l'analyse harmonique, définir les propres facteurs de charge dynamiques ou effectuer une analyse de réponse linéaire.

On lise ci-dessous les variables et données d'entrée d'une analyse dynamique sur GSA Footfall (Arup, 2009) :

- Analyse modale : choix de l'analyse de la valeur propre (modale, modale P-delta, Ritz, Ritz, Ritz P-delta) ; choix du nombre de modes de vibration et du mode de démarrage ; ajout de contraintes horizontales ou verticales supplémentaires ; spécification de la masse ou dérivée de la masse des charges appliquées et du poids propre ; et inclusion des effets du renforcement des charges.
- Analyse de l'impact : vérifier le modèle complet ou des zones sélectionnées ; l'amortissement en fonction des valeurs d'entrée de l'utilisateur, de l'amortissement modal ou de la table ; varier le nombre de pas pour obtenir une réponse résonante ; varier le poids du marcheur ; choisir les méthodes de force d'excitation (Arup/Concrete-Centre, Steel Construction, American Institute of Steel Construction, floor or stair) ; ajuster les fréquences minimale et maximale de marche (taux de pas) ; visualiser les résultats détaillés des graphiques et tracer les niveaux des vibrations au sol.
- Autres analyses de vibrations : analyse harmonique, spectre de réponse, histoire temporelle linéaire et excitation périodique.

5.2. Modèle mathématique

Une explication mathématique plus approfondie sur les fonctions de charge dynamique et ses réponse résonantes et transitoires ne sera pas abordé dans ce rapport pour dépasser le cadre

Ecole Nationale des Ponts et chaussées – Projet de fin d’Etudes
de la présente étude. A titre informatif, la référence (Nguyen, 2013) compile les approches mathématiques vis-à-vis d’une analyse éléments finis. On indique ci-dessous la série de Fourier harmonique qui modélise la marche selon la fonction retenue comme référence.

$$F(t) = P \left[1 + \sum a_i \sin(2\pi i f_p t + \phi_i) \right]$$

Harmonic <i>i</i>	SCI P354		CCIP-016
	α_i	ϕ_i	α_i
1	$0.436(if_p - 0.95)$	0	$0.41(if_p - 0.95), \leq 0.56$
2	$0.006(if_p + 12.3)$	$-\pi/2$	$0.069 + 0.0056if_p$
3	$0.007(if_p + 5.2)$	π	$0.033 + 0.0064if_p$
4	$0.007(if_p + 2.0)$	$\pi/2$	$0.013 + 0.0065if_p$

Figure 41 - Coefficient de Fourier modélisant la marche (Nguyen, 2013)

Ensuite, la courbe de sollicitation d’une marche à fréquence de 2 Hz, valeur moyenne de la plage prédite dans la littérature.

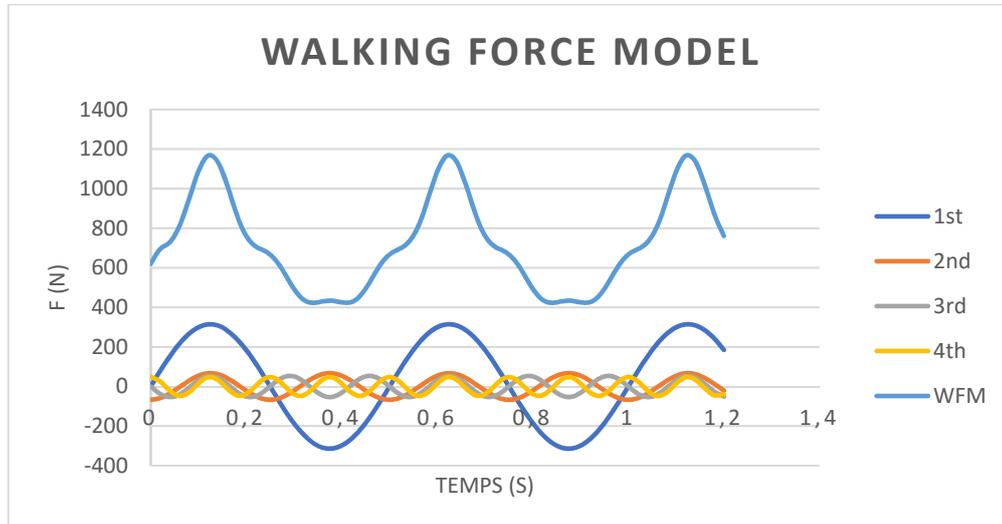


Figure 42 - Courbe de modélisation de la force d'une marche à 2 Hz

6. Résultats

6.1. Hypothèses et modélisation

Dans un premier temps, afin de se baser intégralement sur les normes et annexes nationales, les charges d’exploitation sont uniformisées en 1,5 kN/m², comme montré ci-dessous. Ceci aura

une influence réduite dans l’étude de vibration, puisqu’il ne s’agit que de 20% de la charge prise en compte dans le calcul de la vibration. Ainsi l’approche simplifiée constitue une bonne approximation du modèle

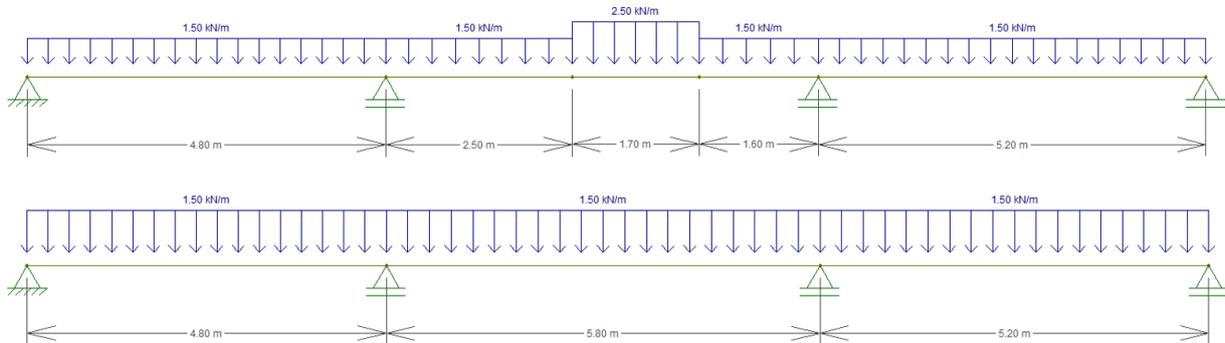


Figure 43 - Charges d'exploitation simplifiées

Pour mener des calculs d’une manière plus pratique et rapide, un tableau Excel a été développé selon les méthodologies précédemment décrites. En termes de vibration, le tableau est basé sur l’ÖNORM et reçoit certaines données d’entrée pour réaliser son calcul. Ci-après, le tableau présente les propriétés mécaniques et les données dynamiques du panneau Stora Enso 200 L5s prévu pour le plancher critique.

Données d'entrée																											
Caractéristiques géométriques		Commentaires	Commentaires																								
Fabricant	Stora Enso		Panneau CLT 200 L5s																								
plis	2																										
plis eff	5																										
h	200 mm																										
Sr	2800000 mm ²																										
Sv	3200000 mm ²																										
Portée	5,8 m																										
Largeur	2,4 m	Pour le calcul de vibration																									
			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Couche i</th> <th>Orient.</th> <th>h [mm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0</td><td>40</td></tr> <tr><td>2</td><td>90</td><td>40</td></tr> <tr><td>3</td><td>0</td><td>40</td></tr> <tr><td>4</td><td>90</td><td>40</td></tr> <tr><td>5</td><td>0</td><td>40</td></tr> <tr><td>6</td><td>90</td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td>0</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Couche i	Orient.	h [mm]	1	0	40	2	90	40	3	0	40	4	90	40	5	0	40	6	90		7	0	
Couche i	Orient.	h [mm]																									
1	0	40																									
2	90	40																									
3	0	40																									
4	90	40																									
5	0	40																									
6	90																										
7	0																										
Matériau		Commentaires	Commentaires																								
EO,mean	12500 N/mm ²		fm,y,k 24,0 N/mm ²																								
E1ef,0	6,6E+12 N.mm ²		fr,k 1,2 N/mm ²																								
E1ef,b	1,7E+12 N.mm ²		fv,k 2,7 N/mm ²																								
E1ef	5,9E+12 N.mm ²	cisaillement roulant y compris	pm 5,0 kN/m ²																								
GAef	- N.mm ²		ym 1,3																								
Vibration		Commentaires	Commentaires																								
Raideur trans	NON	Oui si appuyé sur les quatre bords																									
Chape	NON																										
D	4,0%	2,5% sans chape; 4,0% avec																									
E1,l	6,6E+12 N.mm ²		Q perm 30 kg/m																								
E1,b	1,7E+12 N.mm ²		20% de Q recommandé																								

Figure 44 - Tableau Excel pour le calcul des planchers selon ÖNORM

A noter sur ces données d’entrée :

- Le panneau a une portée de 5,8m, c’est-à-dire sa travée la plus large, mais cela ne veut pas forcément dire que le panneau est pensé sur deux appuis.
- Largeur de 2,4 m, ce qui pourra tout à fait varier à partir d’un calepinage différent.

- 20% de la charge permanente sera pris en compte dans la vibration, mais pas dans la masse modale.
- La valeur de coefficient d'amortissement à 4% sera retenu, ce qui est préconisé dans l'ÖNORM pour un plancher avec chape liquide et/ou revêtement de sol lourd.
- La raideur de la chape ne sera pas rajoutée, afin de rester sous une analyse de cas plus défavorable.
- La raideur transversale ne doit pas être ajoutée, vu que les panneaux ne sont pas appuyés sur les quatre cotés.

Ensuite, la modélisation éléments finis du panneau Stora Enso 200 L5s est établie via les deux outils concernés. Il faut rappeler que, dans le cas d'un élément « plaque » 2D orthotrope, les variables utilisées par GSA sont $E_x, E_y, E_z, G_{xy}, G_{yz}, G_{zx}, \nu_{xy}, \nu_{yz},$ et ν_{zx} , alors que les propriétés de comportement multi-couches contenus dans la bibliothèque Acord utilise les variables $D_{11}, D_{22}, D_{33}, D_{44}, D_{55}, D_{66}, D_{77}, D_{88},$ et D_{99} .

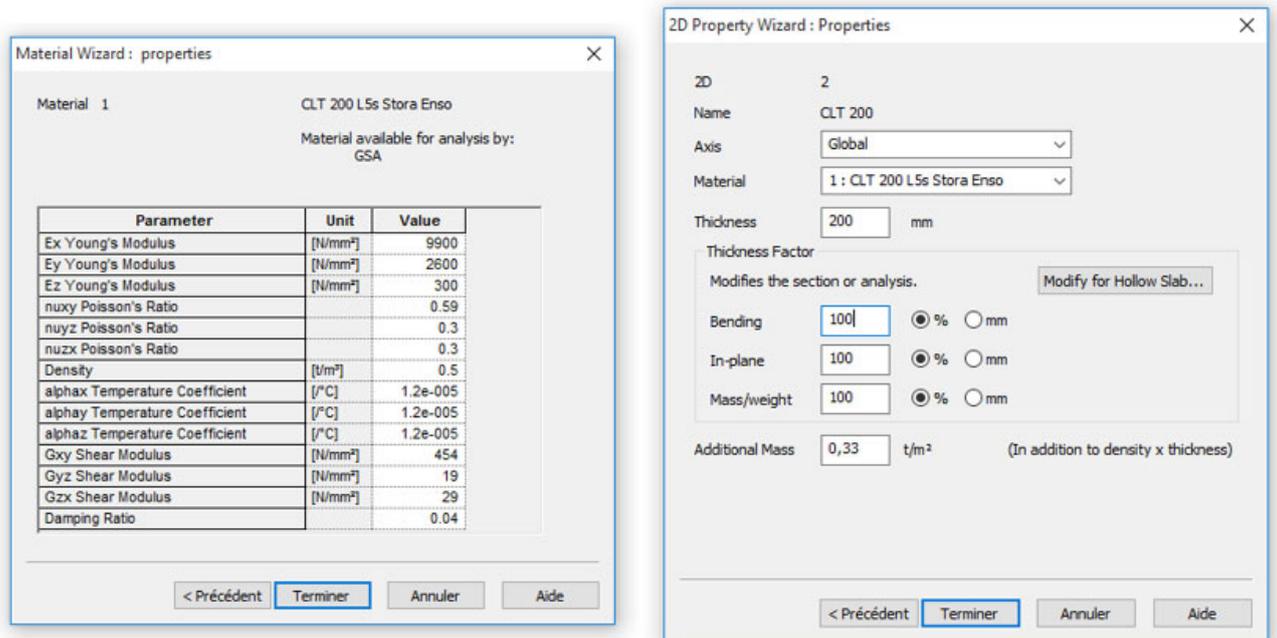


Figure 45 - Propriétés 2D orthotrope sur GSA

Unités	kN/m	kNm/m	kN*m	kN/m				
Nx	1500000	0	0	0	0	0	0	0
Ny	sym.	1000000	0	0	0	0	0	0
Nxy	sym.	sym.	92000	0	0	0	0	0
Mx	sym.	sym.	sym.	6600	0	0	0	0
My	sym.	sym.	sym.	sym.	1733.33	0	0	0
Mxy	sym.	sym.	sym.	sym.	sym.	299	0	0
Txz	sym.	sym.	sym.	sym.	sym.	sym.	15952.37	0
Tyz	sym.	sym.	sym.	sym.	sym.	sym.	sym.	8844.14

Figure 46 - Propriétés 2D orthotrope sur ACORD-Bat

Pour vérifier la compatibilité des matrices, on note que :

$$(E_{x,GSA} \cdot I_{x,GSA})/b = 9900 \cdot 10^3 \cdot \left(1 \cdot \frac{0,2^3}{12}\right) = 6600,00 \text{ kN/m} = D_{Mx,Acord}$$

$$(E_{y,GSA} \cdot I_{y,GSA})/b = 2600 \cdot 10^3 \cdot \left(1 \cdot \frac{0,2^3}{12}\right) = 1733,33 \text{ kN/m} = D_{My,Acord}$$

En termes de confort vibratoire, le logiciel ACORD n'a pas diffusé à ce jour de version permettant le calcul de l'accélération. Il est néanmoins possible d'implémenter une fonction mathématique harmonique pour modéliser la marche, comme montré dans la dernière section, mais l'accélération RMS ne sera pas calculée de la même façon qu'avec les méthodes développées Arup. Cette approche ne sera pas examinée dans la présente étude.

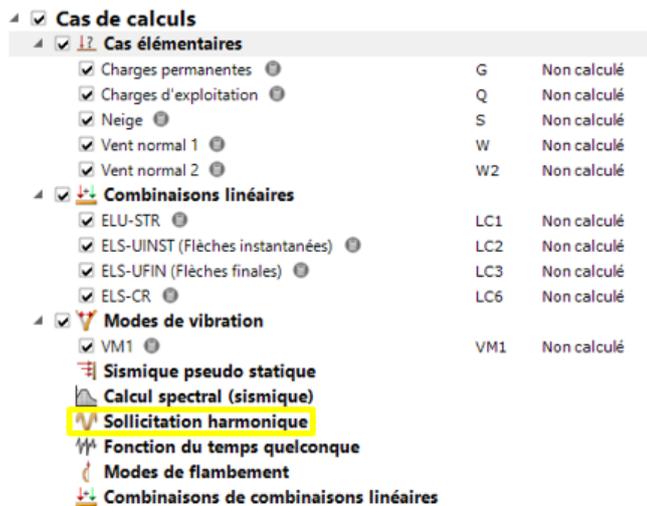
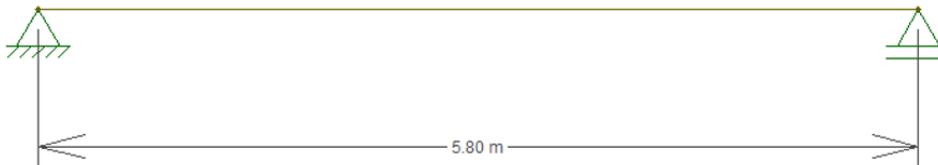


Figure 47 - Fonctionnalités disponibles sur ACORD

L’accélération de réponse traitée sera donc celle du Footfall d’après un modèle réalisé sur GSA.

6.2. Etude de cas isostatique à 1 travée

Les hypothèses et la modélisation de la section précédente ont été mis en pratique ensuite sur un plancher isostatique correspondant à plus large portée du panneau critique de la Tour Silva. Ce cas statique n’est pas compatible avec la réalité puisque le projet prévoit un plancher multi-travée, mais il sera quand même étudié à titre académique et comparatif.



Vibration					
Critère de fréquence		Commentaires		Ratio	Commentaires
m	430 kg/m		fcl1	8,00 Hz	f1 > fcl1
(f1)l	5,59 Hz		fcl2	6,00 Hz	f1 > fcl2
kfb	1,00		fmin	4,50 Hz	f1 > fmin
f1	5,59 Hz				
Critère de raideur		Commentaires		Ratio	Commentaires
(Wstat)l	0,69 mm		Wcl1	0,25 mm	274% ÖNORM B 1995-1-1
bf	1,00 m		Wcl2	0,50 mm	137% ÖNORM B 1995-1-1
Wstat	0,69 mm		Classe		3 : Aucune exigence
Exigence d'accélération		Commentaires		Ratio	Commentaires
(M*)l	1247,00 kg		acl1	0,05 m/s ²	458% ÖNORM B 1995-1-1
M*	1247,00 kg		acl2	0,10 m/s ²	229% ÖNORM B 1995-1-1
FD	700 N				
α	0,1068				
a _{rms}	0,30 m/s ²	ÖNORM B 1995-1-1			
a _{rms}	0,23 m/s ²	Hamm and Richter (2009), uniaxial			
a _{rms}	0,23 m/s ²				
Vérification selon ÖNORM B 1995-1-1		Commentaires			
Classe	3	Aucune exigence			

Figure 48 - Plancher sur deux appuis

On représente ci-dessous, les calculs de fréquence, souplesse (flèche sous charge ponctuelle de 1 kN) et accélération RMS obtenus sur le modèle GSA.

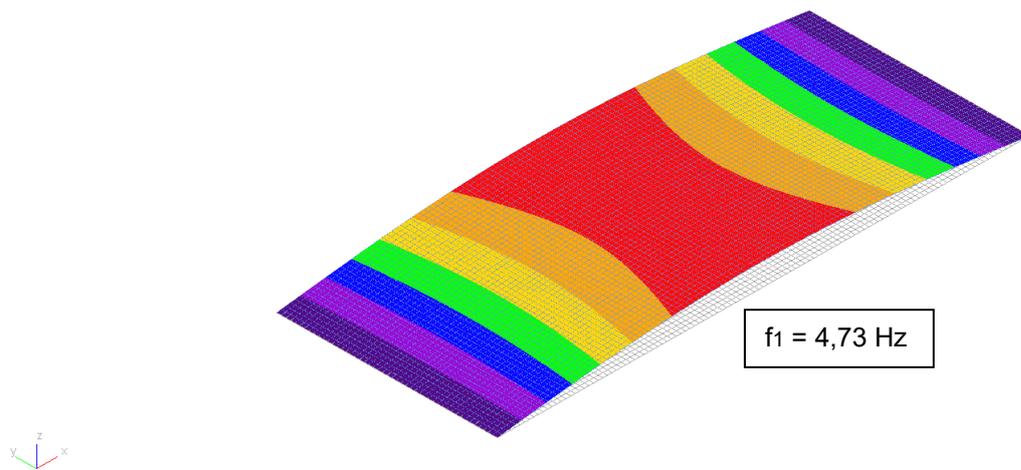


Figure 49 - Fréquence fondamentale du plancher isostatique sur GSA

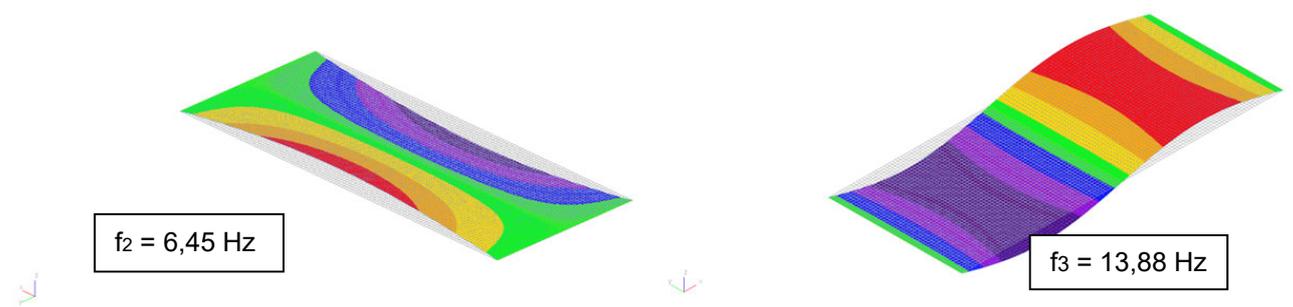


Figure 50 - Modes propre 2 et 3 du plancher isostatique sur GSA. A titre indicatif

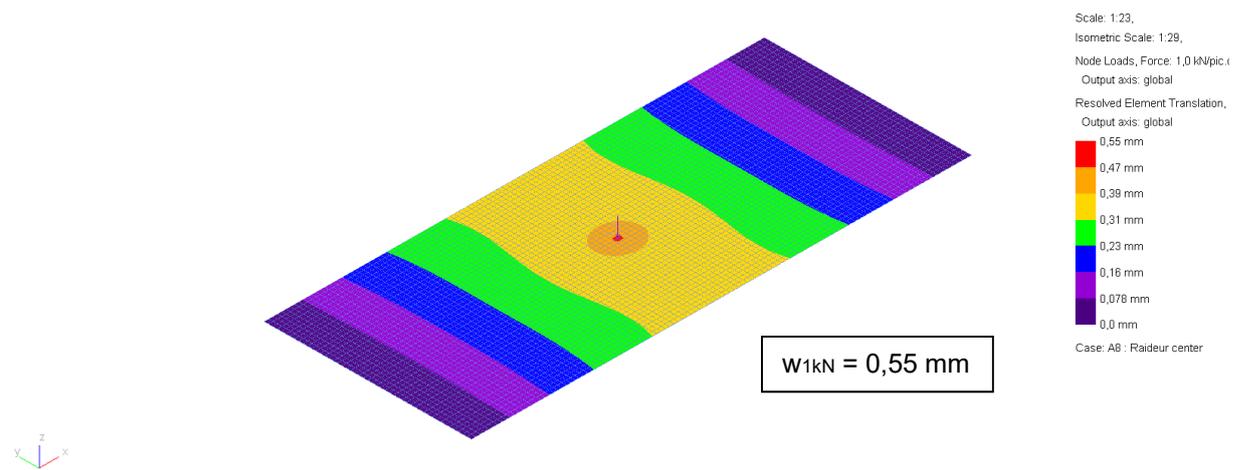


Figure 51 - Plancher isostatique sur GSA soumis à une charge de 1 kN à mi-travée

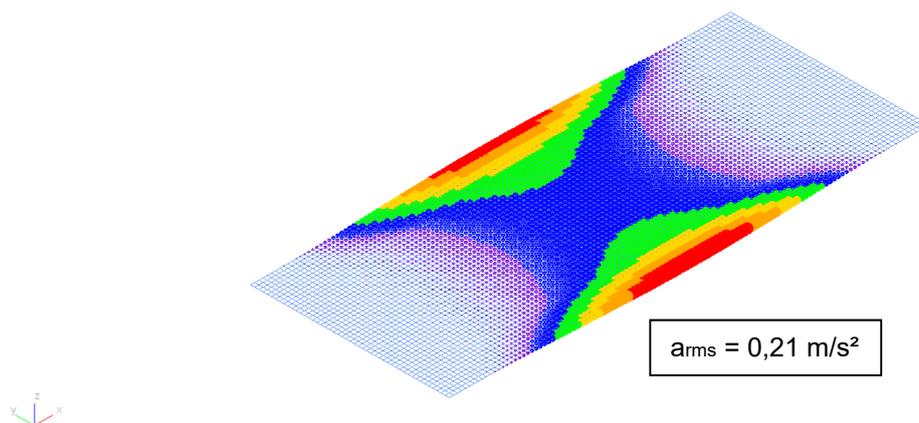


Figure 52 - Accélération de réponse à la marche des usagers sur plancher isostatique

Ci-après, les calculs de fréquence et souplesse obtenus sur un modèle Acord sont également montrés.

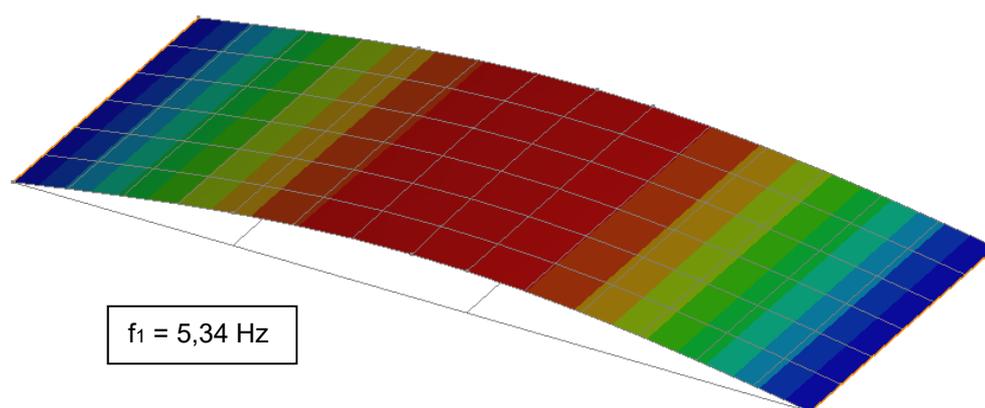


Figure 53 - Fréquence fondamentale du plancher isostatique sur ACORD

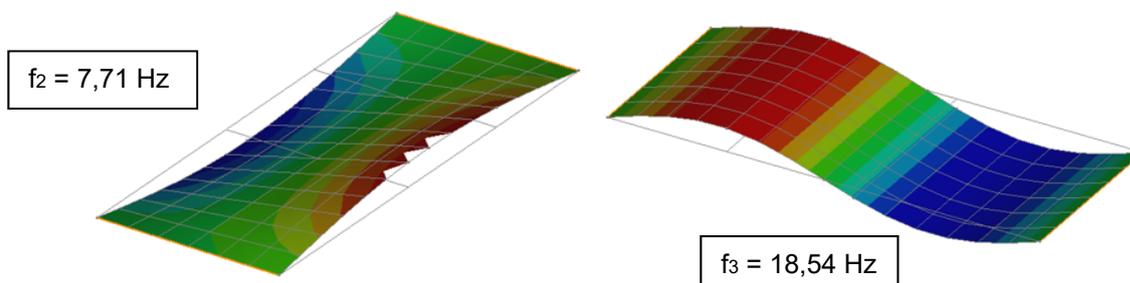


Figure 54 - Modes propre 2 et 3 du plancher isostatique sur ACORD. A titre indicatif

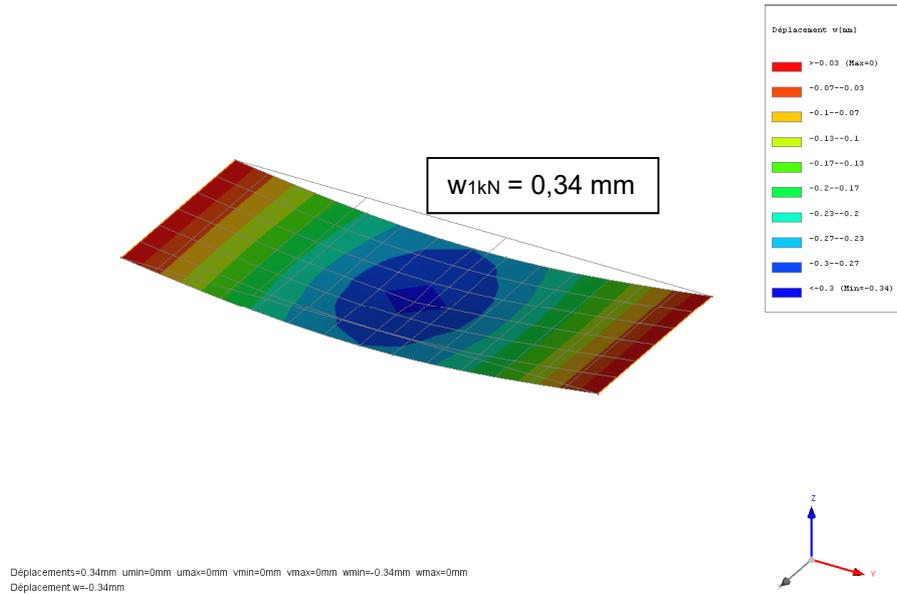


Figure 55 - Plancher isostatique sur ACORD soumis à une charge de 1 kN à mi-travée

Le tableau récapitulatif ci-dessous montre que les trois méthodes de calcul – Excel, GSA et Acord – présentent un certain degré de compatibilité. En revanche, GSA s’éloigne un peu de la plage acceptable en fréquence alors que ACORD s’éloigne en souplesse. A titre indicatif, on montre aussi les résultats de ce même plancher selon Calculatis, vu qu’il est le logiciel de calcul officiel du fabricant Stora Enso. Un ajustement pour rajouter 20% de la charge d’exploitation a été fait afin de réduire l’erreur.

Tableau 6 - Récapitulatif des résultats comparatifs pour le plancher isostatique

	f_1	W_{1kN}	a_{rms}	Classe	
	[Hz]	[mm]	[m/s ²]	ÖNORM	SFS
ÖNORM	5,59	0,69	0,23	3	E
GSA - Footfall	4,73	0,55	0,21	3	E
ACORDBat-3D	5,34	0,34	-	3	E
Calculatis	5,54	0,62	0,28	3	E

6.3. Etude de cas hyperstatique à 2 ou 3 travées

Il faut d’abord retenir que l’annexe nationale autrichienne ne mentionne rien vis-à-vis du calcul vibratoire d’un plancher sur trois travées, en préconisant par contre le calcul sur deux travées. L’étude ci-dessous part donc de l’hypothèse que la structure perd peu de raideur, Francisco Raul Lobo Rodrigues – Département Génie Civil et Construction

notamment concernant le critère de souplesse, et que le comportement vibratoire va être similaire en termes de fréquence fondamentale si l’on passe de 3 à 2 travées. Pour valider cette hypothèse, on s’est appuyé sur l’étude conduite dans la section 4 de ce rapport sur l’influence du nombre de travées sur le comportement vibratoire. Les résultats à 3 travées à partir d’un calcul analytique seront aussi indiqués de toute manière pour fin de comparaison.

Les 3 travées vont être subdivisés en 2 planchers de sur trois appuis : travées 4,8 m / 5,8 m et 5,8 m / 5,2 m, comme montrée ci-dessous. Le calcul pourra enfin être conduit selon la méthode ÖNORM.

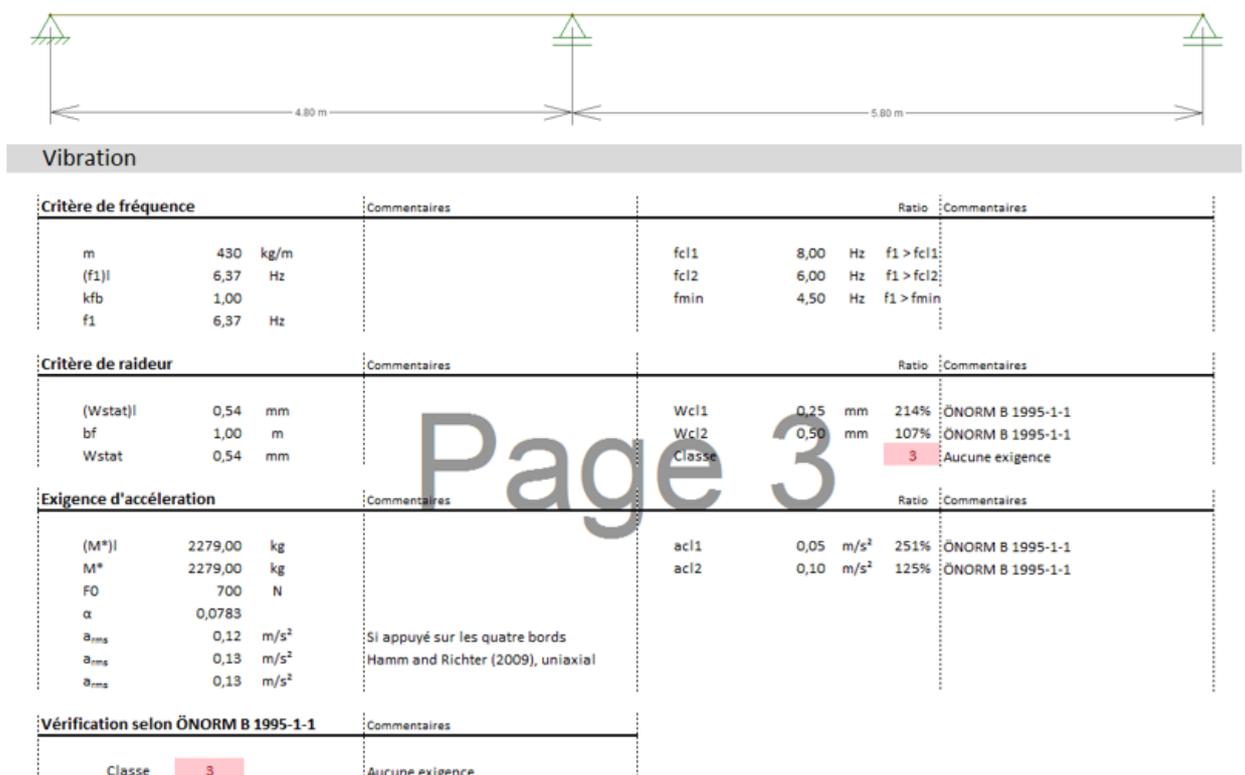


Figure 56 - Plancher simplifié sur trois appuis à gauche

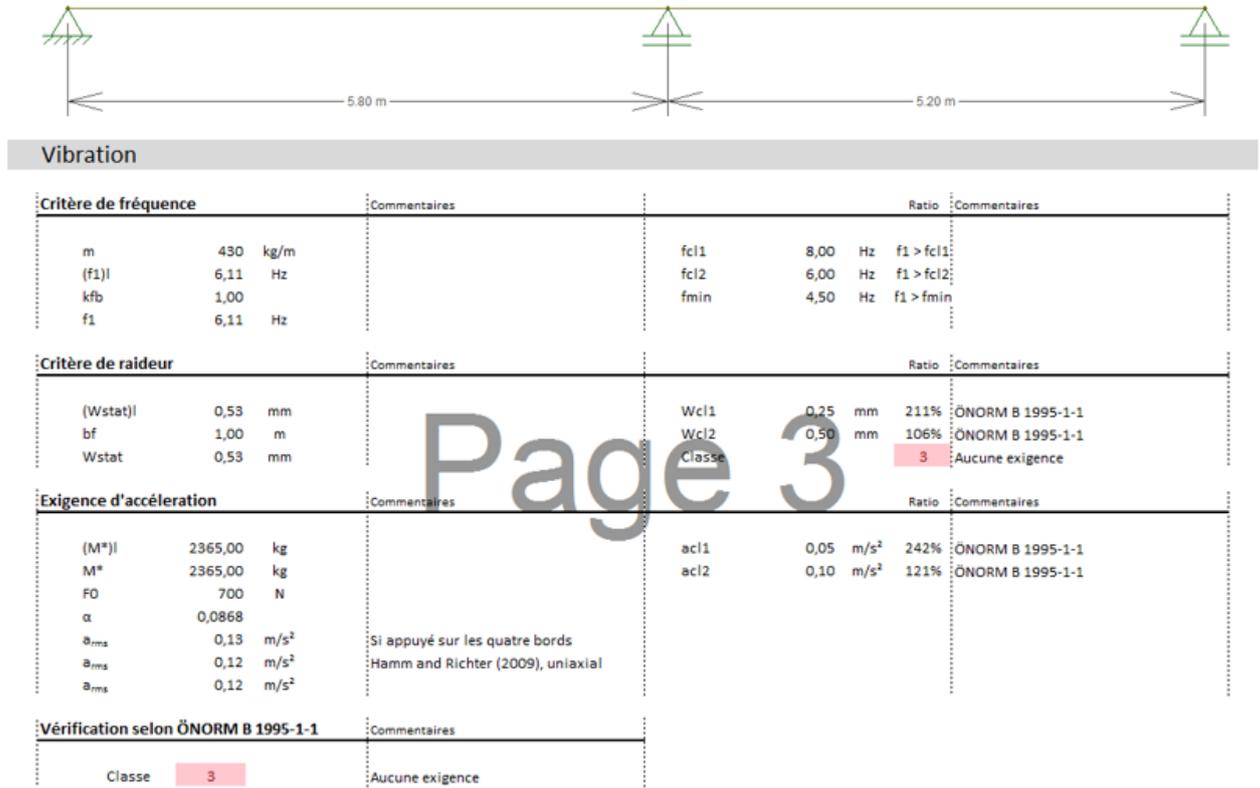


Figure 57 - Plancher simplifié sur trois appuis à droit

On représente ci-dessous, les calculs de fréquence, souplesse (flèche sous charge ponctuelle de 1 kN) et accélération RMS obtenus sur un modèle GSA sont montrés.

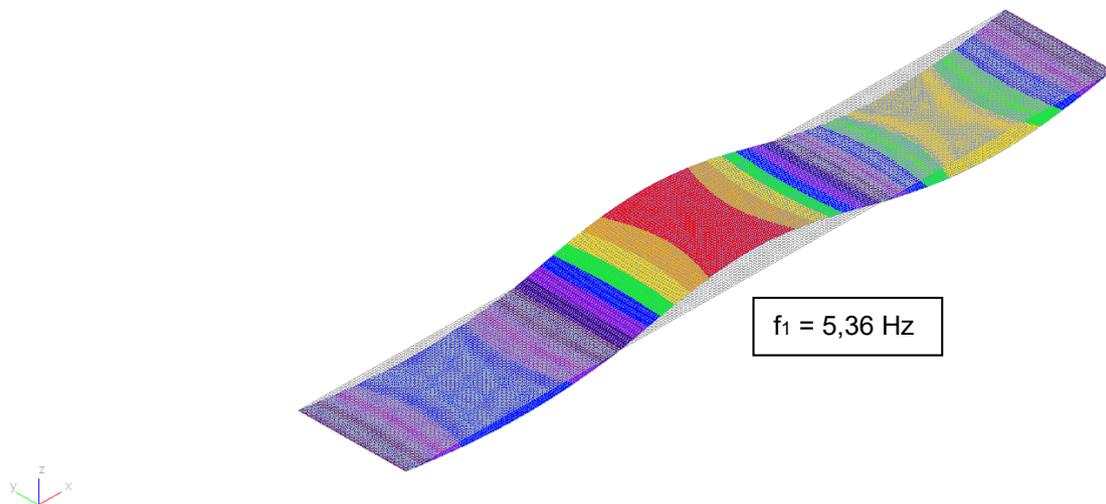


Figure 58 - Fréquence fondamentale du plancher sur GSA

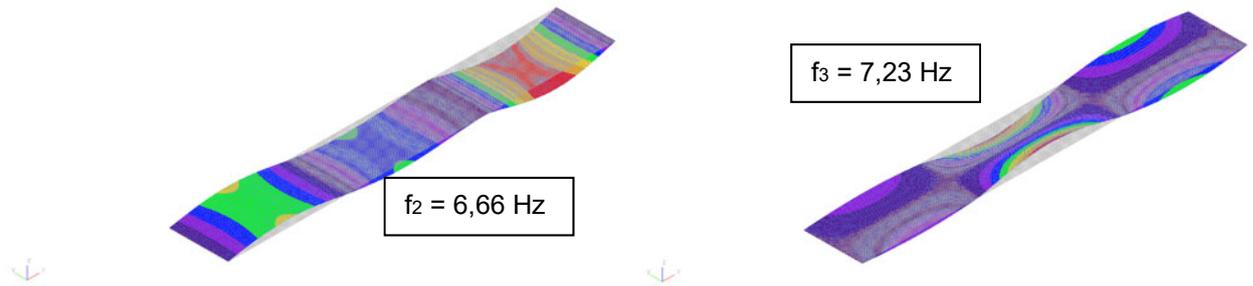


Figure 59 - Modes propre 2 et 3 du plancher sur GSA. A titre indicatif

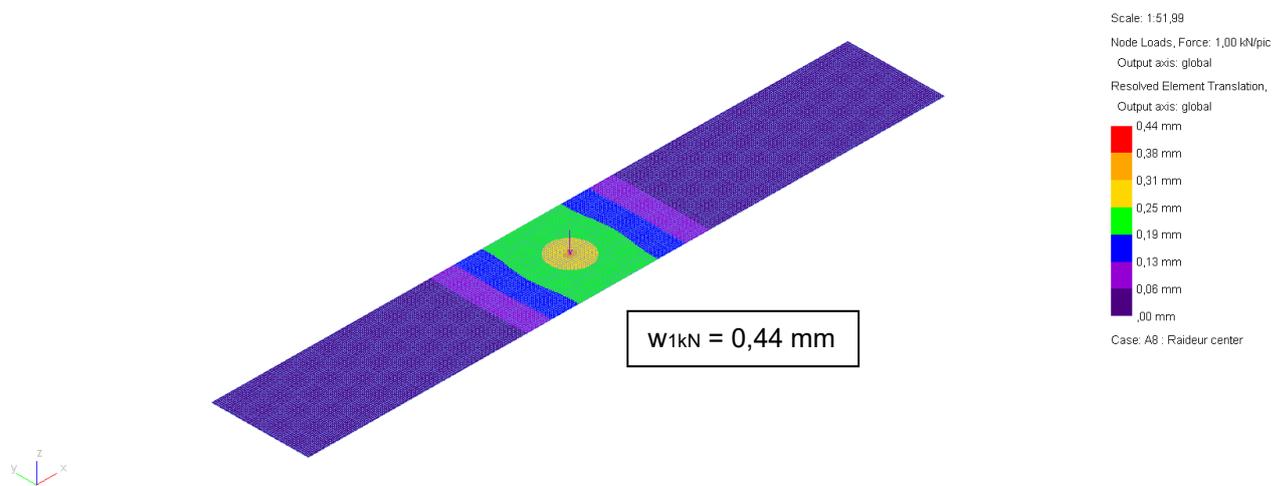


Figure 60 - Plancher sur GSA soumis à une charge de 1 kN à mi-travée de la plus large portée

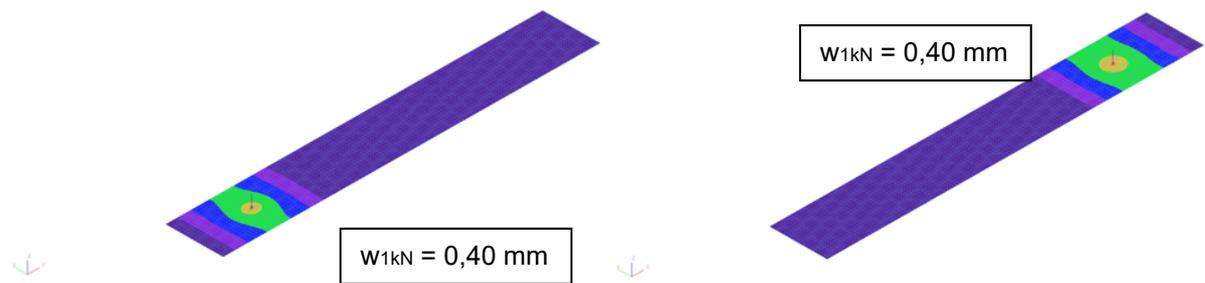


Figure 61 - Plancher sur GSA soumis à une charge de 1 kN à mi-travée des autres deux portées

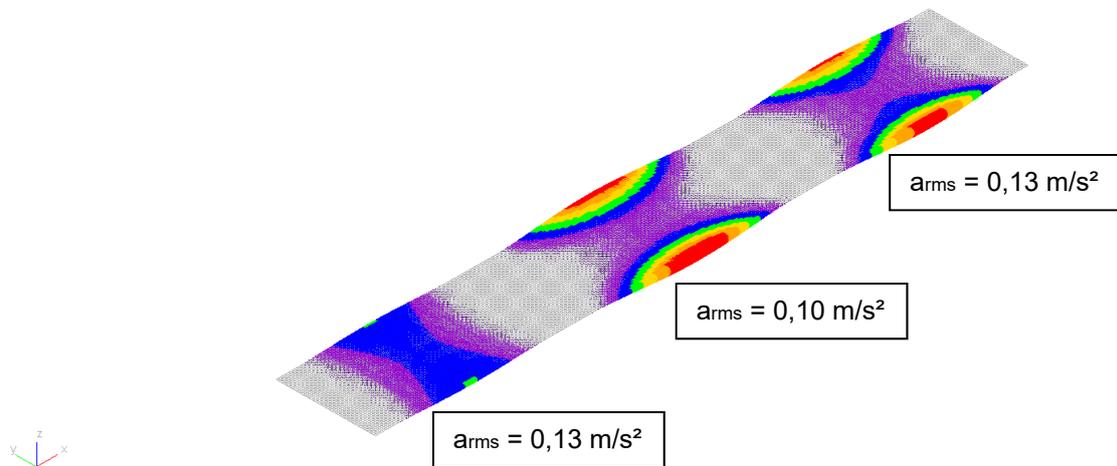


Figure 62 - Accélération de réponse à la marche des usagers

Concernant l'accélération RMS, il faut souligner que si le plancher est considéré comme un plancher isolé, sans prise en compte de la raideur apportée par le couturage avec les panneaux voisins, il y a une évaluation à la hausse de l'accélération au droit des bords. Pour atténuer cet effet, les résultats utilisés à des fins de comparaison sont ceux de la partie centrale du plancher.

On représente également ci-dessous, les calculs de fréquence et souplesse obtenus sur un modèle Acord.

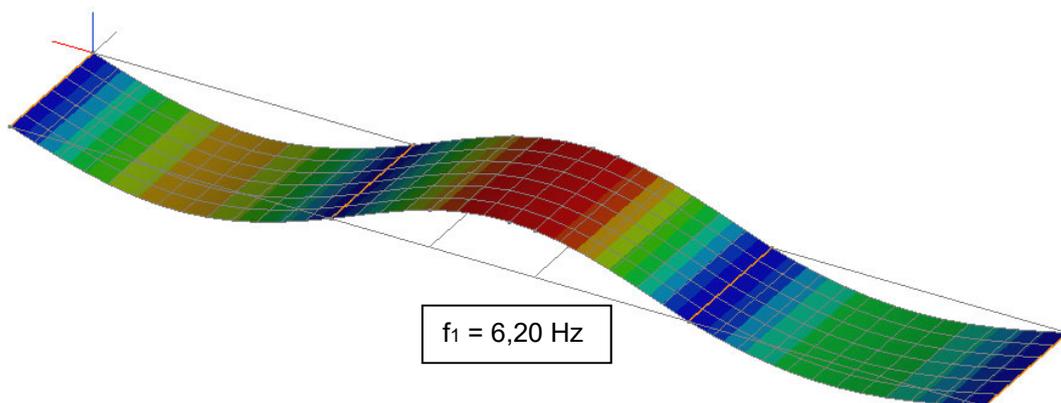


Figure 63 - Fréquence fondamentale du plancher sur Acord

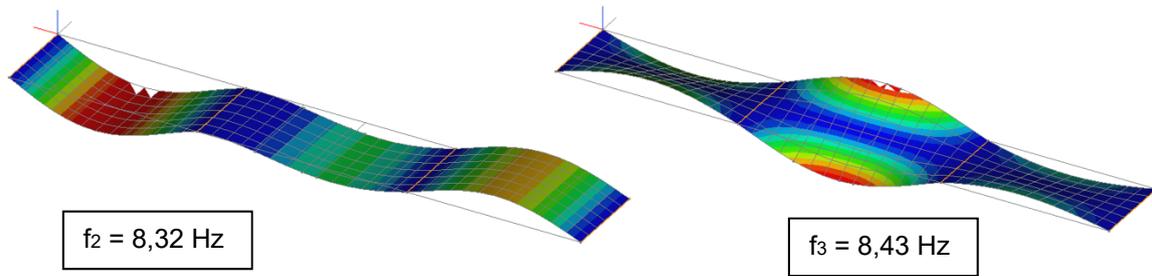


Figure 64 - Modes propre 2 et 3 du plancher sur Acord. A titre indicatif

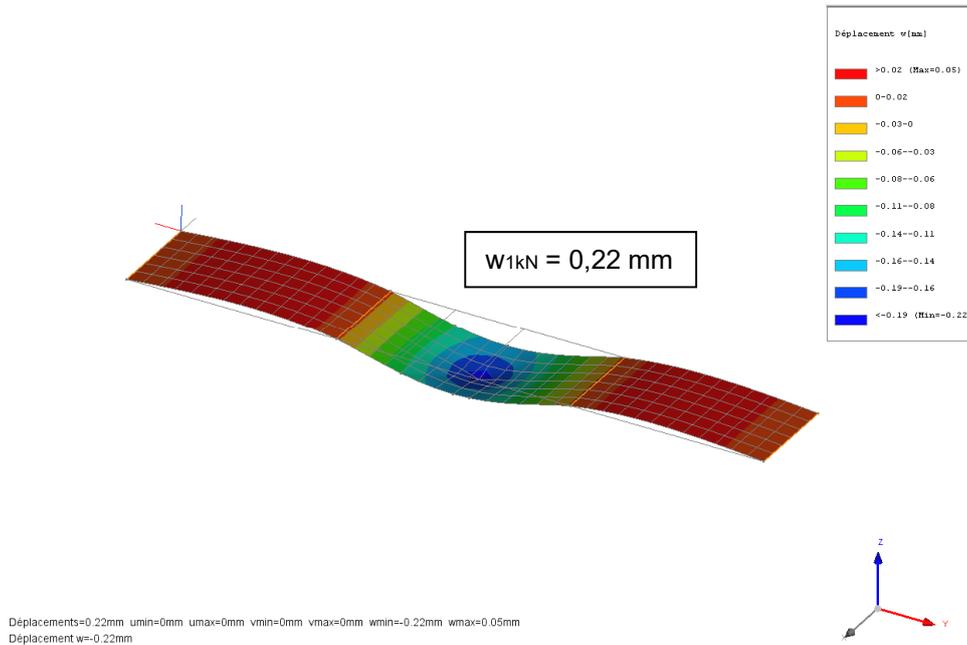


Figure 65 - Plancher sur Acord soumis à une charge de 1 kN à mi-travée de la plus large portée

Le tableau récapitulatif ci-dessous montre que les trois méthodes de calcul – Excel, GSA et Acord – sont compatibles dans la mesure du possible. GSA présente une valeur de fréquence propre écartée de 12% de la plage des autres résultats, mais il est toutefois cohérent vis-à-vis de l’accélération de réponse avec le calcul selon Hamm & Richter. Acord par contre présente une valeur de paramètre de souplesse très réduite par rapport aux autres, représentant 50% du résultat selon GSA, ce qu’il faut investiguer dans un deuxième temps.

Tableau 7 - Récapitulatif des résultats comparatifs selon les méthodes proposées

	f_1	W_{1kN}	a_{rms}	Classe	
	[Hz]	[mm]	[m/s ²]	ÖNORM	SFS
Calcul analytique	6,59	0,40	-	2	E
ÖNORM max (l_2/l_1)	6,11	0,53	0,12	3	D
ÖNORM min (l_2/l_1)	6,37	0,54	0,13	3	E
GSA - Footfall	5,36	0,44	0,13	3	E
ACORDBat-3D	6,20	0,22	-	2	-

En termes de classe de vibration, le plancher n’est pas justifié au regard du critère recommandé pour les logements contigus, ni selon la méthode ÖNORM ou SFS. L’abaque JRC ci-dessous classe le plancher comme acceptable pour l’utilisation bureau/logement mais quand même dans la plage critique.

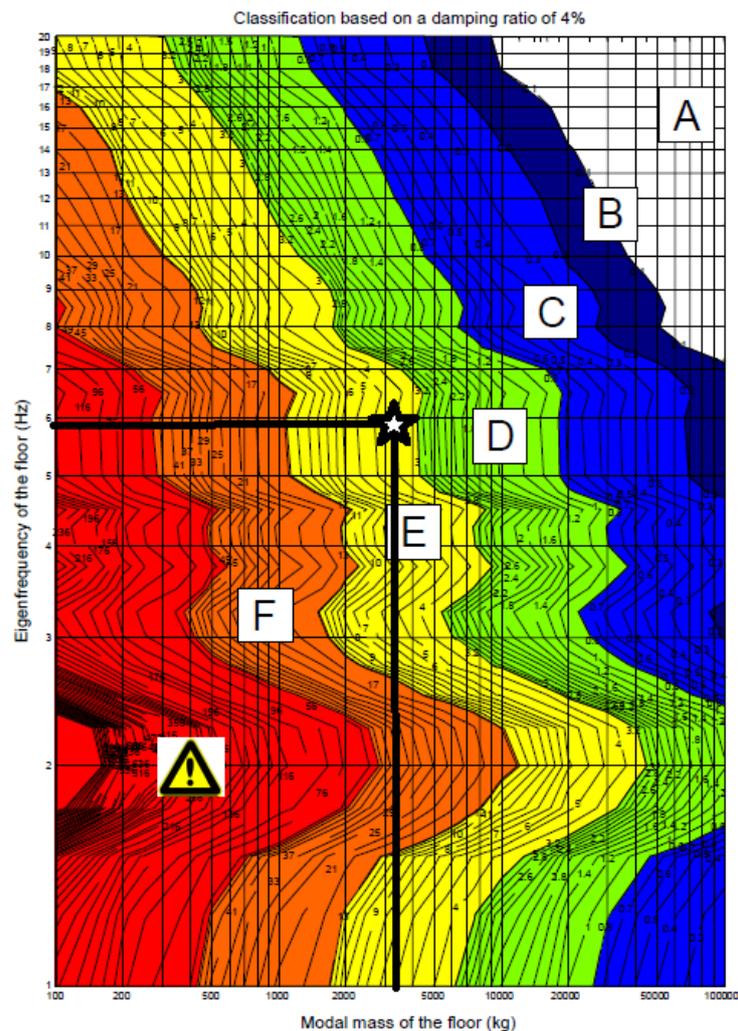


Figure 66 - Classification du planchers selon JRC

6.4. Effet de raideur supplémentaire en raison du couturage

Suite aux résultats de la dernière section, la réalité constructive des panneaux couturés entre eux pousse à étudier l'influence de la raideur apportée par ces jonctions et de sortir du modèle de panneau isolé. La raideur apportée par le couturage aux panneaux côte à côte (comme montré ci-dessous) va modifier le critère de souplesse et l'accélération de réponse. On se limite à l'évaluation de son effet et à l'optimisation possible sur les épaisseurs de plancher associée.

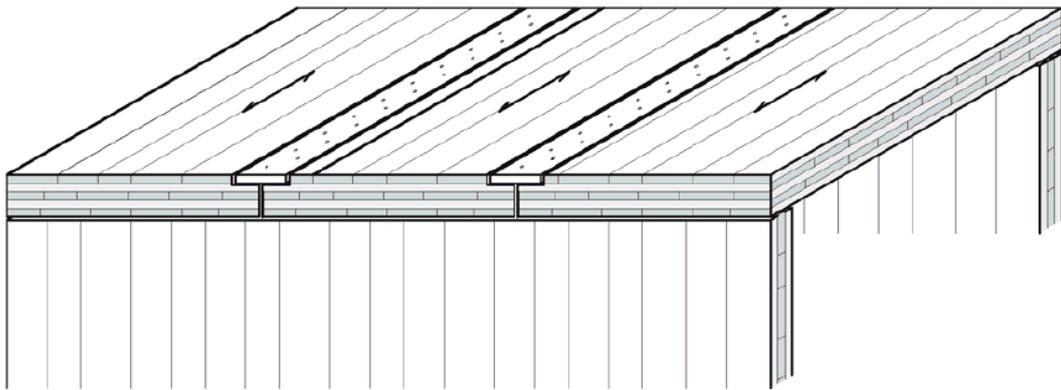


Figure 67 - Schéma indicatif de trois panneaux couturés côte à côte

D'une manière simplifiée, les critères de vibration ont été calculés en triplant la dimension transversale du panneau, qui monte de 2,4 mètres à 7,2 mètres, mais en restant dans le cas de poutre bi-appuyée. Il est attendu que la masse modale soit aussi multiplié par trois, ce qui va réduire l'accélération RMS. Cette modélisation peut dégrader la classe des planchers vis-à-vis des classifications ÖNORM et SFS, mais cela peut aussi montrer que le complexe de la structure du plancher doit être globalement analysé afin se rapprocher de ce qui sera effectivement mis en place.

Vibration				
Critère de fréquence		Commentaires	Ratio	Commentaires
m	430 kg/m		fcl1	8,00 Hz f1 > fcl1
(f1)l	6,11 Hz		fcl2	6,00 Hz f1 > fcl2
kfb	1,00		fmin	4,50 Hz f1 > fmin
f1	6,11 Hz			
Critère de raideur		Commentaires	Ratio	Commentaires
(Wstat)l	0,53 mm		Wcl1	0,25 mm 211% ÖNORM B 1995-1-1
bf	1,00 m		Wcl2	0,50 mm 106% ÖNORM B 1995-1-1
Wstat	0,53 mm		Classe	3 Aucune exigence
Exigence d'accélération		Commentaires	Ratio	Commentaires
(M*)l	2365,00 kg		acl1	0,05 m/s ² 81% ÖNORM B 1995-1-1
M*	2365,00 kg		acl2	0,10 m/s ² 40% ÖNORM B 1995-1-1
FO	700 N			
α	0,0868			
a _{rms}	0,13 m/s ²	Si appuyé sur les quatre bords		
a _{rms}	0,04 m/s ²	Hamm and Richter (2009), uniaxial		
a _{rms}	0,04 m/s ²			
Vérification selon ÖNORM B 1995-1-1		Commentaires		
Classe	1	Exigence haute		

Figure 68 - Planchers couturés simplifiés sur trois appuis

On indique ci-dessous, la modélisation des panneaux côte à côte, les calculs de fréquence, souplesse (flèche sous charge ponctuelle de 1 kN) et accélération RMS obtenus sur un modèle GSA. Les 3 panneaux sont modélisés comme un seul panneau à 7,2 mètres, mais pour l'analyse des résultats, on ne regarde que la partie centrale de largeur 2,4 mètres. C'est-à-dire, on considère que les assemblages sont assez rigides au niveau où c'est cohérent de modéliser l'ensemble comme un seul panneau. Néanmoins les plaques d'assemblage ne transfèrent pas les rotations dans la direction transversale, donc les nœuds de raccordement doivent être articulés dans la direction de rotation xx parallèle à la portée.

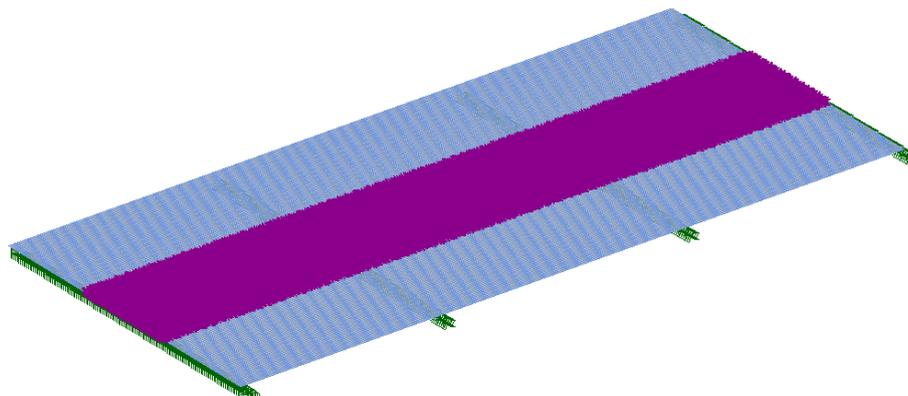


Figure 69 - Modélisation sur GSA des panneaux côte à côte

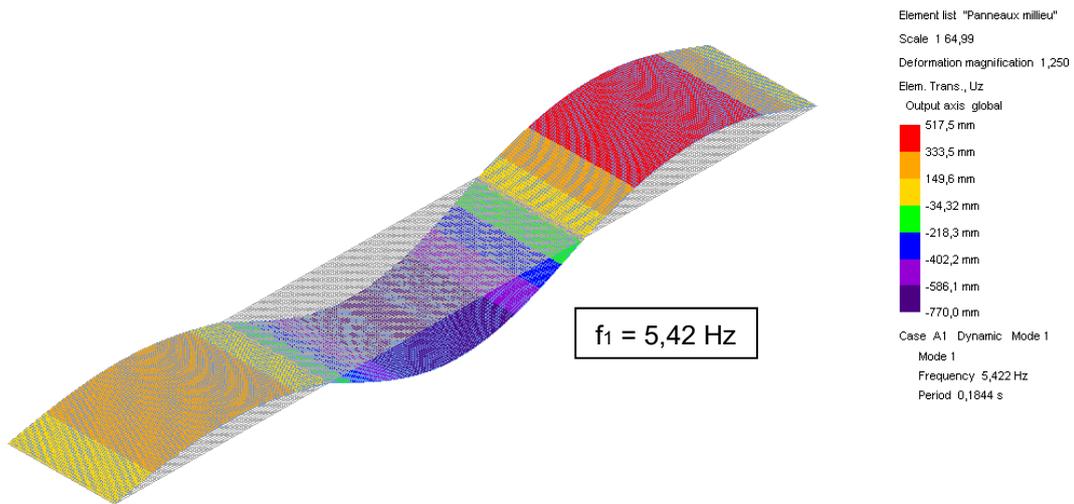


Figure 70 - Fréquence fondamentale du panneau central sur GSA

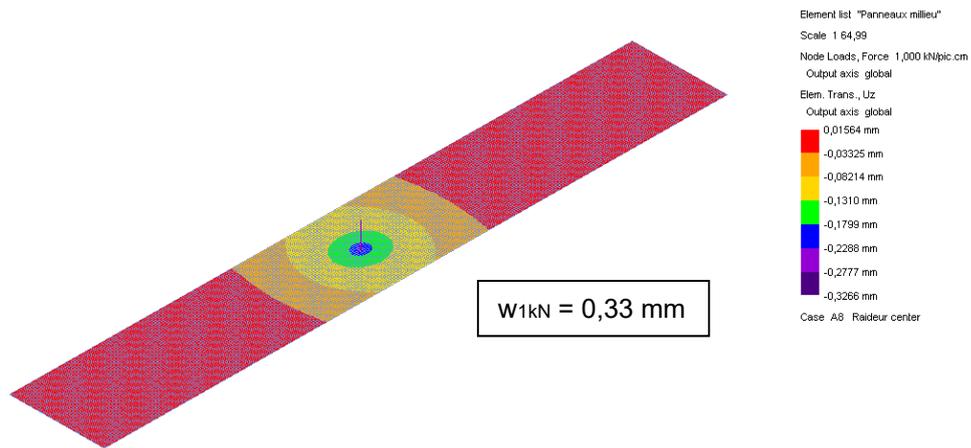


Figure 71 - Panneau central sur GSA soumis à une charge de 1 kN à mi-travée de la plus

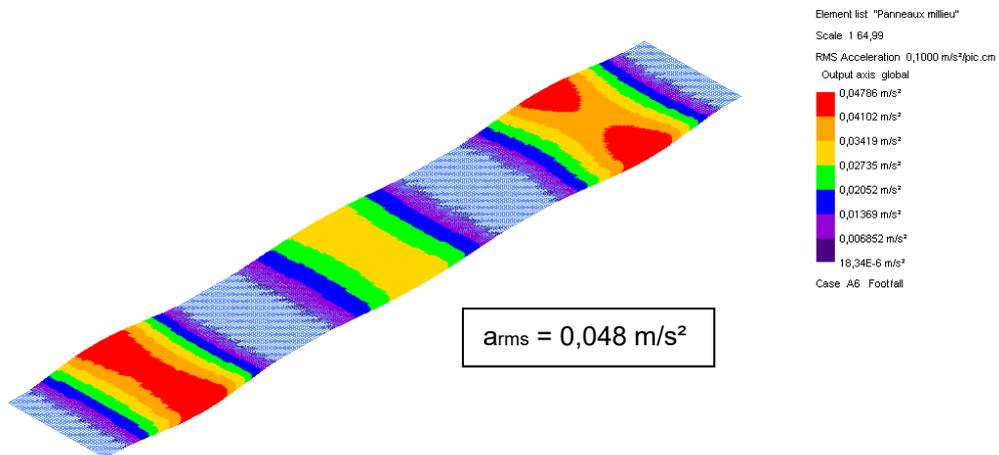


Figure 72 - Accélération de réponse à la marche des usagers du panneau central

Tableau 8 - Récapitulatif des résultats prenant en compte le couturage

	f_1	w_{1kN}	a_{rms}	Classe	
	[Hz]	[mm]	[m/s ²]	ÖNORM	SFS
Calcul analytique	6,59	0,40	-	2	E
ÖNORM b = 2,4	6,11	0,53	0,12	3	D
ÖNORM b = 7,2	6,11	0,53	0,041	1	B
GSA - Footfall	5,42	0,33	0,048	1	B

Le tableau récapitulatif montre justement que, avec la prise en compte du couturage, les planchers passent en classe 1 selon ÖNORM, ce qui est conseillé pour les planchers séparatifs de logements ou de bureaux ou salles de réunion, et en Classe B selon SFS, ce qui représente une exigence basse entre des logements contigus où la fréquence ne sera presque pas perceptible.

6.5. Etude de sensibilité

Enfin, une étude de sensibilité a été menée pour évaluer l’influence des autres paramètres sur les classements proposés vis-à-vis du confort vibratoire, notamment en considérant l’accélération comme facteur clé pour l’optimisation.

D’abord, on fait varier l’épaisseur à partir de la base de données du fabricant Stora Enso. Ci-dessous, le premier tableau compile les calculs selon ÖNORM avec et sans couturage. Le deuxième tableau synthétise à titre comparatif les calculs menés sur un plancher isolé via des modèles EF sur GSA.

Tableau 9 - Etude de sensibilité de la vibration selon ÖNORM vis-à-vis de l'épaisseur

	f_1	w_{1kN}	a_{rms}	$a_{rms,couturage}$	Classe sans couturage			Classe avec couturage		
	[Hz]	[mm]	[m/s ²]	[m/s ²]	ÖNORM	SFS	JRC	ÖNORM	SFS	JRC
180 L7s	5,27	0,68	0,12	0,041	3	D	E	1	B	D
180 L5s	5,43	0,65	0,12	0,041	3	D	E	1	B	D
200 L7s	5,06	0,74	0,12	0,040	3	D	E	1	B	D
200 L5s	6,11	0,53	0,12	0,040	3	D	E	1	B	D
240 L7s	7,10	0,38	0,12	0,038	2	D	D	1	B	D
220 L7s-2	7,48	0,35	0,12	0,039	2	D	D	1	B	C
240 L7s-2	8,69	0,25	0,12	0,038	1	D	D	1	B	C
260 L7s-2	9,59	0,22	0,11	0,038	1	D	D	1	-	C

Tableau 10 - Sensibilité de la vibration sur GSA vis-à-vis de l'épaisseur

	f_1	w_{1kN}	a_{rms}	Classe		
	[Hz]	[mm]	[m/s ²]	ÖNORM	SFS	JRC
180 L7s	4,13	0,55	0,14	-	D	E
180 L5s	4,89	0,51	0,15	3	D	E
200 L7s	4,65	0,45	0,15	3	D	E
200 L5s	5,36	0,44	0,12	3	D	E
240 L7s	6,22	0,29	0,13	2	D	E
220 L7s-2	6,79	0,29	0,13	2	D	E
240 L7s-2	7,79	0,27	0,12	2	D	D
260 L7s-2	8,26	0,22	0,11	1	D	D

Selon les méthodes ÖNORM et JRC avec un panneau isolé, il faut mettre en œuvre un plancher d'épaisseur 240 ou 260 mm pour atteindre une classe de confort vibratoire acceptable. En revanche, en considérant le couturage, tous les panneaux passent en classe 1 et il est même possible de réduire l'épaisseur à 180 millimètres, tout en assurant la performance en termes d'accélération. L'annexe nationale finlandaise se montre par contre plus conservatrice, en ne permettant pas vraiment de varier la classe si l'accélération reste invariante.

L'influence de la variation de la charge permanente est indiquée ci-dessous. Le classement selon ÖNORM est retenu pour mieux illustrer la comparaison.

Tableau 11 - Sensibilité de la vibration selon ÖNORM vis-à-vis de la charge permanente

	f_1	w_{1kN}	a_{rms}	$a_{rms,couturage}$	Classe sans couturage	Classe avec couturage
	[Hz]	[mm]	[m/s ²]	[m/s ²]	ÖNORM	
200 kg + PP	7,21	0,5	0,173	0,058	2	2
250 kg + PP	6,72	0,5	0,148	0,049	2	1
300 kg + PP	6,32	0,5	0,130	0,043	2	1
330 kg + PP	6,11	0,5	0,121	0,040	2	1
350 kg + PP	5,98	0,5	0,116	0,039	3	1
400 kg + PP	5,69	0,5	0,104	0,035	3	1
450 kg + PP	5,44	0,5	0,095	0,032	2	1
500 kg + PP	5,22	0,5	0,087	0,029	2	1

La charge permanente n'a pas de relation linéaire avec le confort vibratoire. De la même façon qu'une augmentation de charge permanente réduit l'accélération de réponse, elle réduit aussi la fréquence propre du plancher. Dans ce cas, en considérant le calcul sans couturage, il

existe une plage de sollicitations permanentes dans laquelle le confort se montre défavorable (350kg + PP et 400 kg + PP compris dans cette plage), alors que, dans le cas des panneaux assemblés, la réduction de la masse permanente se montre de cette fois-ci défavorable. Cela démontre l'absence de corrélation entre ces éléments.

Conclusion

La première partie du présent document présente les méthodologies et outils de calcul les plus répandus et utilisés par les bureaux d'études et les fabricants de panneaux pour justifier les planchers CLT. Les différentes approches de modélisation des panneaux selon leur comportement multicouche prenant en compte le cisaillement roulant ont été détaillées, ainsi que les principes de la modélisation d'une plaque orthotrope équivalente dans les logiciels de calcul par éléments finis.

Une étude comparative a montré que les logiciels de calcul et les méthodologies étudiées sont compatibles entre eux et conduisent à des résultats de dimensionnement très proches aux ELU et aux ELS, avec des écarts largement satisfaisant en termes de dimensionnement et conception des planchers. Néanmoins, des différences ont été observées vis-à-vis des critères de performance vibratoire qui pilote souvent la conception des planchers CLT d'un bâtiment.

L'étude menée dans la partie suivante a donc tenté de proposer une manière, ou plusieurs manières, de classer les planchers vis-à-vis du confort vibratoire. Un benchmarking des méthodologies existantes a été présenté et a conduit à explorer des pistes et des astuces permettant d'optimiser les planchers en termes d'épaisseur – et donc en termes de coûts – comme par exemple le choix d'une configuration multi-travées des panneaux CLT. Etant donné la diversité de paramètres pris en compte dans chaque approche, une étude comparative des méthodes s'est avérée nécessaire pour vérifier leur compatibilité et cohérence.

Dans un premier temps, les méthodologies Eurocode, annexe nationales et leurs documents scientifiques de base ont été décrits. L'approche Eurocode apparaît particulièrement limitée pour les plancher en basses fréquences, ce qui réduit drastiquement la marge d'optimisation. L'annexe nationale autrichienne et son étude de base proposent des formules et des critères assez intéressants et facilement applicables – et qui servent aujourd'hui de base de réflexion pour le développement de la méthodologie des prochaines versions des Eurocodes – mais les classements proposés sont limités et un peu vagues. L'annexe finlandaise, même si elle semble très conservatrice avec son critère d'accélération maximal, apporte par contre un classement détaillé vis-à-vis de la perception de l'utilisateur, qui est l'objectif central d'une étude de confort. Finalement, les abaques JRC présentent une méthode moins sévère, mais qui s'avère insuffisant pour traiter le cas des planchers à multi-travées, comme ceux de la Tour Silva.

En termes de comparaison, les méthodes sont globalement en accord. D'un côté, il y a une méthodologie de calcul simplifiée basée sur l'évaluation de la fréquence propre et raideur du

plancher. Et de l'autre, une véritable analyse dynamique avec une modélisation de la marche d'un usager dans un logiciel de calcul adapté (*Footfall*).

L'objectif d'optimisation du plancher est finalement atteint par une approche différente de celle à laquelle on est habitué, avec le panneau fonctionnant seul comme s'il s'agissait d'une passerelle. La modélisation d'un plancher réel composé de plusieurs panneaux CLT qui travaillent ensemble en tenant en compte des conditions d'appuis de chaque panneau peut permettre de diminuer l'accélération de réponse vibratoire, ce qui est le facteur qui pilote le classement des planchers en basses fréquences selon ÖNORM et SFS. Deux possibles études à faire a posteriori sont : une analyse plus approfondie des autres facteurs qui influent sur le calcul de l'accélération, comme l'amortissement (et peut-être augmenter les 4% préconisés) ; et une étude sur l'influence de la rigidité des assemblages de couturage entre panneaux.

Pour finaliser, une analyse de sensibilité a montré l'influence d'une variation d'épaisseur sur le classement du plancher, ainsi que l'absence de linéarité des classements par rapport aux charges permanentes.

Le développement et la fiabilisation des méthodes de calcul et de justification du confort vibratoire des planchers bois demeure un vaste sujet de recherche et un défi pour le développement futur des bâtiments bois. La présente étude, a permis de mettre en évidence la complexité de la prédiction du comportement dynamique d'un plancher du fait d'un grand nombre de facteur influençant la réponse du système, et de fournir au concepteur des pistes d'optimisation pour la conception des planchers CLT.

Bibliographie

- Arup. (2009). Footfall Vibration and Finite Element Analysis. In P. Debney, & M. Willford, *Sound & Vibration* (pp. 11-14). San Francisco: Arup.
- Autret, A., Mariette, F., & Amosse, J. (2016). *Etude virtuelle de 3 systèmes constructifs bois Cas n° 2 - Structure CLT*. Beaucauze: ADIVBois.
- Brandner, R., & Dietsch, P. (2015). Shear Properties of Cross Laminated Timber (CLT) under in-plane load: Test Configuration and Experimental Study. *INTER 2015*, (p. 13). Sibenik, Croatia.
- Dias, A., Schänzlin, J., & Dietsch, P. (2018). *Design of timber-concrete composite structures*. Aachen: Shakes Verlage Aachen.
- Faye, C., Guigou, C., & Coguenanff, C. (2017). *Comportement vibratoire et acoustique des planchers bois soumis à la marche. Etude du contexte européen*. Champs-sur-Marne: FCBA Institut Technologique.
- Fellmoser, P., & Blass, H. J. (2004). Influence of rolling shear modulus on strength and stiffness of structural bonded timber elements. *International Council for research and innovation in building and construction* (p. 9). Edinburgh, United Kingdom: University of Karlsruhe.
- FPIInnovations. (2014). *Guide technique pour la conception et la construction de bâtiments en bois de grande hauteur au Canada*. Pointe-Claire: Publication spéciale SP-55F.
- Hamm, P., Richter, A., & Winter, S. (2009). Floor vibrations - new results. *World Conference on Timber Engineering*.
- HIVOSS - Human induced Vibrations of Steel Structures. (n.d.). *Contrôle vibratoire des planchers*. Research Fund for Coal and Steel.
- JRC European commission. (2009). *Design of floor structures for human induced vibrations*. EUR 24084 EN.
- Karacabeyli, E., & Douglas, B. (2013). *CLT Handbook*. Pointe-Claire, QC: FPIInnovations.
- Kupferle, F. (2016). *Analyse comparative de divers Critères Vibratoires pour les Planchers Bois*. Wiwersheim: C4CI.
- Mansfield, E., & Kleeman, B. (1955). *A Large-Deflexion Theory for Thin Plates: A Theory based on the Assumption of an Inextensional Middle Surface of the Plate*. MCB UP Ltd.
- NF EN 1995-1-1. (2005). *Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois*.

- Nguyen, H. (2013). *Walking Induced Floor Vibration - Design and control*. Swinburne University of Technology.
- ÖNORM B 1995-1-1. (2014). *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten. Nationale Festlegungen, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen zur ÖNORM EN 1995-1-1*.
- Pecker, A. (2019). *Dynamique des Structures et des Ouvrages*. Champs sur Marne: ENPC.
- Puech, V. (2017). *CLT - Du panneau plan au mur courbe*. Montreuil: Projet de fin d'études - ENPC.
- Royer de Vericourt, R. (2011). Inextensional theory applied to cold-bent glass built-in stress evaluation. In G. P. Days, *Architectural Challenges & Solutions* (pp. 331-337). GPD.
- SFS-EN 1995-1-1. (n.d.). *EUROCODE 5: Design of Timber Structures - National Annex*. Finlande: SFS.
- Thiel, A., & Schickhofer, G. (2010). *CLTDesigner - A Software Tool for designing Cross Laminated Timber elements: 1D-Plate-Design*. WCTE.
- Toratti, T., & Talja, A. (2006). *Classification of human induced floor vibrations*. VTT Technical Research Centre of Finland.
- Wallner-Novak, M., Koppelhuber, J., & Pock, K. (2014). *Cross-Laminated Timber Structural Design - Basic design and engineering principles according to Eurocode*. Vienna: proHolz Austria.