

PROJET CIVILIF – VIBRATIONS DES PLANCHERS LEGERS

Group Induced Vibration on
Light Floors

RAPPORT FINAL



EXPERTISES

**Juin
2024**

REMERCIEMENTS

Ce travail est le fruit de la collaboration du centre technique du bois FCBA, du centre technique de l'acier CTICM et de l'école d'architecture de Bordeaux GRECCAU.

Thomas Catterou (pilote) – FCBA

Mladen Lukic – CTICM

Aline Barlet – GRECCAU

Sylvain Boulet – FCBA

Tien Minh Nguyen – CTICM

Régis Le Normand – GRECCAU

L'équipe projet souhaite remercier Etienne Marx de l'ADEME pour le suivi de projet, l'entreprise Briand pour la fourniture d'un plancher d'essai, le groupe DL océan, la région nouvelle aquitaine et le lycée Camille Jullian pour l'accès à leur plancher et enfin la mairie de Bruges pour l'accès à l'école Frida Kahlo.

CITATION DE CE RAPPORT

CATTEROU Thomas, FCBA, LUKIC Mladen, CTICM, BARLET Aline, GRECCAU, 2024. Projet GIVILIF – Charges et ressentis sur les planchers légers.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2104D0007

Étude réalisée par Thomas CATTEROU (FCBA), Mladen LUKIC (CTICM) et Aline BARLET (GRECCAU) pour ce projet cofinancé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : Thomas CATTEROU (FCBA)

Appel à projet de recherche : Vers des bâtiments responsables – Edition 2020

Coordination technique - ADEME : MARX Etienne

Direction/Service : Direction Villes et Territoires Durables/Service Bâtiment

SOMMAIRE

RÉSUMÉ.....	5
ABSTRACT	6
1. CONTEXTE ET METHODOLOGIE DU PROJET	7
1.1. Contexte normatif.....	7
1.1.1. Eurocode 3.....	7
1.1.2. Eurocode 5 – Version actuelle et version à venir	7
1.1.3. Norme ISO 2631 et 10137	8
1.1.4. Guide HIVOSS.....	9
1.1.4.1. Conditions du chargement humain.....	9
1.1.4.2. Calcul de la réponse vibratoire.....	9
1.2. Etat de l’art en recherche.....	10
1.2.1. Plancher bois	10
1.2.2. Problématiques et objectifs.....	11
1.3. Méthodologie.....	12
1.3.1. Descriptif des tâches du projet	12
1.3.2. Plan des essais.....	13
2. ESSAIS EN LABORATOIRE.....	14
2.1. Evaluation du confort sur table vibrante.....	14
2.1.2. Méthodologie.....	15
2.1.3. Essais avec sollicitations harmoniques.....	16
2.1.4. Essais avec sollicitations réalistes.....	17
2.1.5. Résultats bruts	18
2.2. Essais de chargement de groupe – planchers bois et aciers	18
2.2.1. Conception des planchers à dominante acier et bois	18
2.2.1.1. Plancher à dominante acier.....	18
2.2.2. Description des essais	20
2.2.2.1. Analyse modale, essais statiques.....	20
2.2.2.2. Essais de chargement sur plancher à dominante acier – 1 et 2 mars 2022.....	22
2.2.3. Résultats bruts	26
3. ESSAIS IN SITU.....	27
3.1. Méthodologie et recherche de sites.....	27
3.2. Structure à dominante bois : Ecole Frida Kahlo	27
3.2.1. Caractérisation du plancher	28
3.2.2. Essais avec des groupes de personnes.....	29
3.3. Structure à dominante acier : rénovation du Lycée Camille Jullian.....	30
3.3.1. Caractérisation du plancher	31
3.4. Résultats bruts.....	33
4. LIEN ENTRE CONFORT ET GRANDEURS PHYSIQUES	34

4.1.	Contexte et état de l'art.....	34
4.2.	Enquête auprès d'habitants de logements avec plancher bois.....	34
4.3.	Essais en laboratoire.....	36
4.3.1.	Essais sur table sismique.....	36
4.3.1.1.	Sollicitations sinusoïdales harmoniques.....	36
4.3.1.2.	Sollicitations réalistes.....	38
4.3.2.	Essais sur plancher bois en laboratoire.....	40
4.4.	Essais in situ.....	42
4.4.1.	Essais à l'école Frida Kahlo.....	43
4.4.2.	Essais au lycée Camille Jullian.....	45
4.5.	Discussion sur les seuils de tolérance.....	46
5.	MODELISATION DU CHARGEMENT.....	48
5.1.	Modèle de charge pour une personne.....	48
5.1.1.	Thèse de doctorat d'El Asri [18].....	48
5.1.2.	Méthode d'identification du modèle de charge pour une personne.....	50
5.1.3.	Modèle de charge pour une personne pour le jumping jack et la course sur place.....	51
5.1.3.1.	Paramètres du modèle de charge pour le jumping jack.....	51
5.1.3.2.	Paramètres du modèle de charge pour la course sur place.....	52
5.2.	Modèle de charge pour un groupe de personnes.....	53
5.2.1.	Thèse de doctorat d'El Asri.....	53
5.2.2.	Coefficient de réduction.....	53
6.	CONCLUSION / PERSPECTIVES.....	55
7.	VALORISATION – DIFFUSION DU PROJET.....	56
7.1.	Article de journal : Human perception of lightweight floors vibrations, New Investigations to Improve Wood Building Performances (GIVILIF Project).....	56
7.2.	Présentation en conférence : Lightweight floors vibrational comfort, first experimental results of the GIVILIF project.....	56
7.3.	Article de congrès : Crowd size effect on floor vibration response due to random and rhythmic excitations.....	56
7.4.	Thèse : Vibration of floor structures subjected to crowd-rhythmic activities.....	57
7.5.	Présentation du projet en vidéo.....	57
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	58
	INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	60

RÉSUMÉ

L'utilisation de matériaux légers fait apparaître le besoin de prendre en compte les vibrations lors du dimensionnement des planchers afin de garantir, au-delà de la stabilité du bâtiment, le confort des usagers. L'essor de la construction en acier ou en bois ne pourra avoir lieu que si les bâtiments offrent un niveau de confort équivalent ou meilleur que celui des solutions plus habituelles, afin d'avoir une acceptation sociale de ces bâtiments, plus en phase avec les enjeux actuels d'évolutivité, de capacité de démontage, de réduction des impacts environnementaux.

Les deux objectifs du projet sont d'améliorer la modélisation des sources de vibrations, notamment les groupes de personnes, et définir des seuils d'acceptabilité. La principale difficulté du projet est la prise en compte de la variabilité des types de marche et de ressenti pour définir des règles de dimensionnement simples mais néanmoins pertinentes.

Des essais en conditions contrôlées dans un laboratoire sont d'abord effectués pour identifier les facteurs principaux d'inconfort et définir des protocoles d'essais n'introduisant pas de biais. Puis des essais in situ sont réalisés pour observer les niveaux de vibration et d'inconfort dans des configurations réalistes. Les planchers ont été instrumentés et les participants ont été interrogés et leurs indicateurs physiologiques ont été mesurés.

L'ensemble de ces expérimentations a permis de définir, dans des conditions particulières, des niveaux enveloppes d'accélération qui pourraient mener à de l'inconfort modéré ou insupportable. De plus, des modèles de charge des planchers en fonction du nombre d'occupant ont pu être établis et pourront être intégrés dans les prochaines règles de dimensionnement.

ABSTRACT

The new use of lightweight materials highlights the need to take vibrations into account when sizing floors to guarantee not only building stability, but also user comfort. The rise of steel and wood construction can only take place if the buildings offer a level of comfort that matches or surpasses that of more conventional solutions to gain social acceptance of these buildings, which are more in tune with today's challenges of scalability, dismantling capacity and reduced environmental impact.

The two objectives of the project are to improve modelling of vibration sources, particularly groups of people, and to define acceptability thresholds. The main difficulty of the project is to consider the variability of walking patterns and sensations to define simple yet relevant sizing rules.

First, tests were carried out under controlled conditions in a laboratory to identify the main factors of discomfort and define test protocols that would not introduce bias. Then in situ tests were carried out to observe vibration and discomfort levels in realistic configurations. Floors were instrumented, participants were interviewed, and their physiological indicators were measured.

All these experiments have made it possible to define, under specific conditions, envelope acceleration levels that could lead to moderate or unbearable discomfort. In addition, floor load models have been established as a function of the number of occupants, which can be incorporated into future design rules.

Le projet GIVILIF est un projet en collaboration entre le centre technique du bois FCBA, le centre technique de l'acier CTICM et l'école nationale supérieure d'architecture et de paysage de Bordeaux ENSAP. Il a débuté en juillet 2021 pour une durée de trois ans. Le présent document vise à synthétiser l'ensemble des travaux réalisés durant ce projet.

1. Contexte et méthodologie du projet

Une des solutions mises en œuvre par le secteur de la construction pour répondre aux défis de la soutenabilité s'appuie sur le développement de la filière sèche. Cela nécessite cependant de faire évoluer les façons de concevoir, très marquées par des habitudes liées à l'usage du béton, matériau plus rigide et lourd. L'utilisation de matériaux légers fait apparaître le besoin de prendre en compte les vibrations lors du dimensionnement des planchers afin de garantir, au-delà de la stabilité du bâtiment, le confort des usagers. Pour cela, il faut pouvoir modéliser ces sollicitations de la façon la plus réaliste possible.

Ces vibrations sont principalement dues aux déplacements individuels ou de foule ou à des activités de groupe synchrones ou asynchrones (danse, gymnastique...), qui dépendent du type de bâtiment en termes de programmes et d'usages. Ces vibrations peuvent occasionner une gêne chez les usagers.

1.1. Contexte normatif

1.1.1. Eurocode 3

L'Eurocode 3 partie 1-1 (NF EN 1993-1-1), qui traite le dimensionnement des structures métalliques, fournit peu d'éléments pour le dimensionnement d'une structure vis-à-vis du confort vibratoire. La norme ne demande que la vérification de la fréquence propre du mode fondamental de vibration du plancher à l'état limite de service qui doit être supérieure à la fréquence limite dont la valeur est indiquée dans l'Annexe nationale française à la norme :

- Pour les habitations et les bureaux : $f_1 \geq 2,6 \text{ Hz}$
- Pour les gymnases et les salles de danse : $f_1 \geq 5 \text{ Hz}$

La fréquence propre est déterminée pour des combinaisons d'actions à l'état limite de service qui comprennent le poids propre et 20% de la charge d'exploitation. Lorsque les conditions ci-dessus ne sont pas satisfaisantes, la norme demande une analyse plus affinée de la réponse dynamique de la structure, en tenant compte de l'amortissement, et de limiter les accélérations maximales des planchers aux valeurs spécifiées pour le projet dans les documents du marché.

1.1.2. Eurocode 5 – Version actuelle et version à venir

L'Eurocode 5 actuel [1], qui traite du dimensionnement des structures bois hors séisme, contient un chapitre traitant des vibrations de plancher. L'Eurocode 5 demande trois vérifications.

- La fréquence du plancher doit être supérieure à 8 Hz ; dans le cas contraire les critères proposés par l'Eurocode ne sont pas valables et une étude spécifique doit être menée.
- La flèche statique du plancher soumis à un effort (sa souplesse) doit être inférieure à une valeur " a ".
- La vitesse du plancher soumis à une force impulsionnelle doit être inférieure à une certaine valeur.

$$\begin{aligned} f_1 &\geq 8 \text{ Hz} \\ w/F &< a \\ v &< b(f_1 \xi^{-1}) \end{aligned}$$

Où :

- f_1 : fréquence propre du plancher en Hz
- w : flèche statique en mm
- F : force ponctuelle appliquée en N
- v : vitesse du plancher après impact en m/s
- ξ : amortissement modal du plancher (sans unité)

Les valeurs des coefficients a et b à ne pas dépasser sont données par la figure 1.

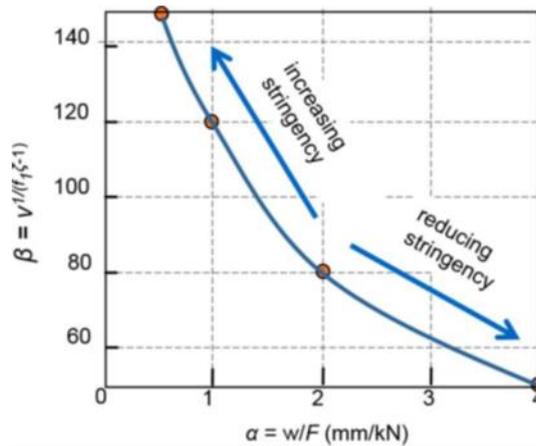


Figure 1 - valeurs des coefficients a et b [2]

Ces résultats sont basés sur les travaux de Ohlsson [2] en 1988. On peut regretter qu'il ne se basent pas sur des grandeurs mesurables (vitesse, accélérations...) et ne concernent que les planchers ayant des fréquences de vibrations supérieures à 8 Hz.

Dans la version à venir de l'Eurocode 5, le nombre de pages dédiées à la vibration de plancher passera de 2 à 15. La norme proposera une méthode de calcul approfondie des paramètres dynamiques des planchers, en dessous ou au-dessus de 8 Hz. Enfin, un tableau permettra de classer les planchers suivant des niveaux de performances de I à VI.

Critère	Niveau de performance du plancher					
	I	II	III	IV	V	VI
Facteur de réponse R	4	8	12	24	36	48
Limite de flexion (mm)	0,25		0,5	1.	1,5	2
Critère de raideur (mm)	$w_{1kN} < w_{maxi}$					
Critère de fréquence (Hz)	$f_1 > 4,5$					
Critère en accélération pour les planchers résonnants (m/s^2)	$a_{RMS} \leq 0,005 R$					
Critère de vitesse	$v_{RMS} \leq 0,0001 R m/s$					

Tableau 1 : Critères de performance des planchers [3].

A l'heure où ce rapport est écrit, aucune recommandation n'a été formulée sur l'acceptabilité ou non d'un plancher avec une performance fixée dans un usage précis, par exemple pour un bâtiment résidentiel ou un bâtiment sensible (hôpital). A noter aussi que la traduction officielle du Tableau 1 n'a pas encore été réalisée, les termes peuvent donc différer avec la version à venir de l'Eurocode.

1.1.3. Norme ISO 2631 et 10137

La norme ISO 2631 [4] traite de l'exposition des individus à des vibrations. Cette norme ne traite pas particulièrement de problématiques de génie civil, au contraire elle est plutôt associée aux vibrations liées à des machines et ses conséquences sur la santé. Néanmoins, les outils de mesurage de la vibration sont applicables. La grandeur de référence pour l'ISO 2631 est l'accélération efficace. La norme précise que dans le cas d'une sollicitation transitoire (ce qui est typiquement le cas pour la marche ou les perturbations dans le bâtiment), il convient de calculer la valeur efficace mobile avec pour recommandation d'effectuer des calculs sur une seconde (§6.3.1).

La norme ISO 10137 [5] se base sur l'accélération efficace à l'aide de la norme ISO 2631 et définit des seuils acceptables pour les bâtiments et les passerelles. Les seuils sont présentés sur la Figure 2. A noter que ces seuils sont valables pour des sollicitations continues, durant plus de 30 min par jour. Dans le cas d'une

sollicitation ponctuelle, il est envisageable de dépasser ces seuils. Le premier niveau correspond à la perception des vibrations, les suivant à des applications de plus en plus « permissives ». A noter que la plage 4-8 Hz est celle où le seuil de tolérance est le plus bas car les fréquences propres des organes humains se situent dans cet intervalle.

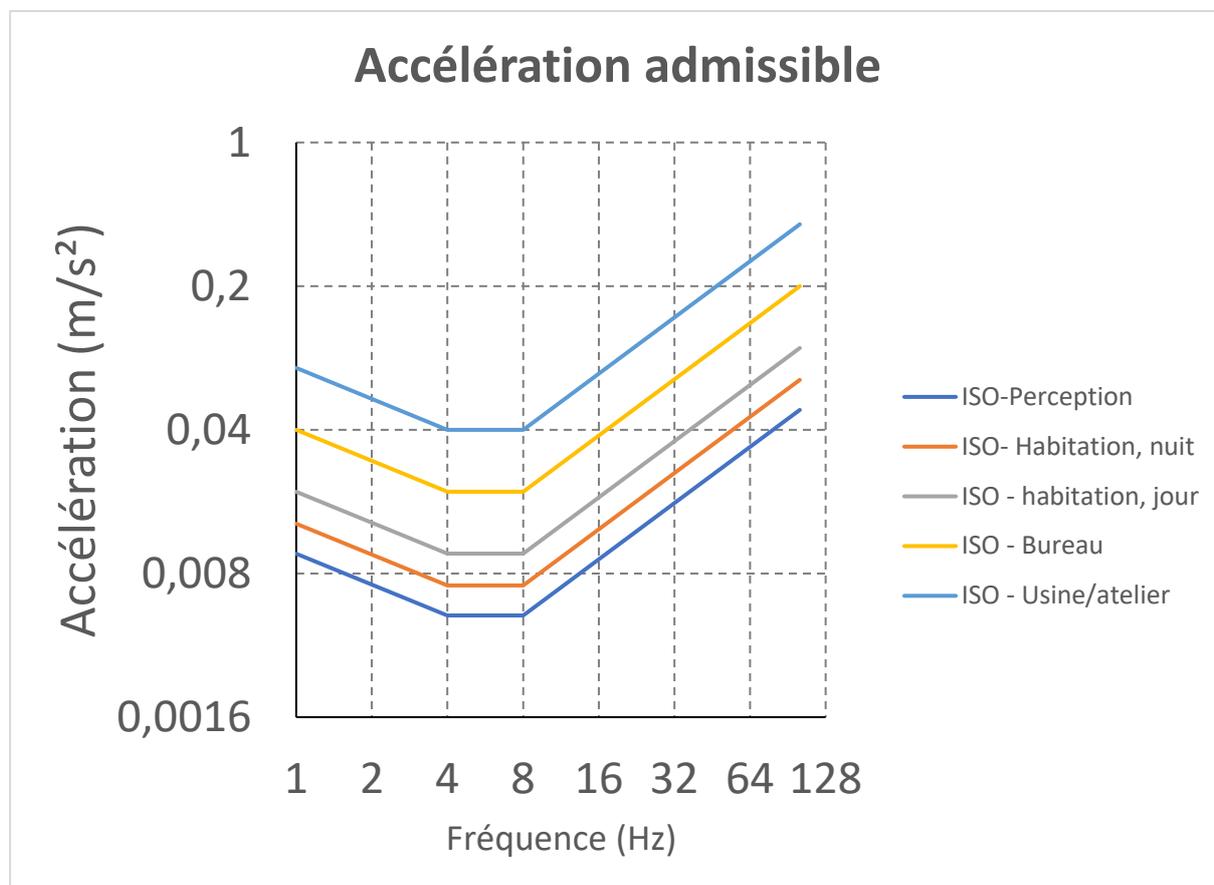


Figure 2 : Seuil d'acceptabilité du niveau d'accélération verticale suivant la fréquence [5]

1.1.4. Guide HIVOSS

Ce guide émane du projet de recherche de la CECA « Vibrations of Floors » (VoF) [6] achevé en 2004. Il découle d'une dissémination des résultats de ce dernier, finalisée en 2008, et propose une méthode spectrale, présentée sous forme d'abaques, permettant d'évaluer simplement l'acceptabilité des vibrations induites par l'homme.

1.1.4.1. Conditions du chargement humain

Le guide vise l'évaluation du confort vibratoire des planchers soumis aux vibrations verticales causées par la marche de courte durée d'une seule personne. Les personnes recevant les vibrations peuvent être debout, assises ou allongées sur le plancher.

1.1.4.2. Calcul de la réponse vibratoire

La réponse adoptée par ce guide est intitulée OS-RMS90 ; c'est la valeur efficace de réponse en vitesse d'un seul pas de la marche d'une personne, couvrant 90 % de personnes marchant normalement.

Cette valeur est obtenue à partir d'abaques établis dans le cadre du projet VoF [6], en se basant sur les principes de la norme DIN 4150-2 [6]. Elle dépend donc à la fois de la fréquence propre, de la masse généralisée (appelée « masse modale » dans le guide, à ne pas confondre avec la « masse modale effective » utilisée dans le calcul parasismique) et de l'amortissement du plancher.

La force excitatrice est représentée par le biais d'un polynôme de degré 8. Ainsi, les caractéristiques dépendent de la fréquence de marche. Un amortissement est calculé en sommant les contributions liées à la structure, au mobilier et aux finitions. Enfin, un modèle semi-probabiliste permet de calculer la réponse vibratoire du plancher et de valider son usage suivant le type d'emploi.

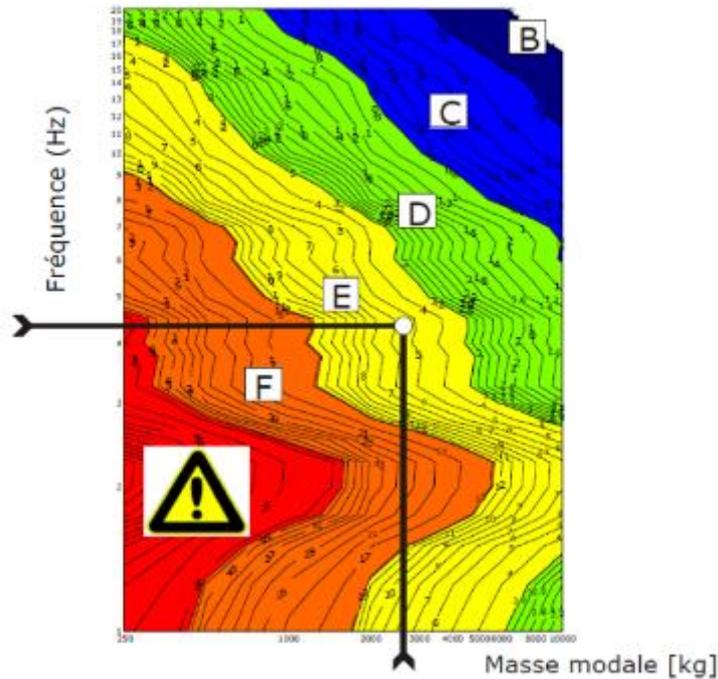


Figure 3 : Exemple d'abaques pour déterminer l'OS – RMS₉₀ [7]

Le guide propose des niveaux d'acceptabilité qui dépendent de la valeur d'OS-RMS90 obtenue lors de l'étape précédente et du type d'usage du plancher.

1.2. Etat de l'art en recherche

1.2.1. Plancher bois

Des études spécifiques aux planchers bois ont montré que l'étude unique de l'accélération ou de la vitesse du plancher soumis au chargement dynamique n'était pas suffisante pour qualifier la qualité d'un plancher en termes de confort vibratoire. Hu et Chui [9] ont proposé un critère empirique très simple basé sur un ratio entre la déformée statique d_1 et la fréquence du plancher f_1 :

$$\frac{f_1}{d_1^{0.44}} > 18,7$$

Weckendorf [10], [11] a récemment résumé les différents types de critères existants et les a appliqués dans le cadre de planchers en CLT. Patricia Hamm [12] a mis en avant que la connaissance de la fréquence propre n'est pas suffisante pour quantifier le confort, puisque certains planchers avec de fortes fréquences de résonance (supérieures à 20 Hz) sont jugés inconfortables (voir Figure 4). Enfin, en 2018, des chercheurs internationaux se sont regroupés pour synthétiser les données des essais effectués et les critères issus des différentes recherches pour aboutir à un critère ISO satisfaisant [13]. Il a été mis en avant dans ces travaux que la sensibilité aux vibrations est culturelle et varie d'un pays à l'autre en fonction notamment de la confrontation plus ou moins fréquente à des vibrations.

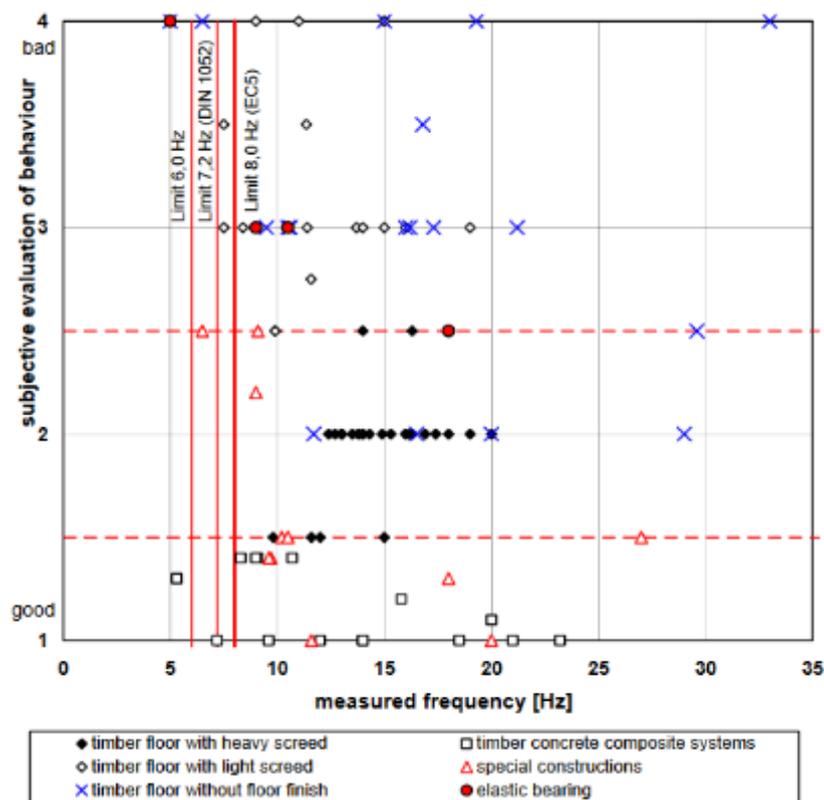


Figure 4 : Evaluation du confort pour différents types de plancher en fonction de leur fréquence [12]

1.2.2. Problématiques et objectifs

Le grand nombre de normes, guides et d'études existantes sur le sujet de la vibration des planchers montrent l'intérêt de la problématique mais aussi sa complexité. La problématique relevant de la dynamique des structures, elle nécessite de connaître la masse modale et l'amortissement des planchers, deux grandeurs parfois difficiles à estimer. De plus, la génération et la perception des vibrations sont liées à l'humain et sont extrêmement variables en fonction des individus.

Les études précédentes présentent deux aspects peu traités que ce projet propose d'étudier en détail :

- Le chargement, pris en compte dans les normes et les études, est le plus souvent la marche d'une personne isolée. Dans beaucoup de cas, un groupe d'individus sera en action en même temps sur le plancher et la sollicitation induite dépendra de leur niveau de coordination. Une étude plus approfondie sera réalisée sur la modélisation des chargements induits par différentes activités suivant la taille des groupes d'individus.
- Le confort psychosensoriel lié aux vibrations est influencé par la culture. Dans certains pays, la sensibilité est plus ou moins forte suivant que la population a été ou non sensibilisée tôt à des forts niveaux de vibrations. Les études précédentes ont une approche « mathématique » de la définition du confort. Il est recherché le meilleur critère permettant de dissocier les réponses « confort » et « inconfort » parmi un panel de participants à des tests. Dans le cadre de ce projet, il est proposé d'effectuer des essais avec des personnes de nationalité française et d'origine diverse, ce qui a été peu réalisé par le passé. De plus, l'objectif initial est de comprendre les phénomènes amenant à considérer qu'un plancher est inconfortable ou non afin de fixer au mieux la limite de dimensionnement.

1.3. Méthodologie

1.3.1. Descriptif des tâches du projet

Le projet est organisé en quatre tâches, auxquelles s'ajoutent deux tâches de pilotage et de communication. Deux tâches concernent les mesures, respectivement dans des bâtiments existants et en laboratoire. Les essais en laboratoires permettent de bien calibrer les essais dans un environnement contrôlé et d'identifier séparément les facteurs pouvant être source d'inconfort. Les essais in situ permettent d'évaluer les effets des vibrations dans un environnement plus réaliste et valider les modèles et les seuils définis dans le cadre de ce projet. L'ensemble des essais ont été réalisés sur des planchers à dominante bois et sur des planchers à dominante acier.

Tâches et sous-tâches	Année 1						Année 2						Année 3					
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36
Tâche 1 : Pilotage																		
Tâche 2 : Mesures sur des bâtiments existants																		
2.1 Identification lieux d'essais																		
2.2 Protocoles de mesure																		
2.3.1 Mesures préliminaires																		
2.3.2 Mesures grands planchers																		
2.4 Analyse des données																		
Tâche 3 : Essais sur plancher en laboratoire																		
3.1 Plan d'expérience																		
3.2 Conception et réalisation																		
3.3 Phase d'essai																		
3.4 Interprétation des résultats																		
Tâche 4 : Lien entre confort et grandeurs physiques																		
4.1 Enquête in situ																		
4.2 Protocole expérimental																		
4.3 Recueil des données en laboratoire																		
4.4 Analyse des données																		
Tâche 5 : Modélisation numérique																		
5.1 Modélisation du problème																		
5.2 Calculs temporels																		
5.3 Calculs simplifiés																		
5.4 Détermination du confort																		
5.5 Application cas réels																		
Tâche 6 : Valorisation des résultats																		

Tableau 2 : Descriptif des tâches et répartition sur la durée du projet

Les deux objectifs du projet GIVILIF sont d'améliorer la modélisation du chargement pour un groupe de personnes et de définir les seuils de sensibilité les plus pertinents. Les deux autres tâches traitent ces

problématiques, en lien étroit avec les activités d'essais et leur post-traitement. Le **Erreur! Source du renvoi introuvable.** présente l'ensemble des tâches et leur répartition sur la durée du projet.

1.3.2. Plan des essais

Le projet GIVILIF étant centré sur la génération de signaux et le ressenti de personnes, il a nécessité un grand nombre d'essais avec des volontaires.

Date	Type d'essai	Nombre de participants
1 ^{er} – 2 mars 2022	Activité rythmique sur plancher acier en labo	32
1 ^{er} – 2 mars 2022	Sollicitation sur table vibrante à FCBA Bordeaux	24
5 avril 2022	Sollicitation sur table vibrante à FCBA Bordeaux	16
Avril-mai 2022	Essais « machine »	/
10 mai 2022	Activité rythmique et confort sur plancher bois en labo	20
24 mai 2022	Activité rythmique et confort sur plancher bois en labo	20
5 avril 2023	Pré-essais au lycée Camille Jullian	/
26 mai 2023	Préparation des essais in situ sur maquette d'essai à FCBA	16
23 octobre 2023	Essais in situ à l'école Frida Kahlo (Dominante bois)	20
19 février 2024	Essais in situ au lycée Camille Jullian (Dominante acier)	20
30 mai 2024	Sollicitation sur table vibrante à FCBA Bordeaux	30

Tableau 3 : Descriptif des essais

2. Essais en laboratoire

Les différents essais en laboratoire ont permis de fournir des données à la fois pour alimenter les modèles de chargement et pour quantifier les seuils de vibrations acceptables, afin d'alimenter les tâches 4 et 5 présentées dans les parties suivantes. Les protocoles d'essais ont évolué au fil des essais pour prendre en compte l'expérience accumulée et retirer des biais sur l'estimation des seuils de confort. Seul la méthodologie et les résultats bruts sont présentés dans cette partie, l'analyse fine des résultats sera présentée dans les parties 5 et 6.

2.1. Evaluation du confort sur table vibrante

Pour chacun des essais, des enquêtes et parfois des mesures physiologiques ont été réalisées. La méthodologie de ces enquêtes est présentée dans la partie 5.1.

2.1.1. Réponses physiologiques

Les récepteurs sont équipés chacun d'une ceinture connectée positionnée au niveau du sternum afin de récupérer les réponses physiologiques de leur corps durant les essais. Un smartphone (Figure 6) est associé à chacune des ceintures de cardiofréquencemètre afin de recueillir les données mesurées et cela pour toute la durée des essais.



Figure 5 : Ceinture connecté Polar H10 pour les données physiologiques

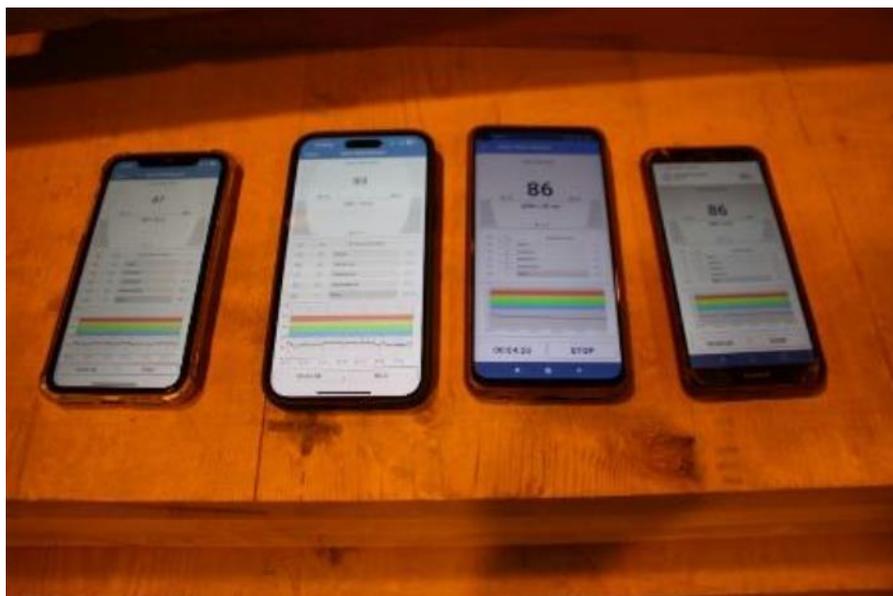


Figure 6 : Smartphones connectés aux ceintures polar H10 via l'application HR Monitor pour l'enregistrement des données physiologiques

Pour les données physiologiques, elles ont été récupérées grâce au logiciel KUBIOS qui permet d'obtenir un signal temporel à partir des mesures faites avec les ceintures connectées et les smartphones. Un pas de temps précis est défini pour chaque essai de sollicitation afin de récupérer des valeurs d'indicateurs fiables correspondant exactement au temps de la stimulation.

Le stress agit comme un réflexe à la suite duquel le système nerveux réagit. Tous les indicateurs qui ont été retenus pour les campagnes de mesures de GIVILIF sont liés au système nerveux et peuvent, par conséquent, être associés à l'évolution des conditions de stress de l'individu.

Des techniques non invasives pour la détermination de l'activité du système nerveux autonome sont utilisés dans la cadre du projet, les indicateurs suivants sont mesurés :

- la fréquence cardiaque moyenne (bpm). Elle sera notée FC ;
- l'indice de stress mesuré, noté SI ;
- la variabilité de la fréquence cardiaque notée VFC (Figure 7) ;



Figure 7 - Intervalle R-R (ms)

La VFC peut être appréciée à l'aide de différentes variables (recommandées par la Task Force of The European Society of Cardiology) :

- Dans le domaine temporel avec la moyenne quadratique des différences entre les battements cardiaques (RMSSD).
- Dans le domaine fréquentiel (qui renseigne sur la distribution des ondes en fonction de leur fréquence), les variables fréquentielles représentatives de la VFC sont les logarithmes des rapports des basses fréquences sur les hautes fréquences et les logarithmes des hautes fréquences.

Les deux méthodes d'analyse spectrale les plus communément employées pour l'étude de la variabilité de la fréquence cardiaque à court terme sont les transformées rapides de Fourier (FFT) et la méthode autorégressive (AR) qui sont respectivement non-paramétriques et paramétriques

En effet, le concept est que si la fréquence cardiaque augmente alors il y a un lien avec la RMSSD et le taux de hautes fréquences cardiaques (HF), qui elles vont diminuer. Cela traduit alors que l'individu se trouve dans un état de stress apparent. Tout cela est lié au système nerveux autonome du corps humain qui possède un équilibre entre une activité sympathique et une activité parasympathique [14]. La première est globalement stimulante et activatrice, elle répond aux stimulus de type stress ou effort physique. La seconde est globalement sédative, elle stimule la digestion et la relaxation.

Les données ont été enregistrées toutes les secondes et il est regardé suivant les cas une valeur moyenne ou une valeur maximale de l'indicateur.

2.1.2. Méthodologie

Un des objectifs du projet est d'améliorer les critères de confort pour les rendre plus pertinents vis-à-vis de la problématique des planchers légers. Il est nécessaire pour cela de faire le lien entre les grandeurs physiques mesurées sur un plancher durant un chargement dynamique et le niveau d'inconfort ressenti. Cette dernière notion étant en partie subjective, la variabilité des résultats attendus est très grande.

Pour répondre à cette problématique, des essais ont été réalisés sur la table vibrante deux axes du FCBA (le Tesseract). Des volontaires ont été assis ou couchés sur la table et soumis à des sollicitations verticales harmoniques de faibles intensités. Ils avaient pour consigne d'indiquer s'ils percevaient la vibration (niveau 1), si elle était dérangeante (niveau 2) ou si elle était insupportable (niveau 3). Trois sessions d'essais ont été réalisées (voir Figure 8 et Figure 9).



Figure 8 : Essais du 1er et 2 mars 2022, deux personnes assises, une personne couchée



Figure 9 : Essais du 18 mars et du 5 avril 2022, 4 personnes assises

Les essais de mars et avril 2022 ont consisté en des sollicitations harmoniques à différents niveaux de fréquence et de déplacement. L'objectif de ces essais étaient de fournir des informations préalables sur les seuils de confort et sur les conditions d'essais afin de préparer au mieux les essais à suivre sur plancher et in situ.

2.1.3. Essais avec sollicitations harmoniques

Les participants ont été soumis à un sinus harmonique continu pendant une minute. Les signaux ont été choisis en faisant varier le déplacement crête de 0,01mm à 1 mm et la fréquence de 1 à 16 Hz, ce qui induit la valeur de l'accélération crête. Pour un groupe d'individu donné, les essais ont été réalisés pour un niveau de déplacement en faisant monter progressivement la fréquence jusqu'à ce que les vibrations soient perçues comme insupportables.

Dans tous les cas, les essais n'ont pas dépassé 1 m/s^2 (zone rouge) puisque à partir de cette valeur tous les règlements internationaux jugent les vibrations insupportables et qu'il pourrait y avoir des risques pour les participants.

Ces essais ont permis de donner une première estimation des valeurs de déplacements, d'accélération ou de fréquence où la gêne commence à apparaître.

Une fiche d'enquête a été réalisée pour chaque participant pour connaître ses caractéristiques personnelles (poids, taille, âge etc...) mais aussi sa sensibilité vis-à-vis des vibrations (Figure 10). Pour chaque fréquence, il est indiqué si un seuil a été franchi lors de la sollicitation (perception -1, inconfortable-2, insupportable-3).

X = 0.01mm

Signal 1

Date/...../2022

Heure

Réf/sujet

Position

Sexe

Age

Profession

Identité Culturelle

Taille

Poids

1Hz2Hz3Hz4Hz

5Hz6Hz7Hz8Hz

9Hz10Hz11Hz12Hz

13Hz14Hz15Hz16Hz

Sensibilité aux mouvements de type :

Mal de transport	Espaces de vie / de circulation	Autres
Voiture <input type="checkbox"/>	Escaliers <input type="checkbox"/>
Train <input type="checkbox"/>	Passerelles <input type="checkbox"/>
Bateau <input type="checkbox"/>	Planchers <input type="checkbox"/>
Autres	Autres

Pas de perception
Perception
Désagréable mais acceptable
Intolérable

Observations_effets post-tests

.....

.....

Figure 10 - Fiche d'évaluation vis à vis des vibrations

A noter qu'une sollicitation harmonique est très contraignante : dans la réalité, les signaux de forte intensité ne dureront que quelques secondes. A priori, les seuils de tolérance devraient pouvoir être plus haut que ce qui a été déterminé lors de ces essais.

2.1.4. Essais avec sollicitations réalistes

La notion de confort est très liée à l'environnement d'essai. En effet, le mouvement des personnes autour des récepteurs peut affecter leurs réponses, puisqu'ils ressentiront une gêne visuelle ou auditive indépendamment de la gêne liée aux vibrations. Une dernière série d'essai a été réalisée sur la table vibrante du FCBA. Le protocole des essais de 2022 sur la table vibrante a été repris, en modifiant certains paramètres :

Les sollicitations ne sont plus des excitations sinusoïdales, mais des sollicitations issues des mesures in situ réalisées à Frida Kahlo et Camille Jullian.

Les sollicitations sont effectuées les unes à la suite des autres avec des pauses de 1 mn, sans que les récepteurs ne se lèvent de leurs chaises. L'objectif est d'éviter de perturber le rythme cardiaque par le passage d'une position assise à une position debout.

Les essais réalisés en mai 2024 ont donc consisté en des sollicitations réelles sur la base de ce qui a pu être enregistré lors des mesures in situ. L'objectif était de conforter les seuils déterminés préalablement dans des conditions où il n'y a pas de stimulus visuels, puisqu'il n'y a pas besoin de générateurs pour réaliser la vibration.

Pour chaque signal, il est demandé de la même manière que pour les essais précédents si les récepteurs ressentent la vibration ou la juge désagréable / insupportable. Pour rappel, le niveau de ressenti est indiqué par 4 grades : pas de perception (0), perception (1), désagréable (2), insupportable (3).

2.1.5. Résultats bruts

L'exploitation des résultats sera réalisée dans les parties 4 et 5. De la même façon que pour les essais sur planchers, les résultats bruts ne sont pas indiqués dans ce rapport pour ne pas rendre la lecture rébarbative. Le lecteur intéressé pourra se référer au rapport des essais en laboratoire du projet [15].

2.2. Essais de chargement de groupe – planchers bois et aciers

Deux planchers, un à dominante acier et un à dominante bois, ont été réalisés et testés dans le laboratoire du FCBA. La conception a été soigneusement étudiée pour être à la fois représentative d'un plancher réel, mais aussi pour que le comportement du plancher permette de bien mesurer des niveaux de chargement et des seuils de confort.

2.2.1. Conception des planchers à dominante acier et bois

2.2.1.1. Plancher à dominante acier

La conception de l'échantillon d'essai a été définie par le CTICM. La réalisation du plancher a été confiée au groupe Briand. Le coulage de la dalle béton a été confié à la compagnie Fadel. La structure d'étude est un plancher mixte acier-béton ayant une dalle mixte avec bac acier collaborant, reposant sur des poutres secondaires qui sont posées à leur tour sur des poutres principales appuyées sur des poteaux. Le plancher est constitué d'un seul panneau, composé de poutres « cadres » (poutres principales de 8 m de portée et poutres secondaires de rive de 7 m de portée) et de poutres secondaires intermédiaires (de 2,6 m d'entraxe). Une connexion complète est adoptée pour les poutres « cadres » et partielle pour les poutres intermédiaires.

Les âmes des poteaux sont positionnées suivant le sens de portée des poutres principales (pour assurer plus de raideur dans cette direction). Les poteaux sont de hauteurs différentes allant de 425 mm à 600 mm compte tenu du relief du sol. La

Figure 11 présente une vue isométrique du plancher. La Figure 12 montre le plancher réalisé après le coulage de la dalle dans le bac acier.

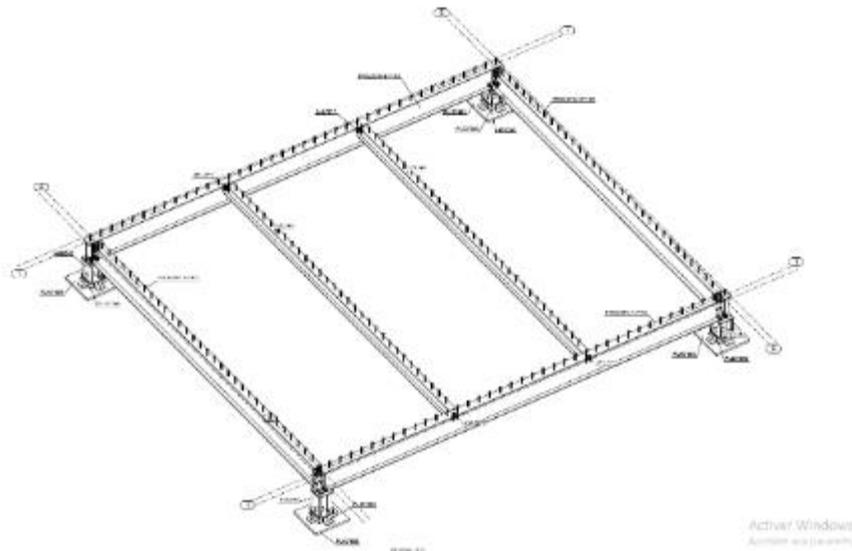


Figure 11 : Vue isométrique du plancher acier



Figure 12 : Vue du plancher acier après coulage de la dalle béton

Le plancher a été étudié du point de vue dynamique pour prédire ses propriétés vibratoires. Pour cela, une modélisation des éléments finis à l'aide du logiciel Ansys a été mise en place et a permis de calculer les différents modes de vibrations du plancher. La comparaison entre essais et modélisation sera détaillée dans la partie 5.

2.2.1.2. Plancher à dominante bois

Un plancher à dominante bois a été réalisé et testé au laboratoire du FCBA. Il s'agit d'un plancher composé de panneaux OSB fixés sur des solives en lamellé collé GL24. Une chape sèche composée de plaques de Fermacell a été agrafée en partie supérieure. Le plan du plancher est indiqué en Figure 13.

Ce plancher a été dimensionné de façon à être à la limite de confort suivant l'Eurocode 5 actuel. La fréquence propre prévisionnelle du plancher est de 8 Hz. Les critères de flèches sont respectés au plus juste. Le plancher est donc au plus souple de ce que permet la réglementation. L'objectif est de vérifier les niveaux de confort dans le cas d'un plancher ayant une conception « à risque » vis-à-vis de la vibration.

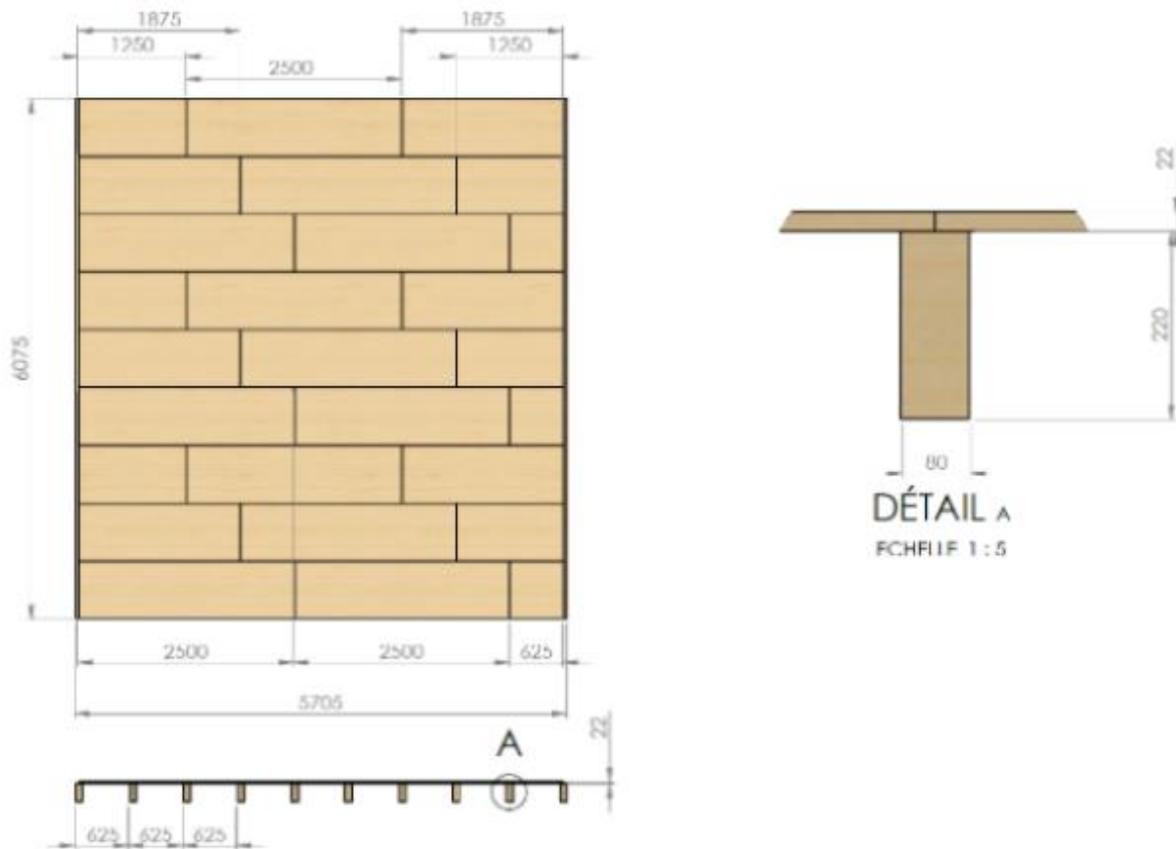


Figure 13 : Plan du plancher à dominante bois

2.2.2. Description des essais

2.2.2.1. Analyse modale, essais statiques

La complexité des planchers fabriqués induit que leurs propriétés statiques et dynamiques réelles sont différentes des propriétés calculées lors de leur conception. Des mesures ont donc été réalisées en amont des essais avec les sujets générateurs pour bien qualifier le plancher et pouvoir ensuite être précis sur la détermination des modèles de chargement et des seuils de confort.

La mesure statique consiste à déterminer la raideur du plancher en plaçant une masse en son centre. Un comparateur est utilisé pour mesurer le déplacement engendré. Le coefficient directeur de la droite flèche / masse appliquée donne la raideur du plancher. La Figure 14 illustre la méthode pour les essais statiques.

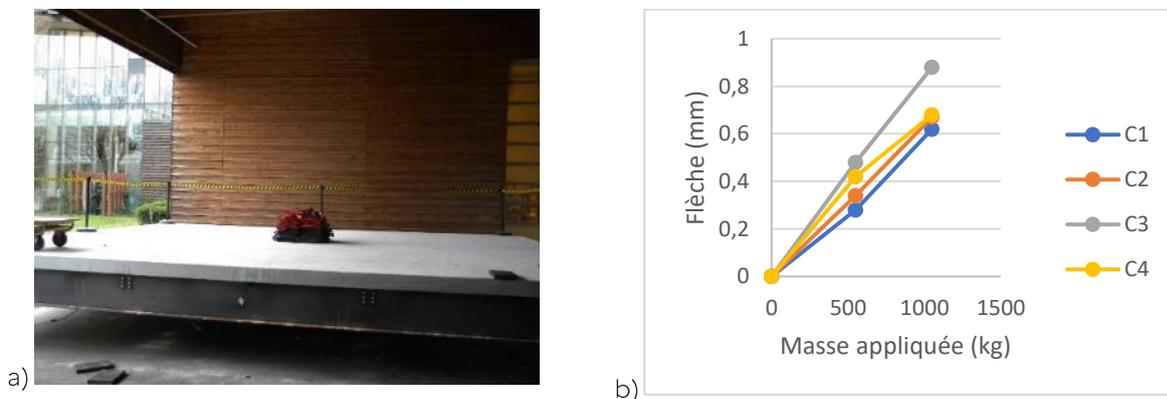


Figure 14 : Essais statiques sur le plancher à dominante acier, a) Ajout de masse, b) Courbe masse/flèche

Les analyses modales expérimentales (AME) permettent la détermination des fréquences propres, des amortissements et des déformées modales associées. Des accéléromètres ont été disposés sur l'ensemble du plancher d'essai. A l'aide d'un marteau instrumenté, des sollicitations ont été effectuées sur tous les points d'un maillage régulier qui couvrait l'ensemble de la surface du plancher. L'analyse modale a ensuite été réalisée en utilisant les fonctions de réponses en fréquence (FRF).

La FRF est la représentation fréquentielle du rapport entre l'accélération en un point de la structure et le niveau de force appliqué lors de l'impact. L'algorithme d'estimation de FRF utilisé dans tous les traitements est le H1, soit :

$$H_1(f) = \frac{G_{xy}(f)}{G_{xx}(f)}$$

Où

$G_{XY}(f)$: interspectre de X et Y

$G_{XX}(f)$: autospectre de X

Ces FRF sont condensées en une courbe caractérisant le comportement dynamique de la structure : la « Complex Mode Indicator Function » (CMIF) [16]. Enfin par ajustement d'un modèle mathématique sur la CMIF, les caractéristiques des modes propres sont affichées (fréquences, déformés modales, amortissement).

A partir de l'ensemble des réponses impulsionnelles, il est possible de construire un diagramme de stabilité, qui permet de façon simple de déterminer les fréquences et déformées modales des modes principaux. Le diagramme de stabilité du plancher acier étudié est donné à la Figure 15.

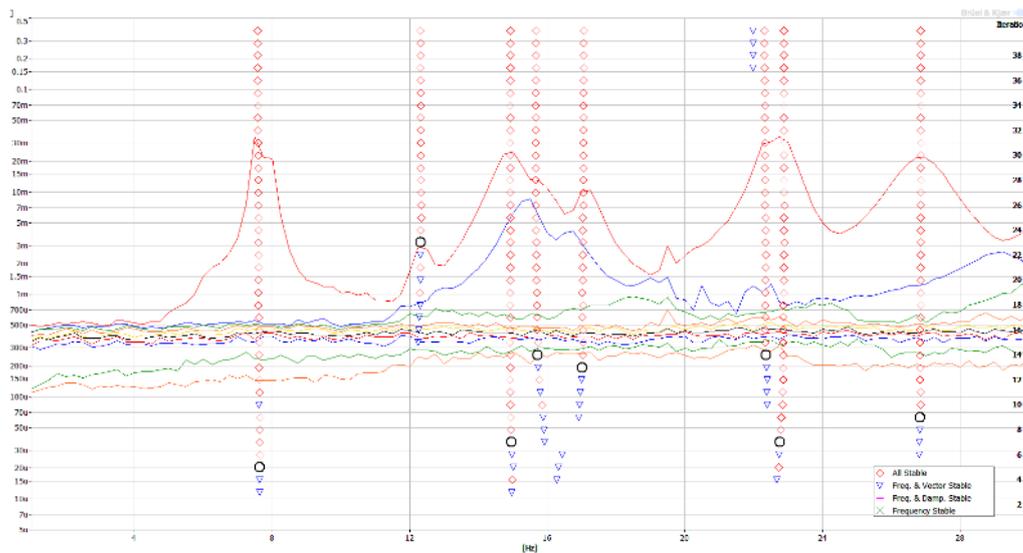


Figure 15 : Diagramme de stabilité issu de l'analyse modale expérimentale du plancher acier

L'algorithme utilisé (Rational Fraction Polynomial Method [17]) va effectuer plusieurs itérations en supposant la présence d'un nombre de modes croissant. Afin d'identifier si un mode identifié est bien un mode de vibration de la structure, il faut qu'il présente une certaine stabilité entre les itérations, en termes de fréquence mais aussi en termes d'amortissement et de vecteur de déformées modales. Dans le cas du plancher, huit modes sont clairement identifiables sur le diagramme de stabilité, dans la gamme 1-30 Hz. Les allures des premières déformées modales du plancher à dominante acier sont données sur la Figure 16.

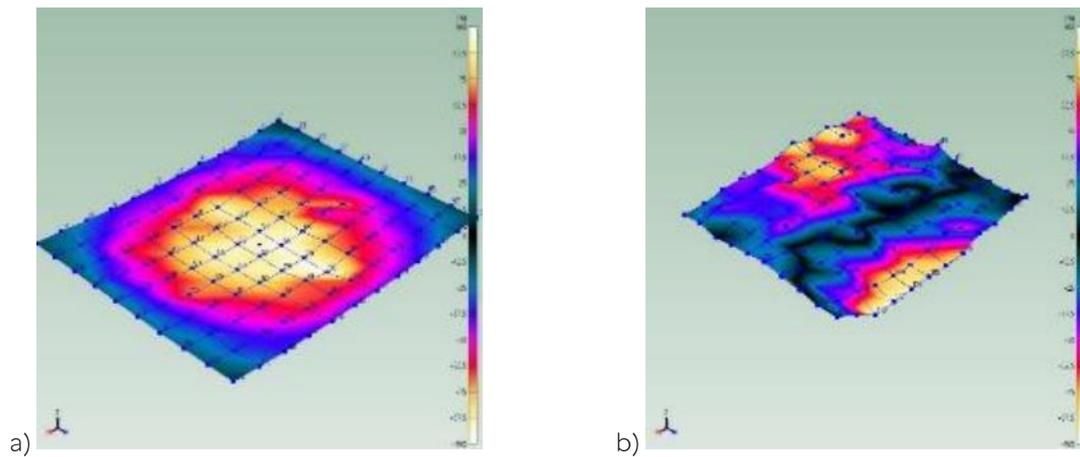


Figure 16 : Déformées modales sur plancher à dominante acier, a) 1re déformée, b) 2e déformée

2.2.2.2. Essais de chargement sur plancher à dominante acier – 1 et 2 mars 2022

L'objectif de ces essais était de déterminer des modèles de chargement pour des groupes effectuant différentes activités plus ou moins coordonnées.

Les essais se composent d'essais de caractérisation du plancher (mesure de la raideur statique et analyse modale) ainsi que d'essais où la sollicitation était provoquée par un groupe de personnes. Les différents essais sont indiqués dans le tableau suivant, dans l'ordre chronologique où ils ont été effectués.

Essais	Date de réalisation	Dénomination	Données de sortie
Analyse modale	28/02/22 – PM	32	FRFs, Déformées modales expérimentales, Fréquences et amortissements modaux
2 personnes	01/02/22 - AM	24	Accélération, Force, LVDT
1 personne	01/02/22 - AM	16	Accélération, Force, LVDT
3 personnes	01/02/22 - PM	/	Accélération, Force, LVDT
16 personnes	01/02/22 - PM	20	Accélération, Force, LVDT
4 personnes	02/02/22 – AM	20	Accélération, Force, LVDT
8 personnes	02/02/22 – AM	/	Accélération, Force, LVDT
Essais statiques	02/02/22 – PM	16	Mesures comparateurs

Tableau 3 : Liste et déroulé des essais

Chaque groupe, d'une à seize personnes, était invité à réaliser différentes activités rythmiques en présence d'un coach sportif pour donner la cadence. Les activités rythmiques sont de type saut (Figure 17 a et b) ou de type course (Figure 17 c et d) et ont été réalisées sur place, sans se déplacer sur la surface du plancher.

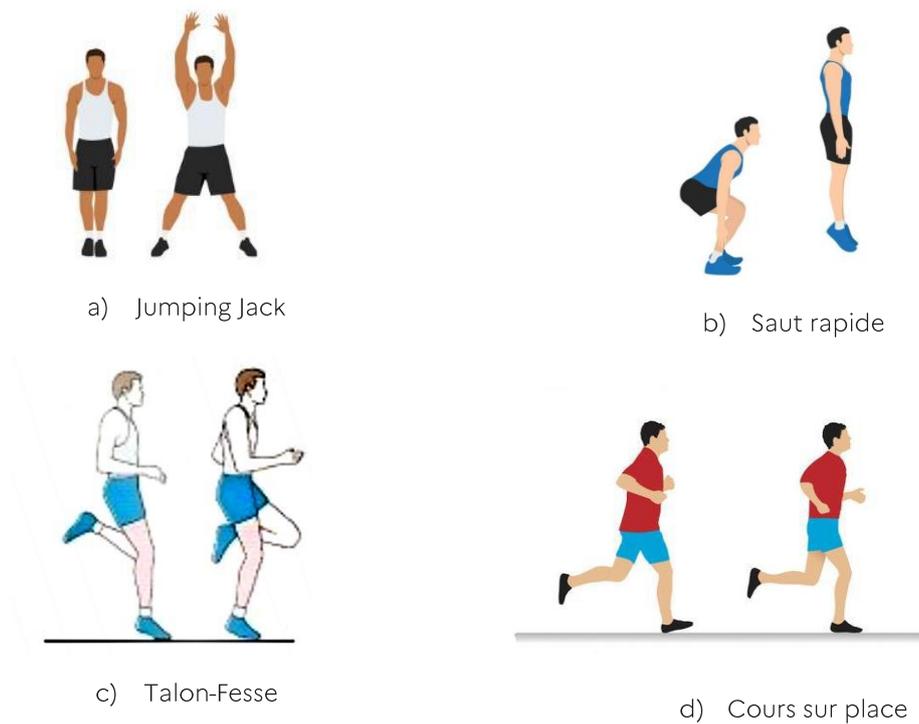


Figure 17 - Activités rythmiques [18]

Les participants ont été répartis uniformément sur toute la surface du plancher. Chaque poteau a été équipé d'un capteur de force afin d'enregistrer les efforts dynamiques induits par les activités rythmiques. Un capteur LVDT a aussi été positionné au centre du plancher pour mesurer la déformée du plancher sous chargement. Enfin, des accéléromètres ont été disposés de façon régulière entre les participants pour mesurer les accélérations du plancher en différents points. La Figure 18 illustre les essais réalisés.

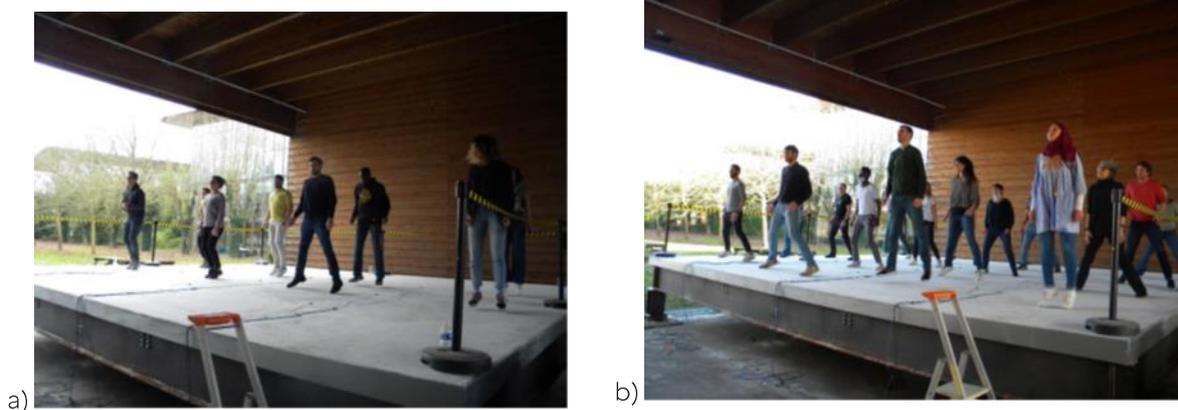


Figure 18 - Photos des essais, a) groupe de 8, b) groupe de 16 personnes

2.2.2.3. Essais de confort sur plancher à dominante bois – 10 et 24 mai 2022

Le plancher est un plancher carré sur deux lignes d'appui (représentées en orange sur la Figure 20). Des accéléromètres ont été positionnés sous les chaises des quatre récepteurs afin de mesurer les accélérations transmises.



Figure 19 - Placement des accéléromètres sur les chaises des récepteurs et illustration d'un essai

L'objectif de cet essai était de se rapprocher de la réalité et donc d'évaluer l'effet des activités de groupe (marche, sauts, etc.) sur la perception et le confort vibratoire. Ces activités correspondent à différents usages qui peuvent exister dans une habitation, un bureau ou encore un équipement sportif. Il existe trois types de sollicitation : marche (1), trot (2) et saut simple (3). Pour chaque type de sollicitation, des essais ont été réalisés avec plus ou moins de générateurs (personne induisant la vibration) et quatre récepteurs (personnes assises « subissant » la vibration) positionnés à différents endroits du plancher. Les générateurs (G) devaient marcher ou trotter suivant des cercles tracés au sol pour les sollicitations 1 et 2. Les récepteurs, assis sur des chaises raides afin qu'elles leur transmettent le maximum de vibrations, de la lecture en main dans le but d'être totalement concentré sur une activité et non sur l'environnement alentour (Figure 19), avaient pour consigne, comme pour les essais sur table vibrante, d'indiquer s'ils percevaient la vibration (niveau 1), si elle était dérangeante pour leur activité de lecture (niveau 2) ou si elle était insupportable (niveau 3). Les plans des essais sont donnés sur la Figure 20, la Figure 21 et la Figure 22.

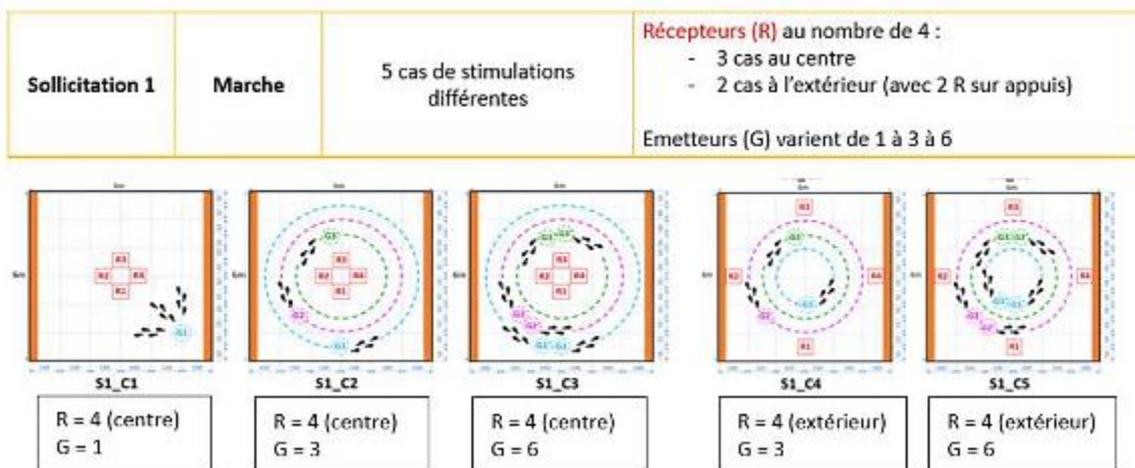


Figure 20 : Plan des essais pour la marche

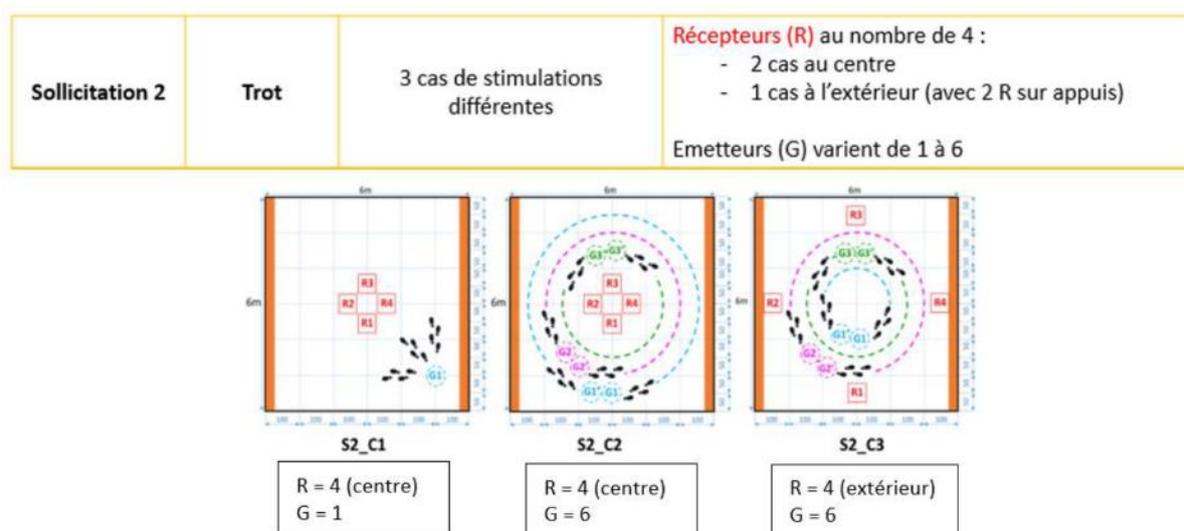


Figure 21 : Plan des essais pour le trot

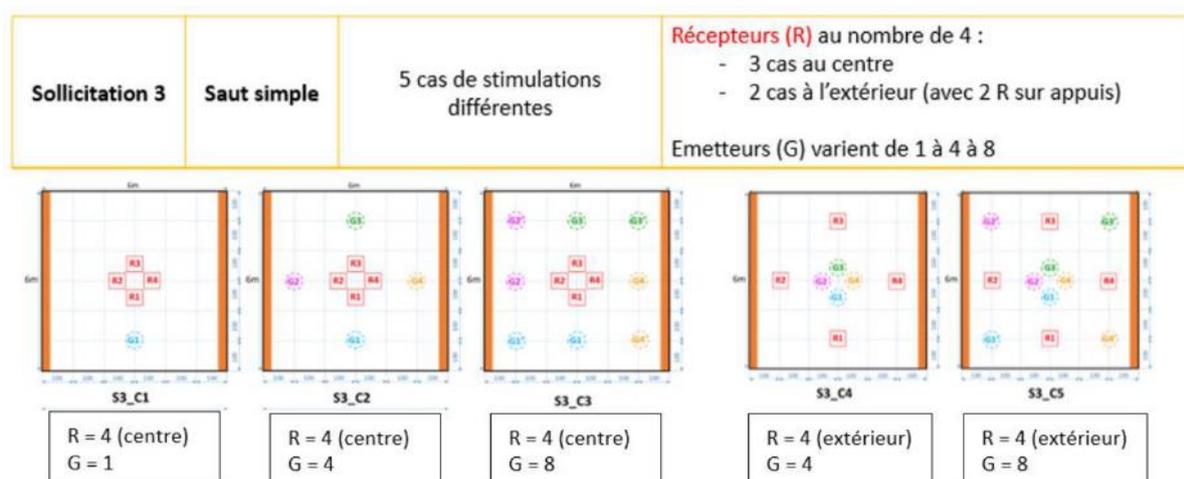


Figure 22 : Plan des essais pour les sauts simples

Ces essais ont été analysés principalement lors du stage d'Elorry Masselin en 2023 et les résultats seront décrits dans la partie 4.

2.2.2.4. Essais « machines » – avril et mai 2022

Les vibrations des planchers ne sont pas uniquement induites par la marche ou les activités rythmiques des personnes. D'autres sources peuvent générer des vibrations inconfortables. L'objectif n'était pas ici de faire une étude exhaustive des sources de vibrations et de leurs impacts, ce qui n'était pas prévu dans le projet, mais de profiter des dispositifs d'essais mis en place pour mieux caractériser la réponse du plancher à d'autres sollicitations. Sur les deux planchers de laboratoire, des mesures ont été réalisées en utilisant un ballon japonais, une machine à choc et une machine à laver.

Le ballon d'impact (ou ballon japonais) est un outil calibré pour générer des chocs « mous » assimilables à de la marche. Il permet généralement de quantifier les bruits solides générés par la marche lors de mesures acoustiques. La hauteur de lâcher de 1 m est contrôlée par un gabarit (Figure 23). Des accéléromètres sont disposés à différents endroits du plancher plus ou moins éloignés du point d'impact et mesurent l'accélération induite par le choc.

La machine à choc est aussi un appareil très commun dans le cadre de l'ingénierie acoustique. Elle consiste en une série de marteau de 500 g qui chutent sur le plancher d'essai à un rythme de 10 impacts par seconde. Il permet de solliciter le plancher sur des hautes fréquences.



Figure 23 : Essais au ballon d'impact (ballon japonais)

Enfin, des mesures avec une machine à laver ont été réalisées en utilisant des cycles de rinçage/séchage. La machine a été positionnée au centre du plancher et trois vitesses d'essorage (800, 1000 et 1200 tr/min) ont été testées. La fréquence d'échantillonnage est de 256 Hz, et les mesures ont été réalisées sur toute la durée du cycle.

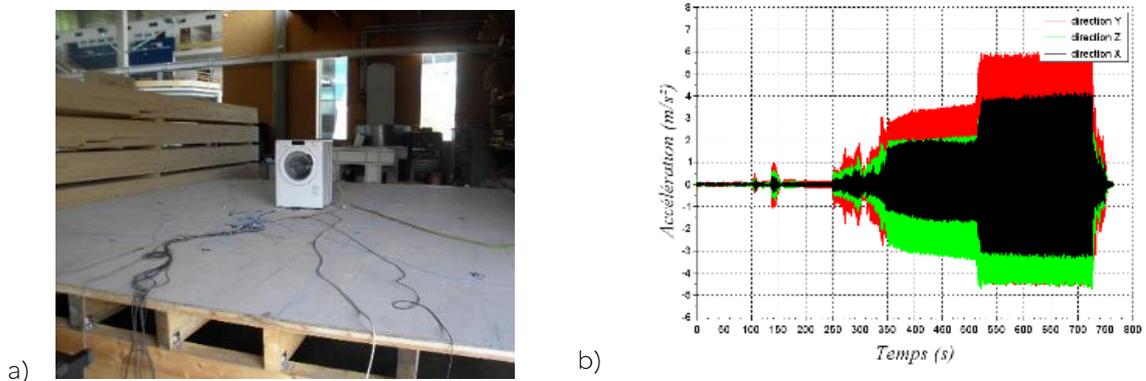


Figure 24 : a) Photo de l'essai avec machine à laver, b) Allure des accélérations dans les trois axes mesurés avec la machine à laver.

Lors du cycle de la machine, nous observons d'abord un essorage avec une fréquence relativement faible (autour de 5/7 Hz) pendant lequel les accélérations sont relativement faibles. Lors du début du séchage, la fréquence augmente progressivement jusqu'à la vitesse de consigne (800 à 1200 tr/minutes) et des accélérations potentiellement très importantes sont alors observables, parfois proches de 1 g.

2.2.3. Résultats bruts

L'exploitation des résultats sera réalisée dans les parties 4 et 5. Les résultats bruts ne sont pas indiqués dans ce rapport pour ne pas rendre la lecture rébarbative. Le lecteur intéressé pourra se référer au rapport des essais en laboratoire du projet [15].

Note pour le calcul de l'accélération efficace.

La mesure de l'accélération a une dimension temporelle et est très dépendante de la fréquence d'échantillonnage choisie. Que ce soit pour les modèles de chargement ou les seuils de confort, l'utilisation de l'accélération crête n'aurait que peu de sens au vu de sa variabilité. Il a donc été choisi d'utiliser comme valeur l'accélération RMS sur des intervalles de 1 s, comme préconisé par l'ISO 2631. Dans la suite de ce document, l'accélération RMS a été calculée de cette manière.

3. Essais in situ

3.1. Méthodologie et recherche de sites

Les essais en laboratoire ont l'avantage de se faire dans un environnement maîtrisé. Les conditions d'appuis sont clairement identifiables, le plancher d'essai est relativement simple et il est aisé de l'instrumenter en profondeur. Dans le cas d'un essai in situ, même en ayant les plans à disposition, de nombreux éléments complexifient les essais. Le plancher n'a pas de géométrie régulière, des éléments de second œuvre ajoutent de la rigidité, de la masse et de l'amortissement. Les étages successifs agissent sur les propriétés du plancher, les assemblages réellement réalisés ne sont pas connus, il est plus complexe d'instrumenter l'ensemble de la structure, etc...

Néanmoins, il est important que les critères établis soient pertinents dans le cas de vibrations in situ. Par exemple, l'amortissement des planchers sera plus important dans le cas d'essais in situ du fait des éléments de second œuvre et des meubles. De plus, l'environnement joue dans le ressenti psychosensoriel des usagers. Les enquêtes de ressenti sont donc plus pertinentes dans un environnement d'habitation ou de bureau que dans un laboratoire.

Pour observer l'effet d'un groupe de personnes sur un plancher, il est nécessaire de disposer de planchers de grandes dimensions. De plus, la portée entre appuis doit être suffisamment grande pour que les accélérations induites par les vibrations soient importantes et donc qu'elles puissent être éventuellement désagréables. C'est pourquoi la recherche de bâtiments s'est principalement concentrée vers les bâtiments susceptibles de pouvoir accueillir un grand nombre de personnes. Les écoles / collèges / lycées étaient des lieux idéaux, puisqu'ils présentent des temps d'inoccupation (vacances scolaires) et il est plus simple d'y faire des essais que dans des bâtiments privés. Nous tenons à remercier la mairie de Bruges et la Région nouvelle Aquitaine pour l'aide apportée dans la recherche de site.

3.2. Structure à dominante bois : Ecole Frida Kahlo

Dans le cadre du projet, le groupe scolaire Frida Kahlo (Bruges, 33) nous a autorisé à réaliser des mesures vibratoires et acoustiques dans leurs bâtiments. Il s'agit d'une école maternelle, composée d'îlots d'un à trois étages avec une quinzaine de salles de classe. Le bâtiment est composé en grande majorité de bois avec des solives apparentes et des coursives extérieures au-dessus de certaines salles de classe.

Les essais ont été réalisés dans la classe 8, au 1^{er} étage du bâtiment principal. Cette salle de classe a l'avantage d'être relativement grande (60 m²), d'avoir une forme géométrique simple et de disposer d'une zone avec une portée importante.



Figure 25 : Plans de l'école Frida Kahlo, a) Accueil ALSH RdC, b) Classe élémentaire 8 au 1er étage

3.2.1. Caractérisation du plancher

L'analyse modale opérationnelle a été réalisée à l'aide d'un marteau instrumenté, d'un maillage d'accéléromètres et du logiciel BKconnect. Le rapport du projet VIBOIS [19] contient les détails de mise en place de ce type d'analyse modale. L'objectif est d'identifier les principaux modes de vibration du plancher. A partir de cette mesure, nous avons la capacité de localiser les zones où l'amplitude de vibration sera maximale et analyser les liaisons entre le plancher et les éléments de l'étage inférieur. Les fréquences de vibration permettent aussi de calibrer les modèles de la structure.

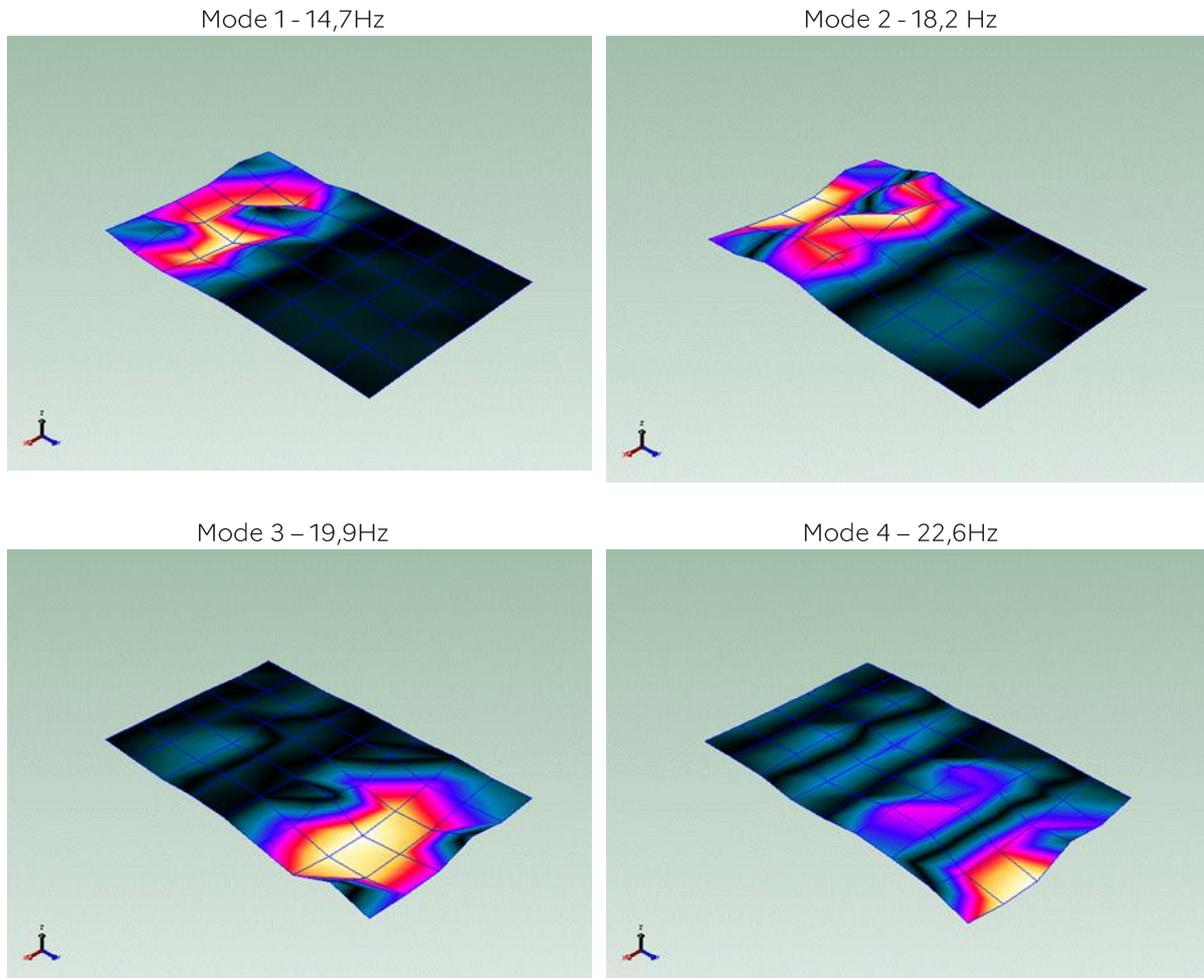


Figure 26 : Quatre premiers modes de vibration de la structure à l'école Frida Kahlo

Des essais à la marche avec deux personnes différentes donnent des valeurs d'accélération RMS maximale comprises entre 0,025 et 0,07 m/s^2 . En utilisant la méthodologie développée dans le cadre du projet VIBOIS [19], il est possible de calculer l'accélération maximale attendue sur le plancher lors d'un essai de marche.

$$a_{RMS} = \frac{0,57f_p - 0,104}{2} \sqrt{\frac{((2\xi^2 + 1)e^{2\xi\omega_0 T} - 1)e^{-2\xi\omega_0 T} Q}{T\omega_0\xi^2 + T\omega_0\xi} \frac{Q}{m}}$$

Où

ξ : coefficient d'amortissement du plancher

T : temps sur lequel est calculé la valeur RMS (habituellement 1 s)

ω_0 : pulsation propre du plancher

Q : poids de la personne marchant sur le plancher (pris à 750 N)

m : masse modale du plancher

Sur la base d'hypothèses sur la masse modale réelle du plancher, nous trouvons une valeur d'accélération efficace $a_{RMS} = 0,095m/s^2$ qui encadre bien les mesures expérimentales.

3.2.2. Essais avec des groupes de personnes

Les essais à l'école Frida Kahlo sont les premiers réalisés in situ. Le protocole employé est relativement similaire à ce qui avait pu être réalisé en laboratoire. Les essais ont été réalisés avec différents groupes d'adultes pour simuler différents cas de sollicitation du plancher :

- Sollicitation type « marche » (1, 3, 6, 10 et 16 personnes) ;
- Sollicitation type « trot » (1, 3, 6, 10 et 16 personnes) ;
- Sollicitation type « saut lent » à un rythme de 30 bpm (1, 3, 6, 10 et 16 personnes) ;
- Sollicitation type « saut rapide » à un rythme de 120 bpm (1, 3, 6, 10 et 16 personnes).

Pour les essais avec les groupes de personnes, les récepteurs étaient positionnés au niveau du ventre du 1^{er} mode de résonance du plancher, c'est-à-dire dans la partie haute du plancher sur la partie proche des fenêtres (voir Figure 27). Les récepteurs étaient équipés de casque anti-bruit et réalisaient une activité de lecture. Tout comme pour les essais sur la table vibrante ou sur le plancher bois de laboratoire, ils avaient pour consigne d'indiquer s'ils percevaient la vibration (niveau 1), si elle était dérangeante pour leur activité de lecture (niveau 2) ou si elle était insupportable (niveau 3). Des accéléromètres étaient fixés en dessous de leur chaise.



Figure 27 : Réalisation des essais de marche à l'école Frida Kahlo

Chaque sollicitation a été répétée par deux groupes différents. Le niveau d'accélération mesuré est croissant avec le nombre de générateur, comme nous pouvions nous y attendre. Néanmoins, l'accélération n'est pas proportionnelle : par exemple une multiplication par 16 du nombre de générateurs pour les essais de marche entraîne une multiplication de l'accélération de l'ordre de 4 (Figure 28).

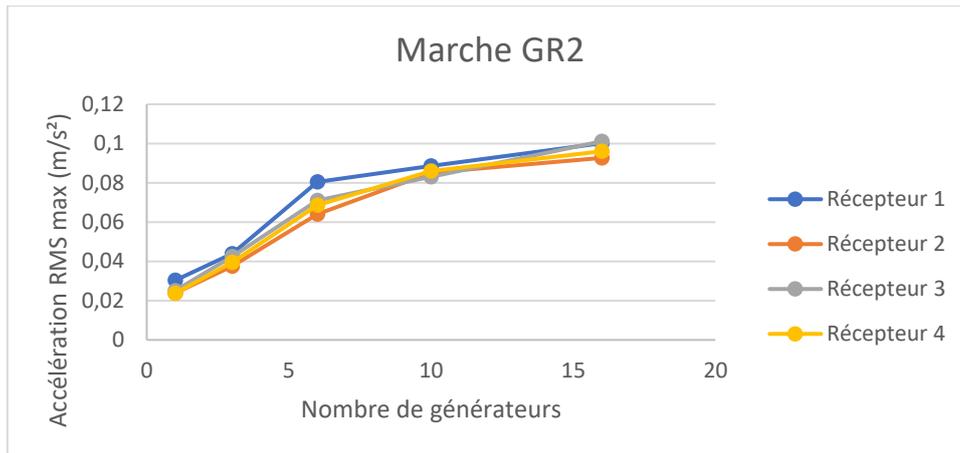


Figure 28 : Evolution de l'accélération RMS max mesurée sous les récepteurs en fonction du nombre de générateurs

La comparaison entre les mesures d'accélération et les valeurs de ressenti sera discutée dans la partie 4

3.3. Structure à dominante acier : rénovation du Lycée Camille Jullian

Le lycée Camille Jullian, situé au centre-ville de Bordeaux, fait l'objet d'une restructuration de l'un de ces bâtiments. Le bâtiment modifié accueillera des salles de classe.

Les façades sont conservées. Les cages d'escaliers ont été reconstruites. Les planchers des différents étages ne reposent pas sur la façade ancienne, mais sur des poteaux à l'intérieur du bâtiment. L'étude porte sur un plancher du deuxième étage du bâtiment, qui accueille une grande salle de classe.

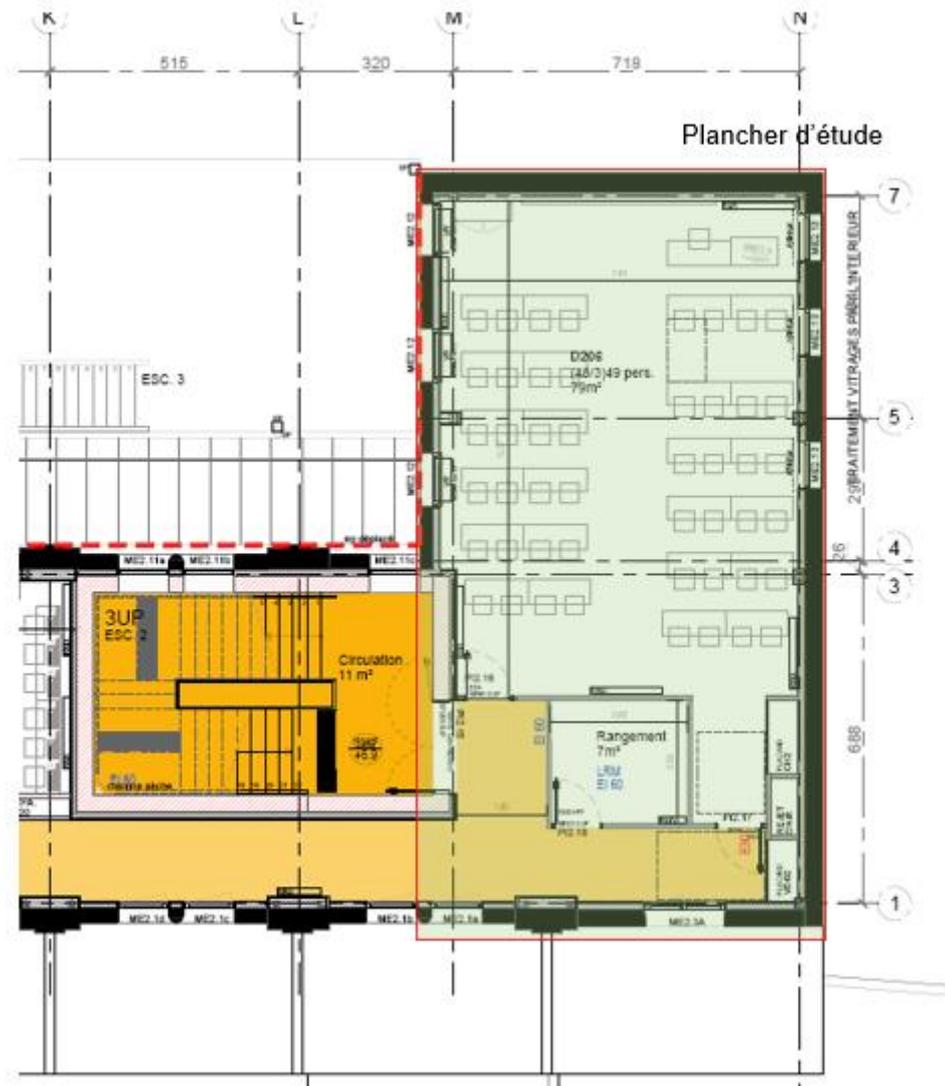


Figure 29 : Plancher de la salle de classe (en vert dur le plan)

Deux essais espacés de plusieurs mois ont été réalisés. Le premier, en avril 2023, a permis de caractériser le plancher environ 30 jours après coulage, avant la mise en place du second œuvre. Le second, en février 2024, a été réalisé avec un groupe de participants une fois que tout le second œuvre avait été réalisé.

3.3.1. Caractérisation du plancher

Deux analyses modales ont donc été réalisées, avant et après mise en place du second œuvre. La technique est la même que pour les essais en laboratoire et l'essai à Frida Kahlo. Le Tableau 4 regroupe les paramètres des premiers modes de résonance du plancher, mesurés avant et après la mise en place du second œuvre. A noter que seuls les modes avec une déformée modales similaires ont été comparés. Comme l'analyse modale avant second œuvre a été faite sur une zone plus grande, plus de modes ont été identifiés.

Mode n°	Avant second œuvre		Après second œuvre	
	Fréquence (Hz)	Amortissement (%)	Fréquence (Hz)	Amortissement (%)
1	10,5	1,98	10,6	6,7
2	14,2	1,45	15,1	4,5
3	19,7	2,47	22,6	5,1
4	23	2,07	24,3	7,4

Tableau 4 : Premiers modes de résonance du plancher du lycée Camille Jullian, avant et après mise en place du second œuvre

La fréquence de résonance est globalement peu impactée par la mise en place du second œuvre. Néanmoins, les fréquences ont tendance à légèrement augmenté, ce qui traduit une augmentation de la raideur du plancher plus importante que l'augmentation de la masse. L'amortissement a cependant augmenté de manière significative, plus de trois fois pour le 1^{er} mode. Le second œuvre est une source importante de dissipation d'énergie de vibrations.

3.3.2. Essais avec des groupes de personnes

Quatre récepteurs étaient positionnés au niveau du ventre du 1^{er} mode propre du plancher, c'est-à-dire dans la partie centrale du plancher. Les récepteurs réalisaient une activité de lecture. Ils avaient pour consigne d'indiquer s'ils perçoivent la vibration (niveau 1), si elle est dérangeante pour leur activité de lecture (niveau 2) ou si elle est insupportable (niveau 3) (Figure 36)

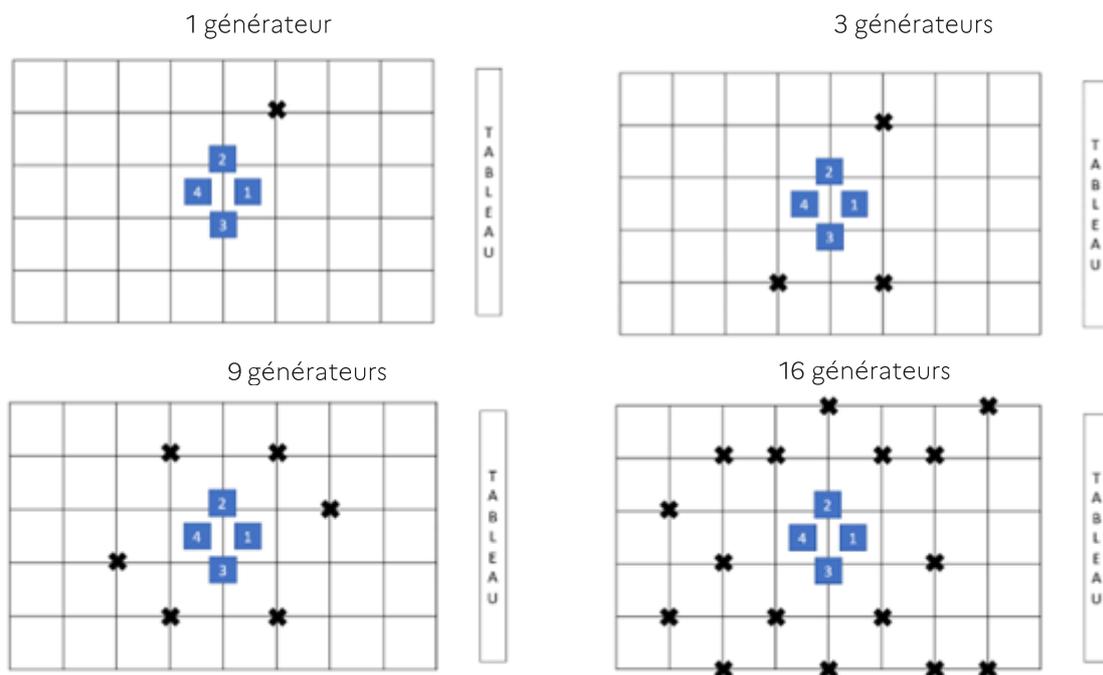


Figure 30 - Schéma du plancher et de la position des récepteurs (carré bleu) et des générateurs (croix noire). Le maillage est celui utilisé pour l'analyse modale

Les sollicitations sont divisées en 6 parties :

- Sollicitation S5 : Jumping Jack – 60 bpm
- Sollicitation S6 : Jumping Jack – 120 bpm
- Sollicitation S7 : Course sur place – 120 bpm
- Sollicitation S8 : Course sur place – 150 bpm
- Sollicitation S9 : Jumping Jack – 90 bpm
- Sollicitation S10 : Course sur place – 180 bpm

Les générateurs étaient situés autour d'un carré ayant pour centre les récepteurs. L'espacement devait être le plus élevé possible pour éviter les biais d'inconfort liés à la promiscuité. A l'inverse des essais à Frida Kahlo, il a été décidé que les générateurs resteraient en place pour simplifier la modélisation et éviter un inconfort visuel avec des participants qui tourneraient autour des récepteurs (voir Figure 31).

Au niveau de l'acquisition des données, la fréquence d'échantillonnage a été réglée à 1024 Hz. Chaque mesure a duré environ 30 s. Les sollicitations étaient effectuées dans un ordre aléatoire avec des intensités variables pour éviter que les récepteurs ne s'habituent à la vibration ou ne s'attendent à une vibration plus ou moins forte. Les essais avec un générateurs sont répétés 6 fois puisqu'ils présentent la plus grande variabilité. Les essais avec plusieurs générateurs sont répétés 3 fois.

Ces essais permettaient à la fois d'évaluer les seuils de confort des récepteurs (voir partie 4) mais aussi d'améliorer les modèles de chargement suivant le coefficient de coordination (voir partie 5).



Figure 31 : Réalisation des essais de Jumping Jack au lycée Camille Jullian avec 16 générateurs

3.4. Résultats bruts

L'exploitation des résultats sera réalisée dans les parties 5 et 6. De la même façon que pour les essais sur plancher, les résultats bruts ne sont pas indiqués dans ce rapport pour ne pas rendre la lecture réverbative. Le lecteur intéressé pourra se référer au rapport des essais in situ du projet [20].

4. Lien entre confort et grandeurs physiques

4.1. Contexte et état de l'art

Malgré l'efficacité environnementale et économique des constructions légères, plusieurs problématiques présentent des limites pour cette filière sèche. Les vibrations sont un bon exemple de contraintes à la fois structurelles et d'usage, en particulier dans les bâtiments multiétages [13], [21]. Il est également connu que le corps humain est particulièrement sensible aux vibrations. Les usagers peuvent être gênés par des vibrations qu'elles soient faibles ou fortes [22]. Pour cela, des normes complètes et contextualisées pour la prédiction du confort vibratoire doivent être définies. De nos jours, la majorité des normes existantes sont basées sur l'hypothèse que la fréquence fondamentale des planchers légers doit être supérieure à 8 Hz étant donné qu'il s'agit du seuil de fréquence en dessous duquel les organes humains résonnent [23]. Les planchers dont la fréquence fondamentale est inférieure à 8 Hz ne sont donc pas pris en compte dans les Eurocodes traitant des vibrations des planchers légers. Par ailleurs, contrairement à l'effet d'un seul individu, les connaissances sur l'effet d'un groupe sont rares dans la littérature scientifique. Des études plus contextualisées visant à évaluer les effets des activités de groupe et à étudier l'interaction homme-structure sont nécessaires pour améliorer les normes et méthodes existantes [24].

Le comité technique ISO TC 165 « Structures en bois » prépare actuellement une méthode harmonisée pour le dimensionnement des planchers en bois vis-à-vis des vibrations qui pourrait être mise en œuvre par n'importe quel pays [13]. La première étape du projet reposait sur l'analyse des données de performance des planchers recueillies par des chercheurs canadiens, finlandais et allemands. Dans ce contexte, le projet souhaite contribuer à la production des connaissances mettant en lumière le contexte français. L'objectif final de ce projet est d'améliorer la réglementation existante autour des vibrations des planchers légers induites par les activités de groupe. En particulier, la problématique liée aux planchers dont la fréquence fondamentale est inférieure à 8 Hz, qui ne sont pas pris en compte dans les Eurocodes. Il semble que ces planchers posent des problèmes structurels nécessitant à chaque fois des études spécifiques coûteuses pour chaque projet [25]. Notre étude est donc une contribution à l'harmonisation des critères de confort vibratoire des planchers légers.

Le plan méthodologique de cette étude est structuré en quatre phases complémentaires. Une enquête auprès des habitants a d'abord été menée pour positionner la problématique de la gêne vibratoire dans l'expérience des usagers. Ensuite, des tests sur une table vibrante ont exploré la perception des individus pour mieux définir leurs seuils de perception, d'inconfort et d'intolérance.

Les résultats de ces tests ont permis de réaliser des essais sur un plancher expérimental pour étudier l'effet de différents mouvements de groupe sur la perception vibratoire des individus. Enfin, des mesures in situ ont permis de définir des seuils d'accélération acceptables. Les phases sont présentées de manière chronologique, puisque les méthodologies d'essai ont évolué au fur et à mesure des observations et résultats obtenus.

4.2. Enquête auprès d'habitants de logements avec plancher bois

Si dans d'autres contextes (en Suède, par exemple [26]), des enquêtes auprès des habitants ont été réalisées le contexte français manque encore de travaux empiriques pour mieux appréhender la question du confort vibratoire des planchers légers. C'est pourquoi nous avons commencé notre enquête en interrogeant des habitants ayant ressenti un inconfort vibratoire dans leur logement à plancher en bois. La Figure 32 montre l'outil que nous avons utilisé pour collecter les données. Il s'agit d'une grille d'entretien semi-directif qui permettait, à travers la première consigne, d'interroger les usagers sur le confort global de leur appartement afin de situer la question des vibrations dans leur discours. La deuxième consigne demandait aux personnes interrogées de décrire la gêne vibratoire et son influence sur leur vie de tous les jours. Nous les sollicitons afin qu'elles s'expriment sur les sources, les causes, les effets, les paramètres et les solutions possibles pour améliorer le confort vibratoire de l'appartement. Enfin, les données personnelles et celles relatives au logement (l'âge du bâtiment, l'étage habité, la durée de résidence) ont été recueillies.

Bonjour,

Cet entretien anonyme rentre dans le cadre d'un projet scientifique intitulé GIVILIF qui s'intéresse au confort dans les constructions à structure légère (bois, métal ou mixte "bois-métal"). Nous souhaitons recueillir l'avis des usagers afin de mieux appréhender les éléments influençant le confort des usagers ainsi que leurs attentes.

Cela peut prendre de 30 à 40 minutes. Nous vous remercions par avance du temps que vous voudrez bien y consacrer.

Consigne 1 : Confort global	
Comment évaluez-vous la qualité de confort dans votre habitation (avantages & inconvénients) ?	
Consigne 2 : perception de la gêne vibratoire	
Pouvez-vous décrire la gêne vibratoire et comment cela influence votre quotidien ?	
Sources	
	Intérieur
	Extérieur
	Autres
Causes	
	Age du bâtiment
	Activités
	Qualité de construction
	Autres
Effets	
	Inquiétude quant à la sûreté structurelle du bâtiment
	Perte de concentration mentale
	Autres
Paramètres	
	L'information sur l'origine du problème
	L'activité lors des vibrations
	La fréquence des vibrations
	L'affaiblissement de la vibration
	La durée d'exposition
	Autres
Solutions / améliorations	
	Renforcement
	Changement du matériau
	Déménagement
	Autres
Questions sur le bâtiment et informations personnelles	
Sexe	
Age	
Profession	
Identité culturelle	
Depuis quand habitez-vous / travaillez dans ce bâtiment ?	
Quel est l'âge du bâtiment présentant une gêne vibratoire ?	
Quel étage habitez-vous ?	

Figure 32 : Grille d'entretien semi-directif

Afin de définir l'influence des vibrations des planchers en bois sur la vie quotidienne des usagers, quatre appartements dans des immeubles collectifs et deux maisons individuelles avec des planchers en bois ont été étudiés. L'enquête in-situ a permis de définir les sources de vibrations, les activités les plus influencées par la gêne vibratoire et les effets des vibrations sur la vie quotidienne des sujets interrogés (voir Figure 33).

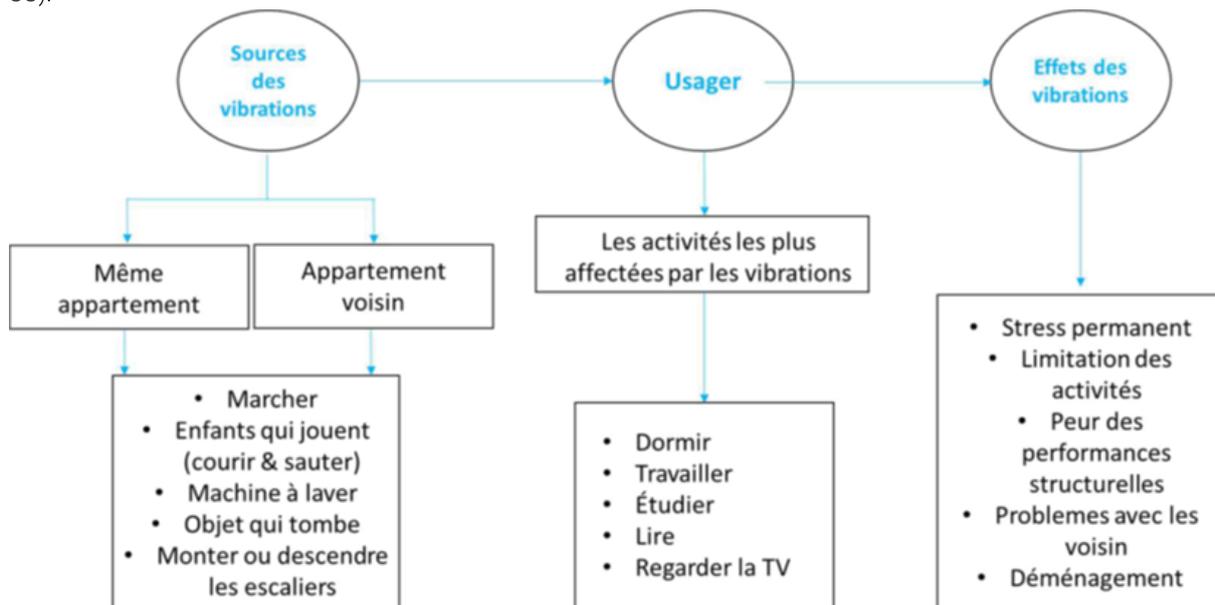


Figure 33 : Perception des vibrations des planchers en bois dans la vie de tous les jours

Les sources de vibrations peuvent être internes (sur le même plancher ou inter-étages) ou externes provenant du voisinage. Il a été largement exprimé que le fait d'être un récepteur de vibrations provoque fréquemment des problèmes psychologiques et sociaux. L'impossibilité d'effectuer des activités quotidiennes normales chez-soi (comme regarder la télévision, étudier, dormir, etc.) expose les gens à une situation de stress permanent. Les gens ont donné l'exemple du télétravail pendant l'épidémie de COVID19, où tout le monde était à la maison, enfants qui souhaitent jouer et adultes qui n'arrivent pas à travailler à cause de la gêne vibratoire engendrée.

La peur de déranger un membre de la famille ou les voisins oblige les occupants à limiter leurs activités et à s'adapter à des horaires spécifiques. Les individus s'adaptent à un certain mode de vie afin de ne pas provoquer de vibrations dans leur habitation et évitent carrément de recevoir des invités à cause de cette problématique. De même, les enfants ne peuvent pas courir ou sauter et une machine à laver ne peut pas être utilisée le samedi matin, car elle pourrait déranger le voisin qui veut profiter d'une grasse matinée le week-end. De plus, les craintes structurelles sont omniprésentes dans le discours des habitants. La peur des performances structurelles des planchers perturbe la façon dont les gens aménagent et vivent leurs maisons. Par exemple, à cause de la vibration de son plancher, un habitant a cessé de mettre des livres là où il les mettait avant et remplit peu son placard car il est mal placé par rapport à la portée des solives. En outre, cette crainte accentue la possibilité d'avoir des problèmes avec les voisins. Il a été, également, constaté que de nombreux habitants quittent leurs maisons à cause du problème des vibrations et préfèrent habiter dans des maisons construites avec des matériaux plus rigides et qui leur semblent plus sûrs que le bois.

4.3. Essais en laboratoire

4.3.1. Essais sur table sismique

4.3.1.1. Sollicitations sinusoïdales harmoniques

Même si ces essais montrent des disparités entre plusieurs récepteurs ayant subi les mêmes niveaux de vibrations (voir Figure 34), nous constatons néanmoins une tendance générale à une diminution du confort ressenti lorsque le déplacement et la fréquence augmente, ce qui traduit une dépendance entre le niveau d'accélération et le confort.

Par ailleurs, il a été constaté sur ces essais que les personnes de nationalité étrangère avaient le plus souvent tendance à être moins sensibles aux vibrations que les individus de nationalité française, même si le faible nombre de candidats ne permet pas de statuer sur une corrélation.

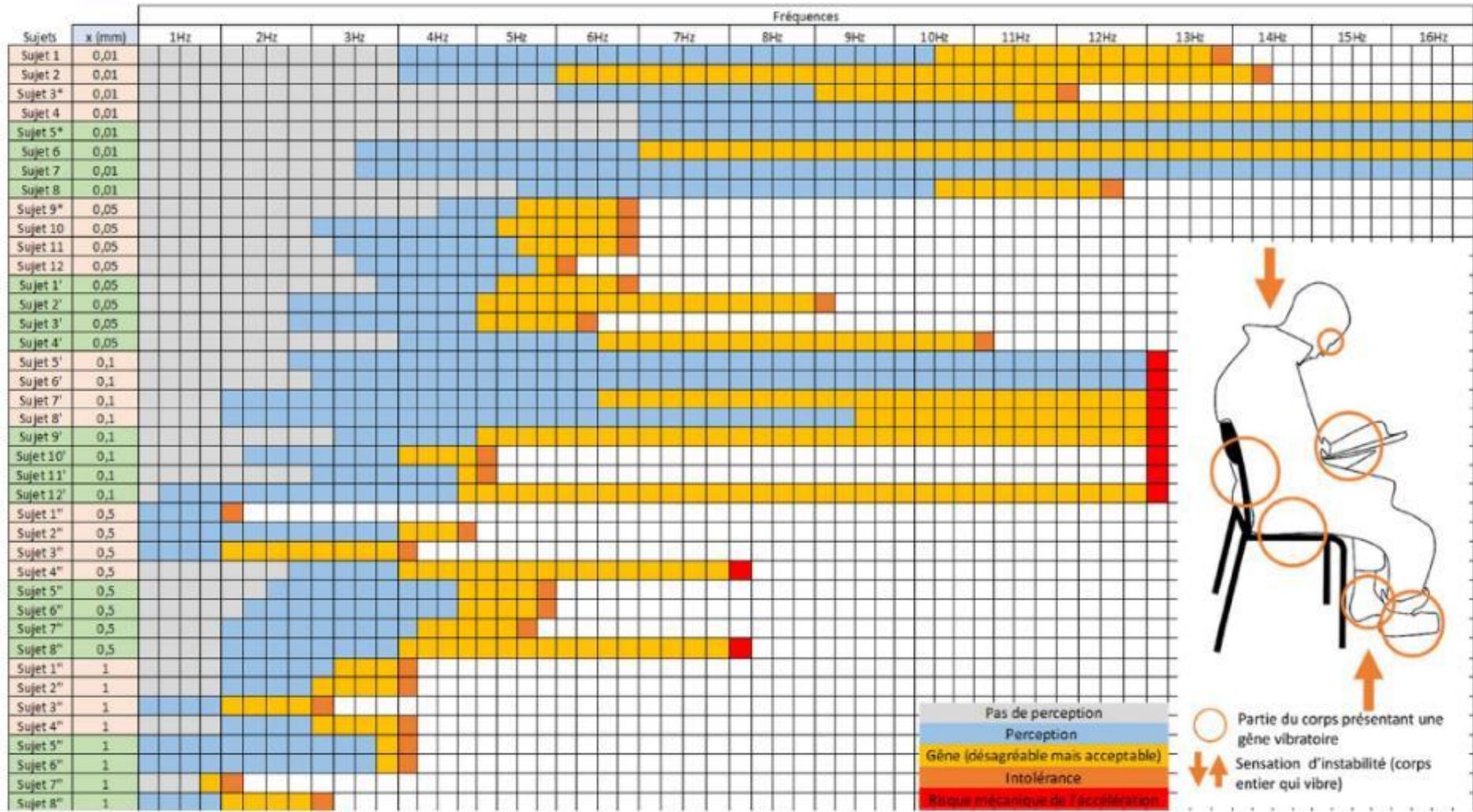


Figure 34 : Evaluation des vibrations par le groupe du 05 avril 2022 (tous les sujets en position assise avec activité nécessitant une concentration)

Un traitement des données plus poussé a été effectué pour l'ensemble des campagnes afin de mieux analyser les liens entre les éléments du confort vibratoire perçu et les grandeurs physiques. La Figure 35 montre la corrélation entre les différents paramètres étudiés pour évaluer l'effet des vibrations sur la perception des individus. Les paramètres objectifs sont liés aux signaux produits par la table vibrante : fréquence, déplacement, vitesse et accélération. Les paramètres subjectifs sont liés aux caractéristiques des participants : position, genre, âge, identité culturelle, taille, poids et sensibilité aux vibrations dans la vie de tous les jours. Une régression a été appliquée et les variables non significatives ont été éliminées une par une. Il apparaît que la fréquence est le paramètre ayant la plus grande influence sur la perception des vibrations. La vitesse et l'accélération exercent également une grande influence, tandis que le déplacement semble être un peu moins important. Toutefois, il est à noter que le déplacement n'a pas été beaucoup varié par rapport au nombre de fréquences testées. C'est peut-être pour cette raison qu'il vient après les autres paramètres en termes d'influence. Le fait qu'il y ait un lien entre la fréquence, la vitesse et l'accélération peut être aussi une raison de cette importance accordée à ces trois paramètres. En ce qui concerne les variables personnelles, la position est le paramètre le plus influent. Les sujets en position allongée et en position assise avec une activité nécessitant de la concentration sont plus sensibles aux vibrations que les sujets en position assise sans activité de concentration. Par ordre décroissant d'importance, les autres variables subjectives affectant la perception sont le genre, l'âge, l'identité culturelle, la taille, la sensibilité aux vibrations dans la vie quotidienne et le poids.

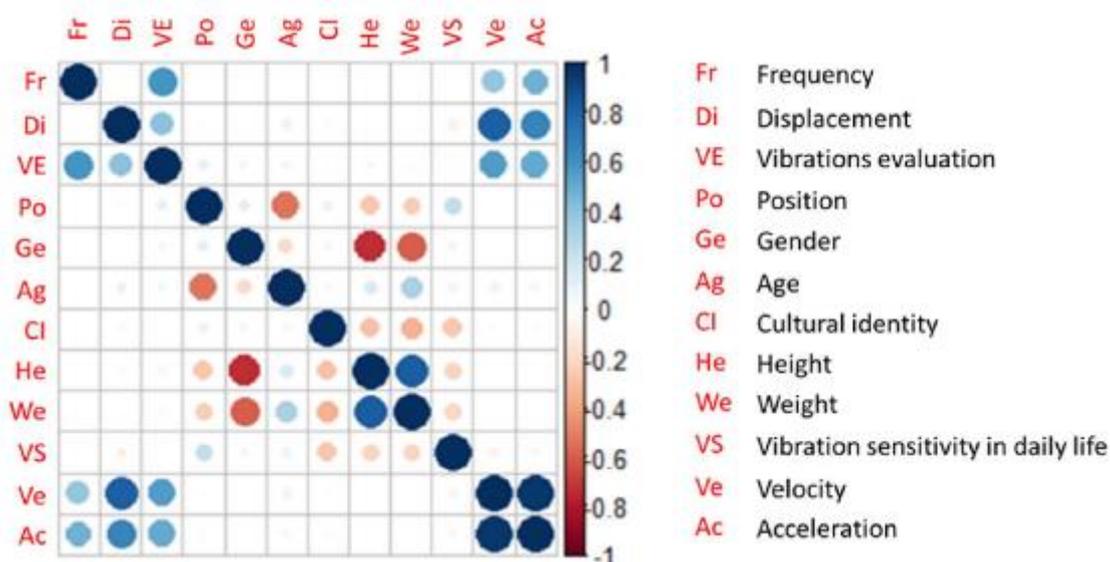


Figure 35 - Corrélation entre les différents paramètres des essais sur table vibrante

4.3.1.2. Sollicitations réalistes

Les 8 signaux joués sur la table vibrante sont indiqués dans le Tableau 5. Ils ont été joués dans l'ordre présenté. Les signaux sélectionnés sont globalement représentatifs des différents types de sollicitation et des niveaux d'accélération observés lors des essais.

Provenance°	Type	Nombre de générateurs	$a_{RMS_{max}} (m/s^2)$
Camille Jullian	Jumping Jack 120bpm	16	0,17
Frida Kahlo	Saut 30 bpm	16	0,98
Camille Jullian	Course sur place 150 bpm	8	0,059
Frida Kahlo	Marche	1	0,044
Frida Kahlo	Saut 120 bpm	16	1,0
Camille Jullian	Course sur place 120 bpm	1	0,052
Camille Jullian	Jumping Jack 60 bpm	6	0,13
Frida Kahlo	Trot	10	0,24

Tableau 5 - Signaux joués avec la table vibrante

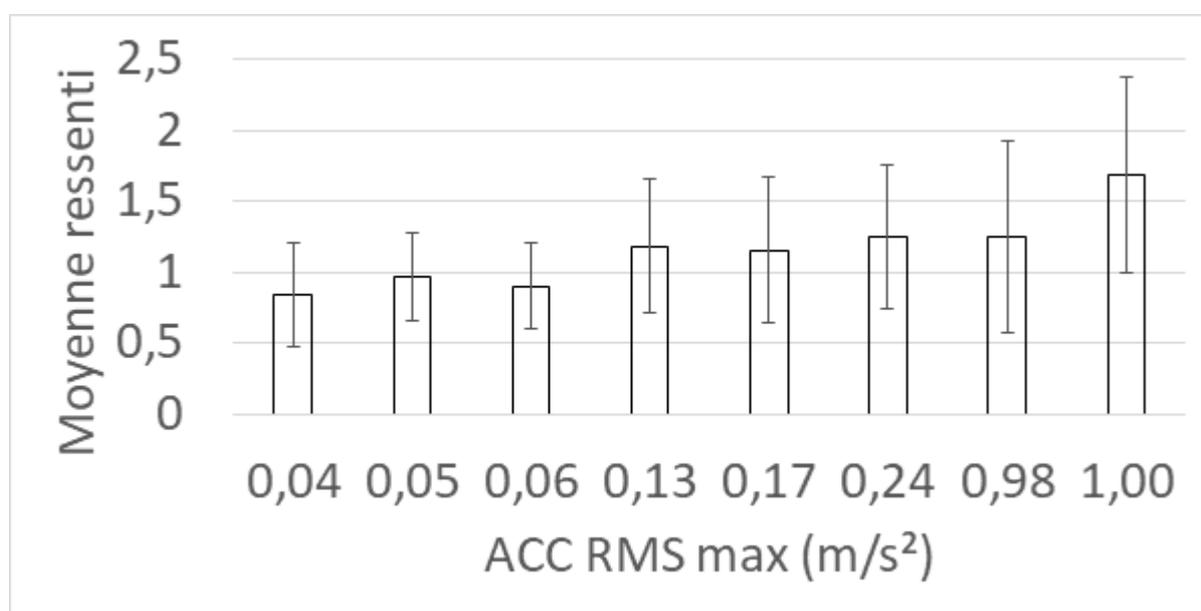


Figure 36 - Moyenne et écart type des ressentis des différents récepteurs (32 réponses)

La Figure 36 montre trois niveaux de perception. Pour des niveaux d'accélération RMS proche de $0,04 m/s^2$, la vibration est le plus souvent perçue mais ne présente pratiquement jamais un inconfort. Pour des niveaux d'accélération $0,1$ à $0,25 m/s^2$, la vibration n'est pas jugée insupportable, mais elle peut fréquemment être dérangeante. Au-delà de ces valeurs d'accélération, pour les sauts rapides (120 bpm), les niveaux de vibration sont jugés fréquemment gênants ou insupportables. Le cas des sauts lents (30 bpm) est particulier. Les niveaux d'accélération maximum mesurés sont importants, mais la moyenne des ressentis est relativement bas. Cela traduit le fait que les récepteurs sont moins sensibles à des sollicitations très ponctuelles (quelques secondes) qu'à des sollicitations entretenues (plusieurs dizaines de seconde). Il faut donc distinguer ces deux types de signaux et des seuils plus élevés peuvent raisonnablement être acceptés pour des sollicitations courtes.

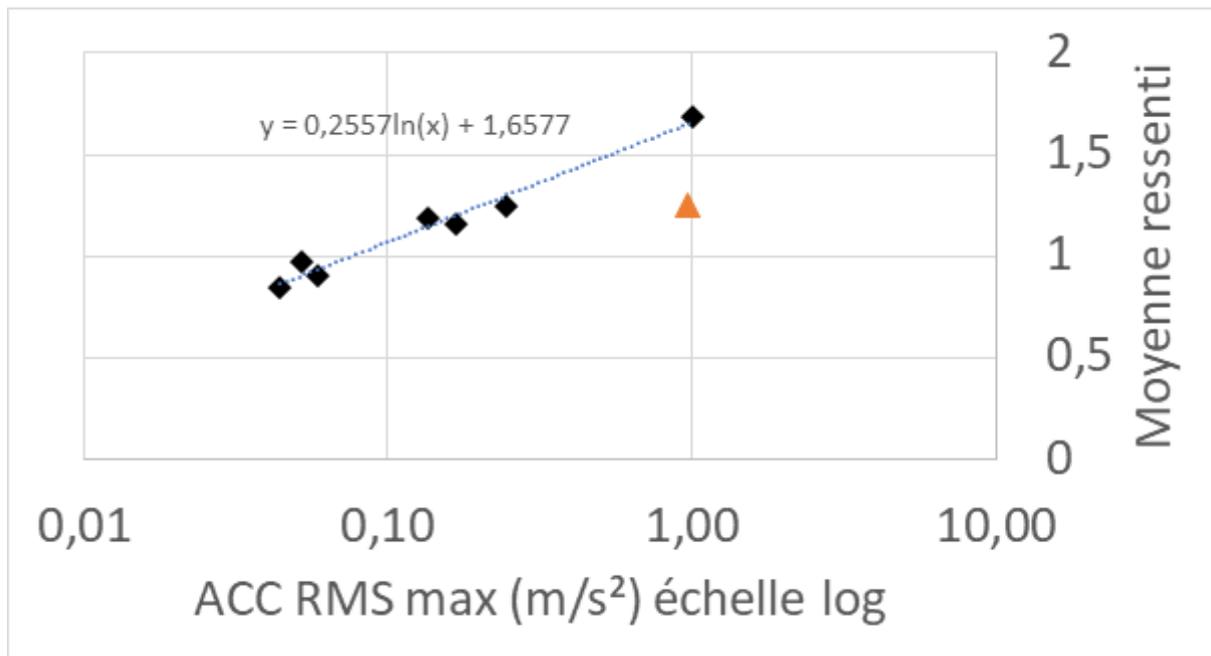


Figure 37 - Moyenne du niveau de ressenti en fonction du niveau d'accélération efficace (l'abscisse est indiquée en échelle log). Le triangle orange correspond aux sauts à 30bpm

A l'exception du signal des sauts à 30bpm, une relation logarithmique existe entre l'accélération efficace et la mesure du ressenti.

Les mesures physiologiques liées à ces essais sont en cours de post-traitement au moment de la rédaction de ce rapport.

4.3.2. Essais sur plancher bois en laboratoire

L'analyse statistique est effectuée avec le logiciel R studio. Le fonctionnement consiste en une approche par analyse statistique basique des différentes variables individuellement puis analyse statistique des différents cas de figure avec comparaison avant de continuer sur une analyse multi-approches en essayant de corrélérer certaines variables entre elles. Cela rentre dans le cadre des statistiques descriptives. Puis, pour finir, des modèles de régression sont testés afin de valider définitivement ou non les observations précédentes. Ceci rentre dans le cadre des statistiques mathématiques.

Le lecteur intéressé pourra trouver l'analyse statistique complète dans le rapport de stage d'Elorry Masselin. Ne sont retranscrits dans ce document uniquement que les résultats les plus importants permettant de déterminer les paramètres les plus influents. L'analyse la plus complète et la plus simple à interpréter est l'analyse des corrélations (corrélogramme) et les scatter plot entre les différents paramètres d'entrée et de sortie des essais. Le scatter plot correspond tout simplement aux tracés de chaque valeur de paramètres par rapport aux autres paramètres, ordonnancés sous la forme d'une matrice de graphe. Le corrélogramme est calculé en utilisant la méthode de Kendall car nos données sont appariées. Celle-ci permettra d'obtenir un coefficient de corrélation équivalent au Tau (τ) de Kendall qui mesure l'association de dépendance de deux variables. L'interprétation du corrélogramme doit se faire ainsi :

- Plus le coefficient de corrélation est proche de 1, plus la corrélation a tendance à être forte positivement (fonction croissante) entre les deux variables.
- Plus le coefficient de corrélation est proche de -1, plus la corrélation a tendance à être forte négativement (fonction décroissante) entre les deux variables.

Les données physiologiques donnent cinq variables que sont :

- La fréquence cardiaque moyenne (bpm). Elle sera notée FC
- La variabilité de la fréquence cardiaque (ms), ou moyenne quadratique des battements successifs d'un point de vue temporel, appelée RMSSD
- L'indice de stress mesuré, noté SI

- La puissance d'énergie spectrale de hautes fréquences cardiaques par transformée de Fourier (ms²), passée en logarithme népérien et notée ln(HF_FFT) ou lg_HF_FFT. Elle correspond aussi à la variabilité de la fréquence cardiaque mais d'un point de vue fréquentiel.
- Le ratio de puissance d'énergie spectrale de basses fréquences cardiaques sur hautes fréquences cardiaques par transformée de Fourier, passé en logarithme népérien et noté ln(LF/HF_FFT) ou lg_LFHF_FFT

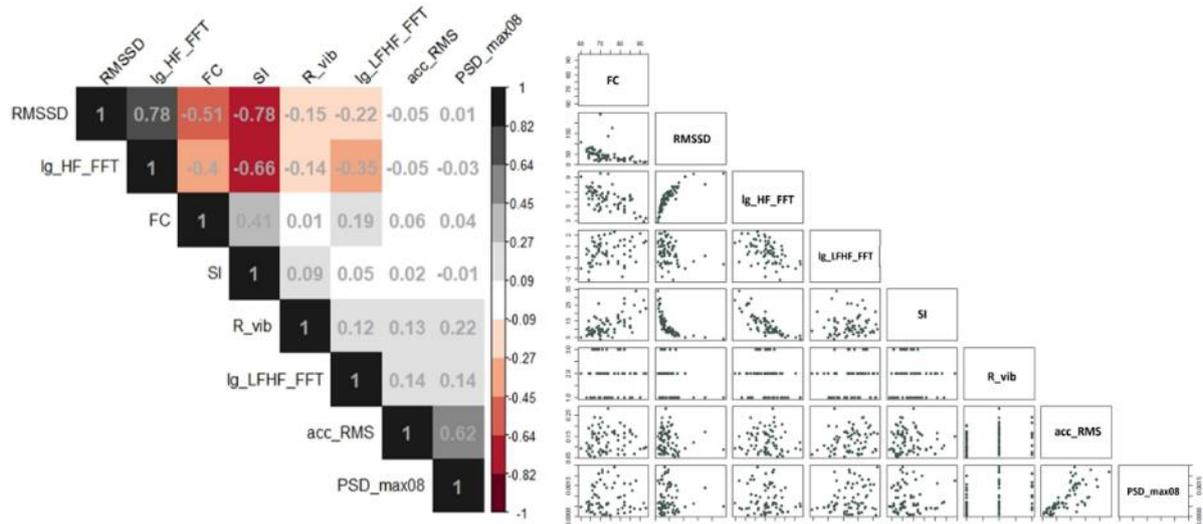


Figure 38 - Corrélogramme (à gauche) et scatter plot (à droite) des essais.

D'après le corrélogramme, les corrélations positives de couleur gris foncé seraient entre RMSSD et lg_HF_FFT ainsi qu'entre acc_RMS et PSD_max08. Les corrélations négatives en rouge foncé seraient entre RMSSD et SI ainsi qu'entre SI et lg_HF_FFT. Avec la matrice en scatterplot il peut être visualiser les graphiques entre les variables. Pour les corrélations mentionnées avant, il faut remarquer que RMSSD/SI et SI/lg_HF_FFT seraient plutôt liées par une fonction inverse négative et RMSSD/lg_HF_FFT par une fonction inverse positive alors que acc_RMS/PSD_max08 seraient liées plutôt par une fonction linéaire croissante. Le même type d'analyse a été réalisé dans le cas des sollicitations de type trot ou saut.

Les conclusions de l'étude sur les mesures physiologiques lors des essais en laboratoire sont les suivantes.

- Les résultats sont cohérents et significatifs pour la sollicitation de type marche et pour les comparaisons deux à deux entre des stimulations de type marche et de type trot. Il peut être constaté une corrélation forte entre certaines variables physiologiques ainsi qu'une tendance à voir que plus le plancher sera sollicité par un nombre important de personnes, plus l'accélération vibratoire sera élevée et plus les usagers seront gênés par le ressenti de ces vibrations.
- Les résultats sont assez cohérents mais beaucoup moins significatifs pour les sollicitations de type trot et de type saut. Toujours cette corrélation forte entre des variables physiologiques est constatée mais aucune autre conclusion viable ne peut être faite concrètement.
- **Aucune corrélation directe n'a été trouvée entre des variables mécaniques et des variables physiologiques ou psychologiques.**

Ce dernier point est inattendu par rapport à ce qui avait été prévu en début de projet. Il est envisageable que le niveau des vibrations n'induisse pas de réponses physiologiques au niveau des indicateurs qui ont été mesurés (principalement au niveau de l'activité cardiaque). D'autres indicateurs pourraient être utilisés – activité cérébrale, niveau de sudation – mais sont beaucoup plus complexes à mettre en place. Néanmoins, les résultats des enquêtes montrent une corrélation faible mais présente entre le niveau d'accélération et le ressenti. La faiblesse de la corrélation provient principalement du facteur humain : la sensibilité est très variable d'un individu à l'autre. Du fait de ces résultats, il a été décidé de ne pas réaliser de mesure physiologique lors des essais in situ afin de gagner du temps lors des essais et de pouvoir faire des mesures avec plus d'individus.

Concernant les résultats d'enquête, nous observons une corrélation significative entre le retour des enquêtes et les niveaux d'accélération. La synthèse des résultats sur planchers en laboratoire est indiqué sur la Figure 39. Cette représentation graphique adopte la forme d'un diagramme dit en boîte et moustaches, qui même si c'est un outil statistique très répandu, est décrit pour s'assurer de la bonne compréhension des graphes.

Dans ce schéma, les données sont présentées sous la forme d'un rectangle s'étendant du premier quartile au troisième quartile, avec une ligne médiane le traversant. La croix au centre de ce rectangle indique la moyenne. Les segments qui s'étendent au-delà du rectangle représentent les valeurs extrêmes, tant que la longueur des segments reste inférieure à 150% de la distance entre Q3 et Q1. Dans le cas contraire, les valeurs dépassant ce seuil sont représentées par des points distincts. Les différents éléments du schéma sont récapitulés sur la Figure 40.

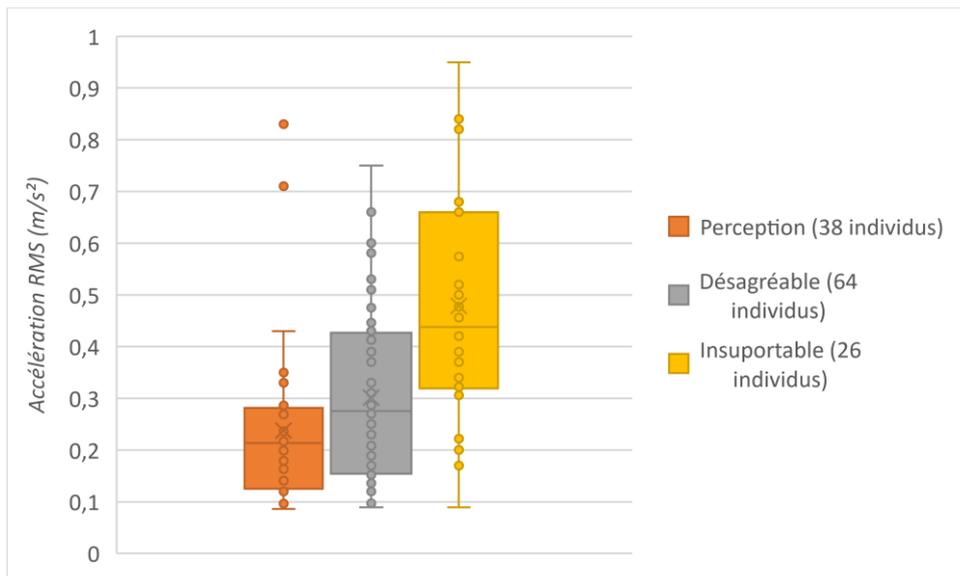


Figure 39 - Accélération RMS maximale en fonction du niveau de confort ressenti pour les essais en laboratoire

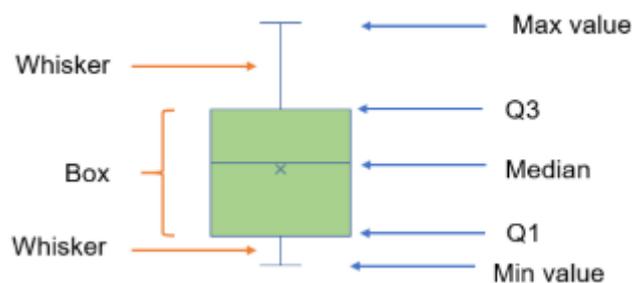


Figure 40 - Diagramme en boîte et moustaches

Nous observons un écart significatif entre les niveaux d'accélération lorsque les participants ont jugé la vibration juste perceptible, désagréable ou insupportable. Néanmoins, la variabilité sur les résultats est extrêmement importante, avec de grandes zones de recouvrement entre les différentes réponses.

Les essais en laboratoire ont permis d'affiner le protocole de mesure et ont fourni un grand nombre de données comparatives entre mesures physiques et résultat d'enquête sur le ressenti qui ont été affiné lors des essais in situ.

4.4. Essais in situ

4.4.1. Essais à l'école Frida Kahlo

L'objectif ici est de comparer les différents indicateurs issus de la norme ISO 2631 [4] autre que la valeur de l'accélération RMS utilisé jusqu'alors. Les indicateurs ont été normalisés de façon que leur valeur maximale soit égale à 1. A noter que les valeurs de vitesse ou de déplacement calculées en intégrant la mesure de l'accélération donnent des résultats non exploitables, elles n'ont pas été retenues pour la suite de l'étude.

Globalement, nous observons une relation quasi-linéaire entre le ressenti et les différents indicateurs. Les indicateurs semblent donc pertinents pour juger de l'inconfort lié à la sollicitation vibratoire (Figure 41).

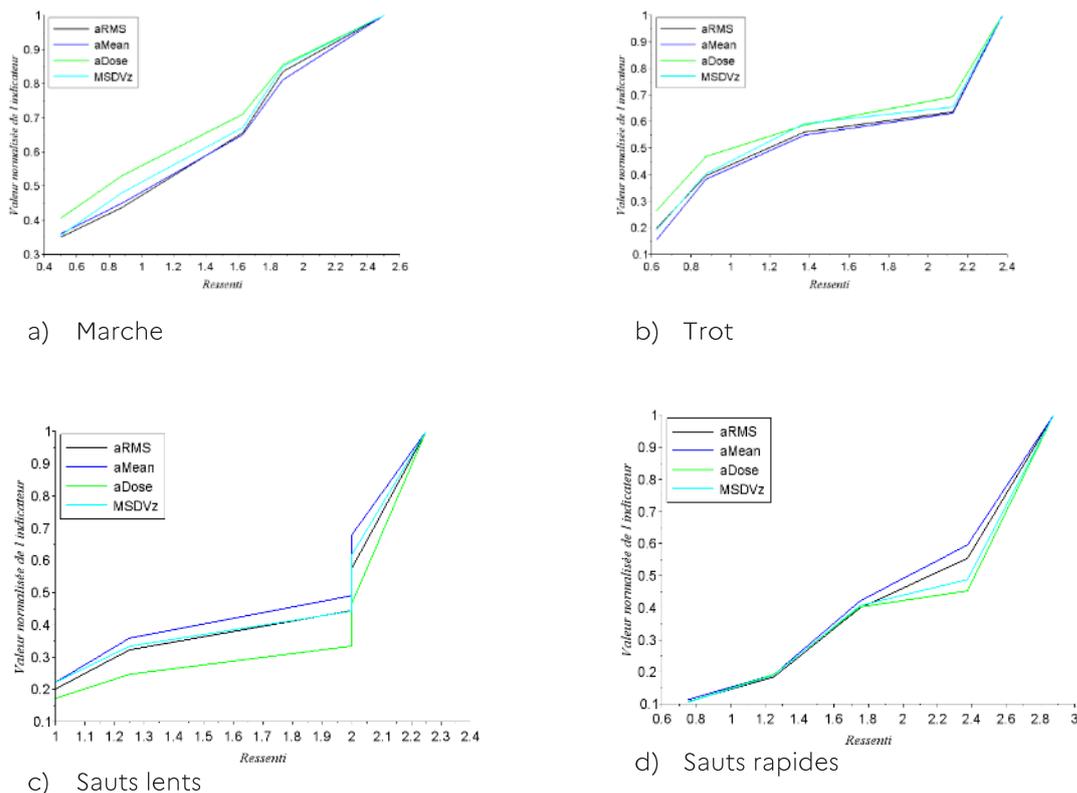


Figure 41 - Inconfort et indicateurs des niveaux de vibration pour les différentes sollicitations testées

Néanmoins, les niveaux de vibrations étaient sensiblement différents entre les types de sollicitation et la normalisation masque ces différences. Lorsque nous comparons les types d'essai entre eux, les résultats sont beaucoup plus variables. La Figure 42 compare les différents indicateurs en normalisant cette fois-ci avec la valeur maximale obtenue pour l'ensemble des sollicitations. Quel que soit l'indicateur, la marche engendre un ressenti très élevé même pour des valeurs faibles de l'indicateur. A l'inverse, les sauts engendrent des accélérations très importantes, cependant le ressenti n'est pas sensiblement plus haut que pour la marche.

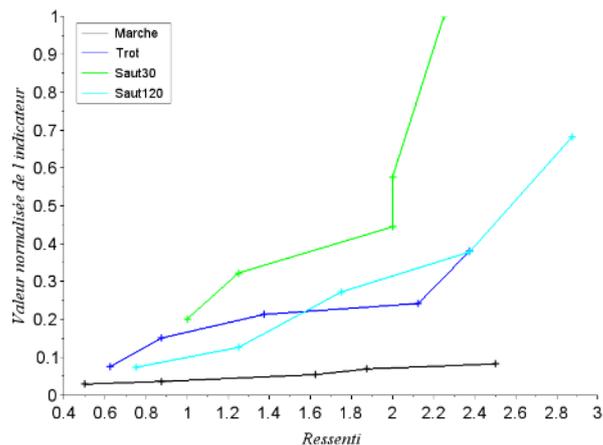


Figure 42 - Valeur normalisée de l'accélération efficace en fonction de la sollicitation

Il reste à définir comment cette différence peut s'expliquer, si elle est due à un mauvais indicateur physique ou s'il existe un biais expérimental dans la façon de collecter les données d'enquête. Une hypothèse avancée vient du protocole employé. Les sollicitations ont été réalisées de manière croissante, c'est-à-dire avec un générateur, puis 3, puis 6 etc... Les récepteurs s'attendaient donc à devoir donner une valeur de ressenti basse initialement et une valeur plus haute au fur et à mesure des essais, ce qui aurait provoqué artificiellement ces résultats. Une autre hypothèse est que la gêne provoquée par la présence des générateurs circulant autour des récepteurs occasionnerait un inconfort visuel plus important que l'inconfort dû au niveau de vibration.

C'est pourquoi deux modifications importantes ont été utilisées pour les essais suivants :

- Les essais successifs seront maintenant réalisés avec des amplitudes qui ne seront pas monotones. Les essais seront effectués dans un ordre quasi-aléatoire de façon à ne pas induire la réponse concernant les ressentis.
- Les générateurs demeurent désormais sur place pour limiter l'inconfort visuel des récepteurs.

Les essais de trot et de sauts ne semblent donc pas représentatifs du fait du biais apportés par l'ordre des vibrations émises. Cependant, la valeur des sensibilités lors des essais de marche est similaire avec les essais qui ont pu être faits à posteriori. La répartition des réponses est donnée en Figure 43.

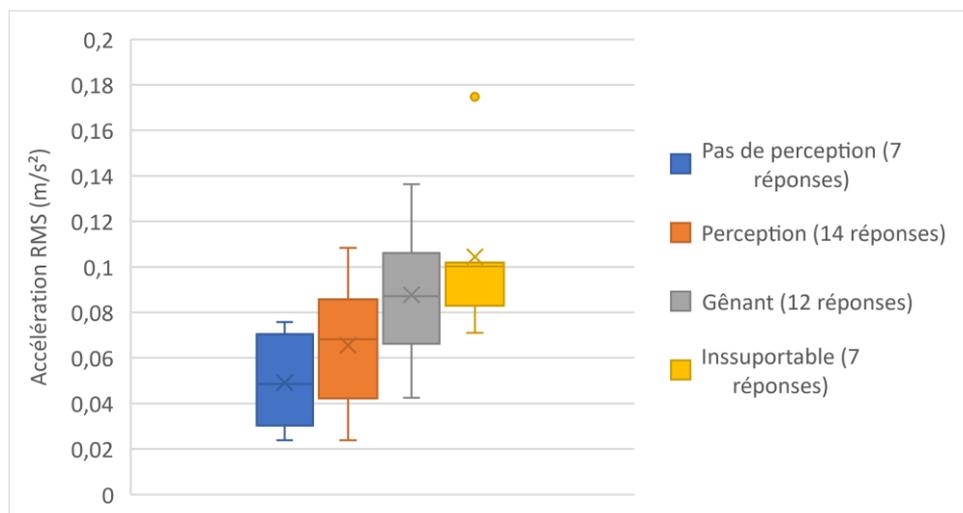


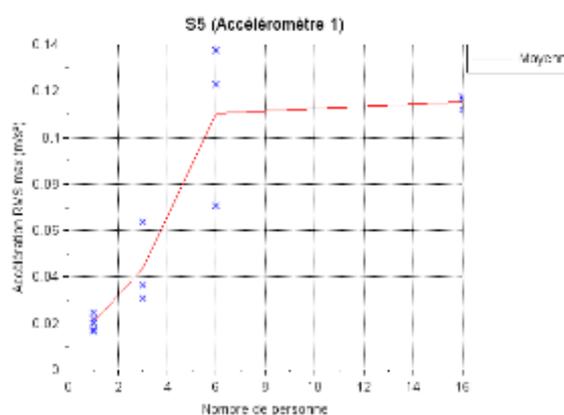
Figure 43 - Accélération RMS maximale en fonction du niveau de confort ressenti

A noter que le nombre de réponses est plus faible que celui des essais suivants.

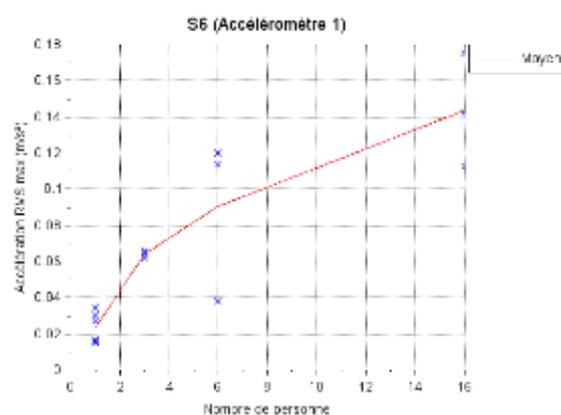
4.4.2. Essais au lycée Camille Jullian

La Figure 44 indique l'accélération RMS mesurée sous la chaise du 1^{er} récepteur suivant le type de sollicitation et le nombre de générateurs. Les résultats sont très similaires pour les autres accéléromètres. La variabilité des résultats est très importante, certains groupes ou individus génèrent des accélérations beaucoup plus faibles ou plus fortes en fonction de leur attaque du pied, de leur dynamisme, etc... Ce même type de différence était notée sur l'étude VIBOIS [19] avec des niveaux d'accélérations générées pouvant varier de 1 à 10 suivant les individus. Nous observons néanmoins une non-linéarité entre le niveau d'accélération et le nombre de générateurs, ce qui traduit l'effet de la non-coordination des mouvements.

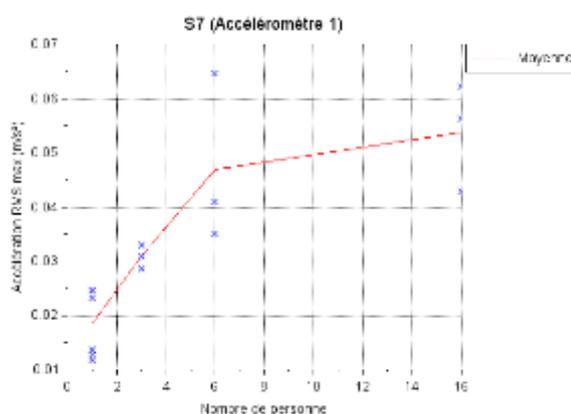
a) Jumping jack 60 bpm



b) Jumping jack 120 bpm



c) Cours sur place 120 bpm



d) Cours sur place 150 bpm

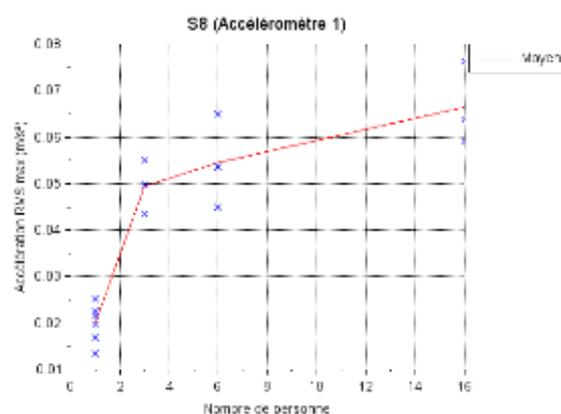


Figure 44 - Niveau d'accélération mesuré suivant la sollicitation et le nombre de générateurs

Dans ce projet, l'un de nos objectifs est d'établir un lien entre l'accélération et le niveau de confort ressenti par les personnes réceptrices. Les figures ci-dessous présentent une synthèse de tous les résultats obtenus lors de la campagne d'essai.

La tendance observée dans ces résultats, présentée à la Figure 45, est claire. À mesure que l'accélération augmente, le ressenti des vibrations augmente pour devenir de plus en plus gênant, voire insupportable. La fréquence maximale mobilisée dans le cas de ces essais est systématiquement proche de 10 Hz, c'est-à-dire proche de la fréquence fondamentale du plancher d'essai. Pour quelques rares essais, la fréquence du pas (~ 2 Hz) peut être légèrement prédominante vis-à-vis de la fréquence propre du plancher.

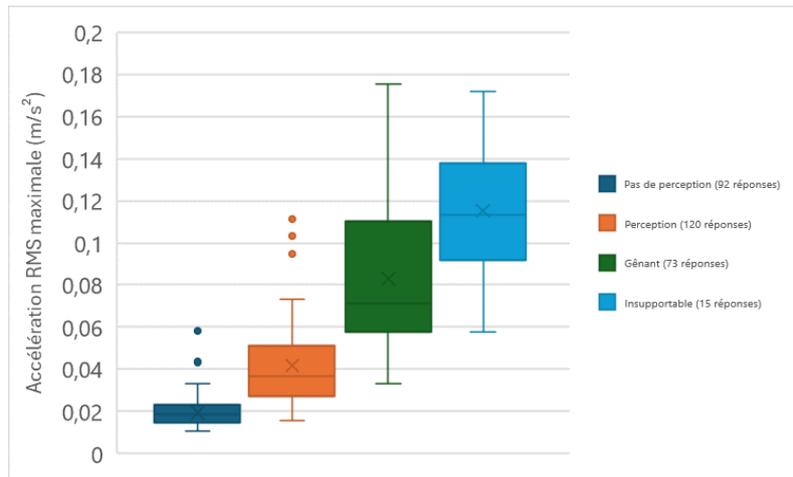


Figure 45 - Accélération RMS maximale en fonction du niveau de confort ressenti

Pour ces essais, nous ne trouvons pas de différence notable en termes de ressenti avec les différentes sollicitations, contrairement aux essais réalisés à Frida Kahlo. Il semble que le changement de protocole a permis de rectifier cette problématique. Les médianes, moyennes et écarts types des différents essais ne sont pas très différents parmi l'ensemble des récepteurs ayant répondu qu'ils ne percevaient pas la vibration (Figure 46). Le constat est globalement le même pour les autres réponses.

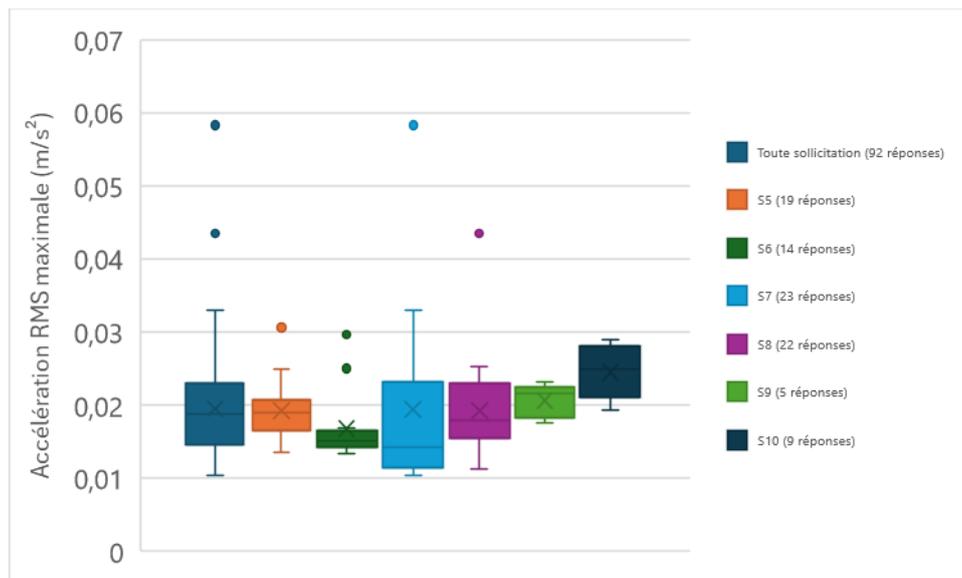


Figure 46 - Niveau d'accélération par sollicitation pour les récepteurs ayant répondu "pas de perception de la vibration"

Nous montrons donc ici que les seuils de sensibilité semblent bien corrélés directement avec les niveaux d'accélération, avec une variabilité importante mais qui ne remet pas en cause la significativité des résultats. Sur la base de ces essais, la limite de perception serait de l'ordre de 0,04 m/s², la limite d'inconfort de 0,08m/s² et la limite du supportable de 0,12 m/s². Ces seuils sont globalement bien supérieurs à ceux de l'ISO 10137 pour les bureaux (d'environ 0,03 m/s²). Cette différence s'explique par le caractère relativement bref de la sollicitation, ce qui permet d'accepter des niveaux plus importants.

4.5. Discussion sur les seuils de tolérance

Pour l'ensemble des essais, nous observons une corrélation significative entre le niveau d'accélération et l'estimation de l'inconfort. La variabilité des résultats est néanmoins très importante, ce qui est attendu pour des essais ayant trait à la perception. Les participants ont globalement mieux « tolérés » les vibrations lors des tests en laboratoire que lors des tests in situ. Ce phénomène peut s'expliquer de différentes manières.

- Le plancher destiné aux essais en laboratoire a été dimensionné pour être très inconfortable, les niveaux d'accélération sont rapidement conséquents. Les récepteurs ont probablement comparé par rapport à une solution de référence déjà peu confortable, ce qui donne des résultats relatifs cohérents, mais plus élevés en valeur absolue.
- Le protocole d'essai s'est affiné au cours des essais, avec des questions plus ciblées et une mise en contexte plus réaliste. Cela se traduit par des niveaux plus bas et des écarts types plus faibles pour les derniers essais réalisés in situ ou sur table vibrante.
- Dans le cas des essais in situ, un certain nombre de contribution autre que la vibration peut nuire au confort : température, bruit, inconfort visuel. Les niveaux d'acceptabilité sont donc plus faibles.

Les essais in situ sont plus représentatif de la réalité et doivent être donc pris comme référence pour définir des seuils d'acceptabilité. L'analyse des résultats a été uniquement faite sur la base des niveaux d'accélération efficace, pour se comparer avec l'ISO 10137[5, p. 1].

Sur la base des essais in situ, nous proposons les niveaux suivants pour les sollicitations vibratoires continues. Ces valeurs proposées se base sur la médiane des résultats d'enquête. Il n'est donc pas exclu qu'à ce niveau d'accélération certaines personnes ressentent un inconfort.

	Proposition GIVILIF	Comparaison ISO 10137 – seuil 4-8Hz –	Comparaison PrEN 1995-1-1: 2023
Seuil de perception	0,04m/s ²	0,005 m/s ²	0,02 (Qualité I)
Seuil d'inconfort	0,08 m/s ²	0,02 m/s ² (Limite bureau)	0,06 (Qualité III)
Seuil limite	0,12 m/s ²	0,04 m/s ² (Limite atelier)	0,24 (Qualité VI)

Tableau 6 - Proposition de seuils d'acceptabilité des vibrations de plancher en accélération

Les seuils de l'Eurocode sont exprimés à la fois en termes d'accélération et de vitesse. En approchant les signaux mesurés par un signal harmonique sur les planchers d'essais in situ utilisés dans le cadre de ce projet, on peut définir indirectement un seuil en vitesse.

	Proposition GIVILIF	Comparaison ISO 10137 – 8Hz –	Comparaison PrEN 1995-1-1: 2023
Seuil de perception	6,3.10 ⁻⁴ m/s	1.10 ⁻⁴ m/s	4.10 ⁻⁴ m/s (Qualité I)
Seuil d'inconfort	12,6.10 ⁻⁴ m/s	4.10 ⁻⁴ m/s (Limite bureau)	12.10 ⁻⁴ m/s (Qualité III)
Seuil limite	19.10 ⁻⁴ m/s	8.10 ⁻⁴ m/s (Limite atelier)	48.10 ⁻⁴ m/s (Qualité VI)

Tableau 7 - Proposition de seuils d'acceptabilité des vibrations de plancher en accélération

Les seuils proposés sont sensiblement plus élevés que ceux de l'ISO 10137. La sollicitation se déroule sur une durée relativement courte et avec une amplitude ressentie irrégulière, ce qui explique les différences de seuils. En comparaison avec le PrEN 1995-1-1 :2023, la qualité I correspondrait à une absence totale de perception des vibrations, la qualité IV correspondrait à une situation inconfortable et les qualités plus hautes correspondrait à un risque certain que les vibrations soient jugées insupportables.

Pour un bâtiment résidentiel, pour lequel la vibration sera exacerbée en position allongé la nuit, il serait recommandé de disposer de plancher de qualité I à III. Pour les bureaux, il serait envisageable d'utiliser aussi des planchers de qualité IV. Les plancher de qualité V et VI devraient être réservés aux zones où la situation debout est majoritaire (atelier, hall, couloir).

5. Modélisation du chargement

5.1. Modèle de charge pour une personne

L'excitation rythmique due à une seule personne sur une structure peut être modélisée soit dans le domaine temporel, soit dans le domaine fréquentiel. L'inconvénient majeur des modèles de charges temporelles réside dans le fait que la personne est supposée répéter la même action avec l'amplitude constante et la fréquence constante durant l'activité rythmique. En réalité, la fréquence et l'amplitude de la charge varient d'un impact à l'autre (« effets d'intra-variabilités »). L'activité humaine est plutôt considérée comme un processus stochastique quasi-périodique à bande étroite. Des modèles de charge ont donc été développés dans le domaine fréquentiel, notamment en termes de Densité Spectrale de Puissance (DSP).

5.1.1. Thèse de doctorat d'El Asri [18]

El Asri a proposé, dans le cadre de sa thèse de doctorat, un modèle de charge fréquentielle qui s'est basé sur celui de Xiong et Chen [27] comme suit :

$$S_p(f) = (m g \alpha)^2 \sum_{h=1}^3 \left\{ a_h^2 \exp \left[-\frac{(f - h f_p)^2}{(h \delta)^2} \right] \right\}$$

Où : f_p : fréquence d'excitation en Hz

a_h : amplitude du h -ième harmonique de la charge en m/s^2

α : coefficient des amplitudes

δ : coefficient de bande passante qui détermine l'étendue de la propagation d'énergie au voisinage du h -ième harmonique en kg

m : poids de la personne en kg

g : accélération de la pesanteur, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Les valeurs des amplitudes a_h dépendant de l'activité sont données dans le Tableau 8.

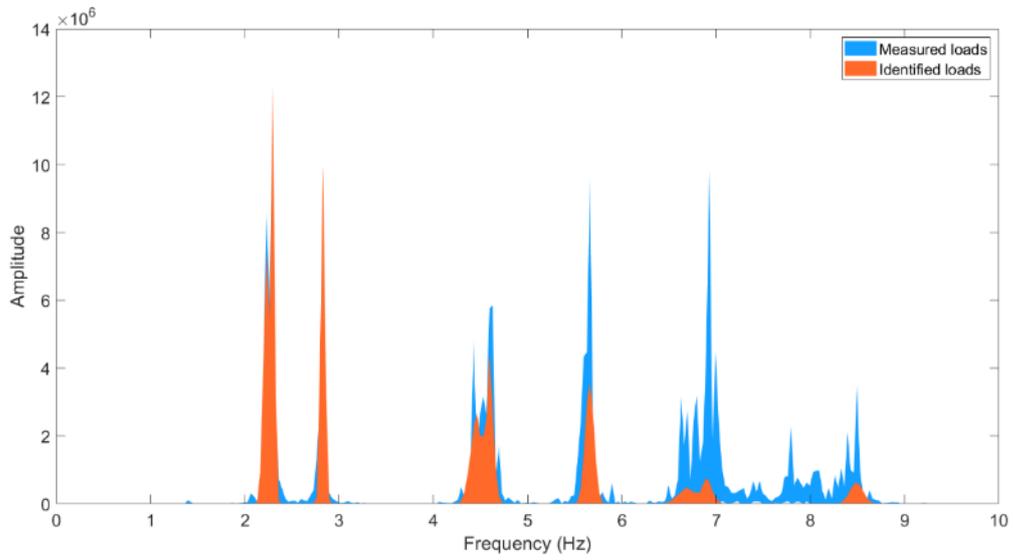
Activité	a_1	a_2	a_3
Talon-fesse / Course sur place	1	0,4	0,15
Jumping Jack / Saut rapide	1	0,6	0,25

Tableau 8 : Amplitudes a_h du modèle de charge d'El Asri

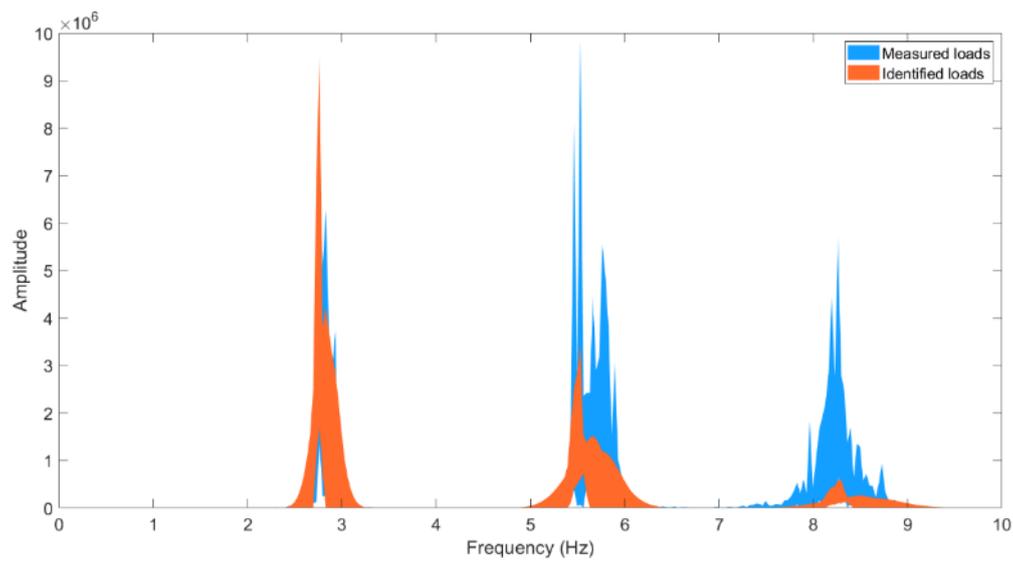
Les paramètres du modèle de charge (f_p , α , δ) qui sont identifiés à partir des résultats d'essais en laboratoire (voir le paragraphe 2 pour plus de détails), sont donnés dans le Tableau 9. Les courbes mesurées et identifiées de DSP de la charge d'une personne sont montrées à la Figure 47 :

Activité	f_p (Hz)	α	δ
Jumping Jack	$2,36 \pm 0,21$	$4,64 \pm 0,70$	$0,035 \pm 0,01$
Saut rapide	$2,81 \pm 0,05$	$3,64 \pm 0,81$	$0,10 \pm 0,05$
Talon-fesse	$3,26 \pm 0,06$	$3,80 \pm 0,40$	$0,033 \pm 0,01$
Course sur place	$2,62 \pm 0,10$	$3,53 \pm 0,49$	$0,041 \pm 0,02$

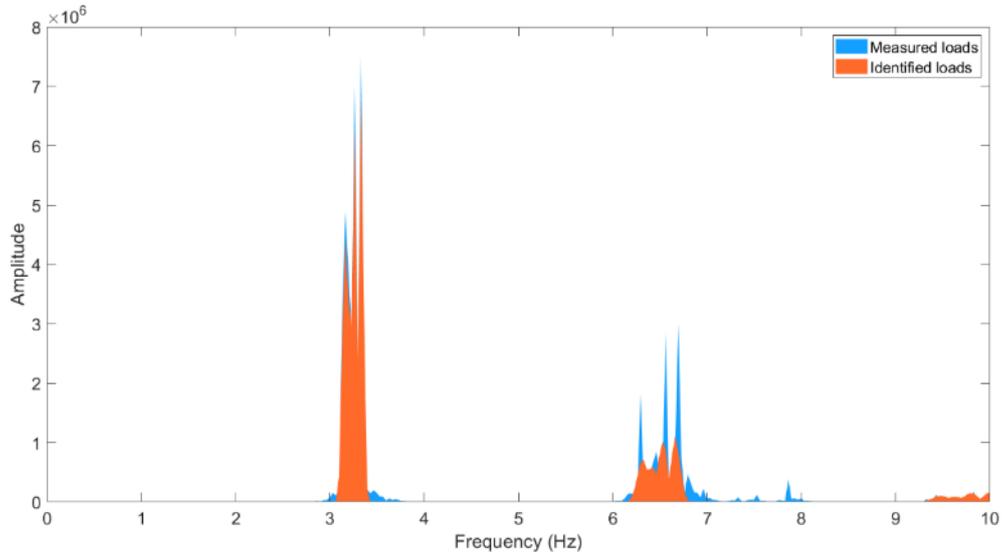
Tableau 9 : Paramètres du modèle de charge d'El Asri



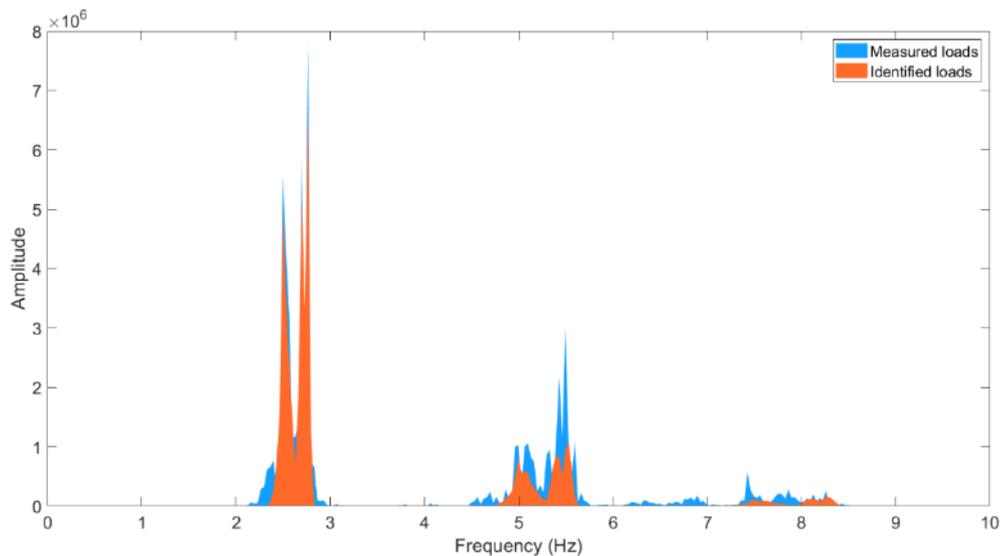
(a) Jumping Jack



(b) Saut rapide



(c) Talon-fesse



(d) Course sur place

Figure 47 : DSP de la charge d'une personne mesurées et identifiées

5.1.2. Méthode d'identification du modèle de charge pour une personne

Les modèles de charges proposés dans la thèse d'El Asri et l'article de Xiong et Chen ont été identifiées directement à la partir des courbes de DSP de la charge d'excitation. Les courbes de DSP ne sont pas « lisses » pour avoir une bonne identification des paramètres du modèle de charge comme constaté à la Figure 47. Pour l'améliorer, une nouvelle technique d'identification fondant sur l'analyse temps-fréquence par la transformation en ondelettes est utilisée. Les détails de la transformation en ondelettes sont donnés dans la thèse de doctorat de Nguyen [28]. Les paramètres des modèles de charges sont identifiés au travers de la fonction spectrale en ondelette (FSO) :

$$FSO^{(F)}(a) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |\hat{\psi}(a\omega)|^2 S_F(\omega) d\omega$$

Où : $S_F(\omega)$: densité spectrale de puissance de la charge d'excitation

$\hat{\psi}(\omega)$: transformée de Fourier de l'ondelette mère de Cauchy :

$$\hat{\psi}(\omega) = \frac{2\pi \omega^n \exp(-\omega)}{n!} H(\omega)$$

$H(\omega)$: fonction d'Heavyside

n : paramètre de l'ondelette de Cauchy

a : paramètre d'échelle. Pour l'ondelette de Cauchy : $a = n/\omega$

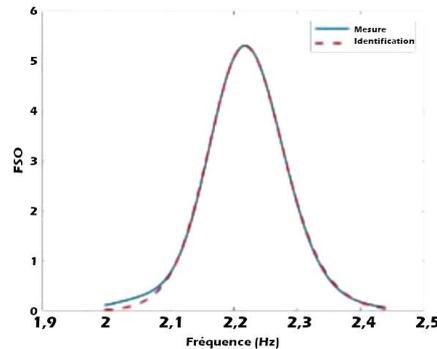


Figure 48 – Fonction Spectrale de l'Ondelette du 1^{er} harmonique de la charge d'excitation (jumping jack)

Un exemple de la FSO du 1^{er} harmonique de la charge d'excitation pour l'essai de jumping jack sur le plancher en laboratoire est montré à la Figure 48. On s'aperçoit que la courbe de trait continu qui représente la FSO de la charge mesurée est plus « lisse » que la courbe de DSP associée. Les paramètres identifiés du modèle de charge (la courbe de trait discontinu) sont donc plus pertinents par rapport à ceux qui sont identifiés directement à partir de la DSP.

5.1.3. Modèle de charge pour une personne pour le jumping jack et la course sur place

Le modèle de charge en DSP proposé dans le cadre du projet se fonde sur celui de Xiong :

$$S_p(f) = (m g)^2 \sum_{h=1}^3 \left\{ a_{1,h}^2 \exp \left[-\frac{(f - h f_p)^2}{(h \delta_1)^2} \right] + a_{2,h}^2 \exp \left[-\frac{(f - h f_p)^2}{(h \delta_2)^2} \right] \right\}$$

Les paramètres du modèle (δ_1 , δ_2 , $a_{1,h}$, $a_{2,h}$) sont identifiés pour chaque harmonique (h) et pour chaque fréquence de saut (f_p) par la minimisation au sens des moindres carrés de la FSO de la charge d'excitation mesurée ($FSO^{(F)}$) et celle du modèle de charge ($FSO^{(p)}$) :

$$\min_{\delta_1, \delta_2, a_{1,h}, a_{2,h}} \left\{ \int_{a_1}^{a_2} [FSO^{(F)}(a) - FSO^{(p)}(a)]^2 da \right\}$$

Où l'intervalle des valeurs de l'échelle (a_1 et a_2 dont les fréquences associées sont f_1 et f_2) pour l'identification des paramètres associés à l'harmonique h de la charge est choisi comme suit :

$$\begin{aligned} f_1 &= h f_p - 0,1 f_p \\ f_2 &= h f_p + 0,1 f_p \end{aligned}$$

Un exemple de la FSO du 1^{er} harmonique de la charge d'excitation identifiée est également montré à la Figure 48 (trait discontinu). Les paramètres du modèle de charge pour le jumping-jack et la course sur place sont donnés dans la suite. Chaque paramètre (δ_1 , δ_2 , $a_{1,h}$, $a_{2,h}$) est une fonction cubique de la fréquence de saut :

$$P(f_p) = p_1 f_p^3 + p_2 f_p^2 + p_3 f_p + p_4$$

5.1.3.1. Paramètres du modèle de charge pour le jumping jack

Les paramètres donnés ci-dessous sont valables pour des fréquences de saut dans l'intervalle de $1,5 \text{ Hz} \leq f_p \leq 2,8 \text{ Hz}$.

Harmonique h	$a_{1,h}$			
	p_1	p_2	p_3	p_4
1	41,4	-269,2	560,8	-364,6
2	8,58	-58,43	130,1	-92,5
3	-0,72	4,99	-11,5	9,23

Tableau 10 : Amplitude $a_{1,h}$ du modèle de charge pour le jumping jack

Harmonique h	$a_{2,h}$			
	p_1	p_2	p_3	p_4
1	2,16	-14,82	32,32	-20,55
2	-2,23	13,61	-26,64	17,18
3	-1,29	8,71	-19,23	14,11

Tableau 11 : Amplitude $a_{2,h}$ du modèle de charge pour le jumping jack

δ_1			
p_1	p_2	p_3	p_4
0,0009	0,0159	-0,0429	0,0449

Tableau 12 : Amplitude δ_1 du modèle de charge pour le jumping jack

δ_2			
p_1	p_2	p_3	p_4
0,6055	-3,8713	7,9941	-5,1992

Tableau 13 : Amplitude δ_2 du modèle de charge pour le jumping jack

5.1.3.2. Paramètres du modèle de charge pour la course sur place

Les paramètres donnés ci-dessous sont valables pour des fréquences de saut dans l'intervalle de $2,1 \text{ Hz} \leq f_p \leq 2,7 \text{ Hz}$.

Harmonique h	$a_{1,h}$			
	p_1	p_2	p_3	p_4
1	25,5	-130,4	170,0	0,0
2	4,76	-21,5	24,3	0,0
3	1,0	-4,97	6,16	0,0

Tableau 14 : Amplitude $a_{1,h}$ du modèle de charge pour la course sur place

Harmonique h	$a_{2,h}$			
	p_1	p_2	p_3	p_4
1	1,80	-8,02	9,91	0,0
2	-4,06	20,2	-24,6	0,0
3	0,28	-1,40	1,78	0,0

Tableau 15 : Amplitude $a_{2,h}$ du modèle de charge pour la course sur place

δ_1			
p_1	p_2	p_3	p_4
-0,2783	1,3459	-1,579	0,0

Tableau 16 : Amplitude δ_1 du modèle de charge pour la course sur place

δ_2			
p_1	p_2	p_3	p_4
0,5351	-2,6576	3,3996	0,0

Tableau 17 : Amplitude δ_2 du modèle de charge pour la course sur place

5.2. Modèle de charge pour un groupe de personnes

L'effet de groupe est pris en compte dans le modèle de charge via le coefficient de réduction qui est en fonction du nombre de personnes dans le groupe. La charge exercée par chaque personne k dans un groupe de N personnes est réduite par le coefficient de réduction $C(N)$:

$$P_{N,k}(f) = C(N) P_{1,k}(f)$$

L'identification du coefficient de réduction $C(N)$ est également effectuée par la minimisation au sens de moindres carrés.

5.2.1. Thèse de doctorat d'El Asri

Dans sa thèse, El Asri propose des coefficients de réduction $C(N)$ pour chaque activité :

Activité	Coefficient de réduction $C(N)$
Jumping Jack	$C(N) = 0,44 + \frac{0,56}{N}$
Saut rapide	$C(N) = 0,3 + \frac{0,7}{N}$
Talon-fesse	$C(N) = N^{-0,53}$ pour $1 \leq N \leq 16$ $C(N) = 0,23$ pour $16 \leq N \leq 32$
Course sur place	$C(N) = N^{-0,43}$ pour $1 \leq N \leq 16$ $C(N) = 0,3$ pour $16 \leq N \leq 32$

Tableau 18 : Coefficient de réduction pour l'effet de groupe dans le modèle de charge d'El Asri

5.2.2. Coefficient de réduction

Comme les paramètres du modèle de charge ont été identifiés par la fonction spectrale de l'ondelette, les nouveaux coefficients de réduction sont déterminés et donnés dans le Tableau 19 pour $1 \leq N \leq 16$.

Activité	Coefficient de réduction $C(N)$
Jumping Jack	$C(N) = -1,0 + 2 N^{-0,1556}$
Saut rapide	$C(N) = -1,0 + 2 N^{-0,0778}$
Talon-fesse	$C(N) = -0,25 + 1,25 N^{-0,4135}$
Course sur place	$C(N) = -1,0 + 2 N^{-0,0685}$

Tableau 19 : Coefficient de réduction pour l'effet de groupe

L'identification du coefficient de réduction pour l'effet de groupe du jumping-jack est montrée à la Figure 49.

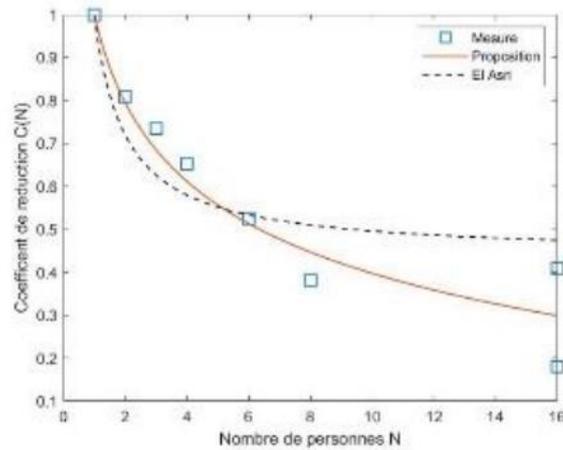


Figure 49 : Coefficient de réduction pour l'effet de groupe du jumping jack

5.3. Modèle de charge

Les essais ont permis de prendre en compte l'effet de groupe dans la détermination des modèles de charge. Plus les activités sont synchrones, plus la décroissance du coefficient de réduction en fonction du nombre de personne est faible (par exemple saut rapide ou course sur place). Dans le cas d'une activité où il est plus difficile d'être synchrone comme le talon fesse, la décroissance du coefficient de réduction est très rapide et peut atteindre 0,15 pour 16 personnes. Les autres activités rythmiques auront un coefficient de réduction avec la même allure, avec des pentes plus ou moins prononcé suivant le niveau de coordination.

Il pourrait être envisagé pour une intégration dans les règlements de dimensionnement de classer les différentes activités rythmiques dans des catégories suivant le niveau de coordination depuis la marche simple (coordination nulle), les salles de spectacle (coordination moyenne) ou les salles de sport (grande coordination).

6. Conclusion / Perspectives

Dans le cadre du projet GIVILIF, de nombreuses expérimentations ont eu lieu pour mieux appréhender la problématique des vibrations de plancher en termes de seuils de sensibilité acceptable et de modélisation des chargements complexes. Le projet a permis d'aboutir à des propositions de seuils de vibration acceptable qui à la fois ne pénalisent pas trop les concepteurs souhaitant utiliser des solutions légères et qui minimisent le risque d'inconfort des usagers.

Les études de sensibilité sont difficiles à mettre en place à cause du grand risque de biais expérimentaux : il faut isoler l'inconfort lié à la vibration des autres potentielles sources d'inconfort et ne pas orienter les sujets avec les questionnaires. Le projet a contribué à définir des procédés d'évaluation les plus représentatifs des situations d'inconfort pouvant advenir dans un bâtiment, afin de proposer des seuils réalistes. Le projet a aussi permis de définir des modèles de chargement pour certaines sollicitations de groupe. D'autres sollicitations pourraient être étudiées avec la même méthodologie.

Le projet apporte des éléments importants pour créer les prochaines réglementations de l'Eurocode 3 et 5. La question de la vibration des planchers étant parfois dimensionnante, la justesse des critères réglementaires a une grande importance économique. Néanmoins, un critère trop laxiste pourrait engendrer des situations d'inconfort et faire une mauvaise publicité à la filière.

La problématique des vibrations mécaniques des planchers a été traitée de manière poussée par les partenaires du projet. Néanmoins des questions demeurent sur les interactions entre les problématiques vibratoires et acoustiques. Plusieurs organismes demandent des seuils bien définis vis-à-vis de la perception de différentes machines (pompe à chaleur, ascenseur, cage d'escalier) qui génèrent à la fois de la vibration et du bruit. La méthodologie développée dans le cadre du projet GIVILIF pourrait servir à alimenter à projet sur la perception vibro-acoustique.

7. Valorisation – diffusion du projet

Cette partie synthétise les différentes publications et communications autour du projet.

7.1. Article de journal : Human perception of lightweight floors vibrations, New Investigations to Improve Wood Building Performances (GIVILIF Project)

Talhi Assia (GRECCAU), BARLET Aline (GRECCAU), LE NORMAND Regis (GRECCAU), CATTEROU Thomas (FCBA), CASTAING Jean-Baptiste (FCBA), BOULET Sylvain (FCBA)

Key Engineering Materials Submitted: 2022-11-09

ISSN: 1662-9795, Vol. 942, pp 181-186

Abstract

The present paper aims to highlight the first findings of the GIVILIF project (Group Induced Vibrations on Light Floors). The primary purpose of this project is to improve the existing standards around the vibrations of timber floors induced by group activities. It presents the first part of the applied methodology for the subjective and objective evaluation of vibrations. First, a survey among inhabitants was conducted better to understand the vibrational discomfort of existing buildings' occupants. Then, tests on a shaking table explored the perception of individuals to define thresholds of perception, discomfort and intolerance. It was found that the acceleration graph assures certain conformity with the thresholds offered by the ISO2631 standard concerning offices and residences, purpose of this study.

7.2. Présentation en conférence : Lightweight floors vibrational comfort, first experimental results of the GIVILIF project

WoodRise 2022 - Slovénie

Abstract

One of the main issues of high-rise timber building is the large floor height compared with steel or concrete construction. Then, to make more spacious building, it may be desirable to expand the joist spans. However, by doing so, the stiffness of the wooden floor will decrease, and vibration discomfort could appear. Then the regulatory texts to define and gives critical values of floor parameters to ensure comfort remains to be improved.

The parameters and the thresholds of perception and intolerance to evaluate and predict the vibration discomfort for other contexts (Ussher et al., 2022) are known. In Europe and particularly in France where lightweight floors are not so commons, it is always required to carry out more empirical experiments about the relation between physical characteristics of vibrations (frequency, displacement, velocity, acceleration) and psycho-physiological sensations. The GIVILIF project (Group Induced vibrations on Light floors) has been initiated to contribute to the thoughts in progress to improve and complete the existing standards concerning vibrations of light floors induced by group activities, especially ISO 2631 and ISO 10137 (Hu et al., 2018). In particular, the problem related to floors with a fundamental frequency lower than 8 Hz which are not considered in the Eurocodes, require a specific study for each project.

7.3. Article de congrès : Crowd size effect on floor vibration response due to random and rhythmic excitations

Youssef El Asri (CTICM), Mladen Lukić (CTICM), Mohammed Hjjaj (INSA Rennes), Maël Couchaux (INSA Rennes), Vincent Denoël (Liège)

International congress on Sound and Vibration

To investigate crowd size effect on building floors response, human-induced vibrations have been measured on a flexible composite floor exposed to various activities. Experimental Modal Analysis has revealed the existence of 20 mode shapes below 10Hz, with a fundamental frequency of 3.56Hz. The floor has then been exposed to various human-induced activities, covering both sedentary rhythmic activities (skipping and jumping) and activities where the individuals were moving randomly across the floor (walking and running). Accelerations have been registered at 10 different locations. By repeating these activities with a number of 1, 2, 4, 8, 16 and 32 participants, the group size effect has been evaluated through the

measured accelerations. The observed trends not only differ for each activity but also slightly depart from well-accepted laws proposed by current design guidelines. A comprehensive data analysis and discussion is provided to support the proposal of size-effect laws for these types of activities that will allow a more realistic vibration serviceability assessment of building floors with multiple usages.

7.4.Thèse : Vibration of floor structures subjected to crowd-rhythmic activities

Youssef El Asri (CTICM)

De nos jours, les planchers de bâtiment souffrent de vibrations excessives produites par l'activité humaine. Ceci est plus remarquable lorsqu'un groupe de personnes tente d'exercer des activités rythmiques de manière coordonnée. Les effets sur les occupants recevant ces vibrations peuvent aller de la perception, l'inconfort ou même la panique. Cette thèse vise à établir une approche fréquentielle de modélisation des activités rythmiques de foule et proposer des méthodes pour évaluer la réponse vibratoire des planchers soumis à ces cas de charge. Le Chapitre 2 présente d'abord une revue de littérature sur le sujet. Le Chapitre 3 décrit la première campagne expérimentale effectuée sur un plancher de laboratoire où des groupes d'individus exerçaient des activités rythmiques dans des conditions proches de la pratique. Un modèle de charge caractérisant les activités rythmiques de groupe dans le domaine fréquentiel est développé au Chapitre 4. Celui-ci comprend un modèle spectral pour une seule personne combiné avec des coefficients de coordination pour un groupe d'individus. La procédure pour identifier les paramètres de charge associés est détaillée puis appliquée aux résultats d'essais de laboratoire pour quatre activités rythmiques. De tels modèles ont été validés dans le Chapitre 5 sur la base d'essais vibratoires réalisés sur un plancher existant, avec une extension de leur domaine d'application. Après comparaison avec des modèles de la littérature, les modèles ainsi obtenus sont utilisés dans le Chapitre 6 pour établir des méthodes pratiques pour la prédiction de la réponse des planchers soumis à des activités rythmiques de groupe.

7.5.Présentation du projet en vidéo

Lors des premiers essais réalisés à FCBA, une vidéo a été réalisée pour présenter les thématiques du projet <https://www.youtube.com/watch?v=tE7GTqDIdmg>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] AFNOR, "Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1: généralités - Règles communes et règles pour les bâtiments.," 2005
- [2] S. Ohlsson, *Springiness and Human-induced Floor Vibrations: A Design Guide*. Swedish Council for Building Research, 1988.
- [3] CEN, "Draft - prEN 1995-1-1 - Design of timber structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings." 2024.
- [4] Organisation internationale de normalisation, *Norme internationale ISO 2631-1: vibrations et chocs mécaniques: évaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps. Partie 1, Spécifications générales = Mechanical vibration and shock: evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1, General requirements*. Genève, Suisse: ISO, 1997.
- [5] ISO, "ISO 10137:2007 - Bases du calcul des constructions, aptitude au service des bâtiments et des passerelles sous vibrations." 2007. [Online]. Available: <http://www.iso.org/cms/render/live/fr/sites/isoorg/contents/data/standard/03/70/37070.html>
- [6] E. Commission, D.-G. for Research, Innovation, C. Butz, G. Sedlacek, and C. Heinemeyer, *Generalisation of criteria for floor vibrations for industrial, office, residential and public building and gymnastic halls*. Publications Office, 2006.
- [7] DIN, "DIN 4150-2 Vibrations aux bâtiments - Partie 2: Effets sur personnes dans les bâtiments." 1999.
- [8] M. Feldmann, S. J. Hicks, and C. Heinemeyer, "Human-Induced Vibration of Steel Structures (HIVOSS)." European Commission, 2010.
- [9] L. J. Hu and Y. Chui, "Development of a design method to control vibrations induced by normal walking action in wood-based floors," in *Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering*, 2004, pp. 217–222.
- [10] J. Weckendorf, E. Ussher, and I. Smith, "Dynamic response of CLT plate systems in the context of timber and hybrid construction," *Composite Structures*, vol. 157, pp. 412–423, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.08.033.
- [11] J. Weckendorf, T. Toratti, I. Smith, and T. Tannert, "Vibration serviceability performance of timber floors," *Eur. J. Wood Prod.*, vol. 74, no. 3, pp. 353–367, May 2016, doi: 10.1007/s00107-015-0976-z.
- [12] P. Hamm, "Floor vibration - new results," presented at the WTCE, 2010.
- [13] L. Hu, Y.-H. Chui, P. Hamm, T. Toratti, and T. Orskaug, "Development of ISO baseline vibration design method for timber floors," *WTCE*, 2018.
- [14] Jean Marsac, "Variabilité de la fréquence cardiaque: un marqueur de risque cardiométabolique en Santé Publique," *Bulletin de l'académie nationale de médecine*, Accessed: May 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.academie-medecine.fr/variabilite-de-la-frequence-cardiaque-un-marqueur-de-risque-cardiometabolique-en-sante-publique/>
- [15] Thomas Catterou, "Rapport d'essais - Essais en laboratoire / Projet GIVILIF." 2022.
- [16] C. Y. Shih, Y. G. Tseui, R. J. Allemang, and D. L. Brown, "Complex mode indication function and its applications to spatial domain parameter estimation," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 2, no. 4, pp. 367–377, Oct. 1988, doi: 10.1016/0888-3270(88)90060-X.
- [17] C. J. Ku and Y. Tamura, "Rational Fraction Polynomial Method and Random Decrement Technique for Force-Excited Acceleration Responses," *Journal of Structural Engineering*, vol. 135, no. 9, pp. 1134–1138, Sep. 2009, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2009)135:9(1134).
- [18] Y. El Asri, "Vibration of floor structures subjected to crowd-rhythmic activities," These de doctorat, Rennes, INSA, 2023. Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://theses.fr/2023ISAR0006>
- [19] Thomas Catterou, "Rapport VIBOIS - Vibration des planchers bois." 2021.
- [20] Thomas Catterou, "Rapport d'essais - Essais in situ / Projet GIVILIF." 2024.
- [21] J. Negreira, A. Trollé, K. Jarnerö, L.-G. Sjökvist, and D. Bard, "Psycho-vibratory evaluation of timber floors – Towards the determination of design indicators of vibration acceptability and vibration annoyance," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 340, pp. 383–408, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.jsv.2014.12.001.
- [22] T. Toratti and A. Talja, "Classification of Human Induced Floor Vibrations," *Building Acoustics*, vol. 13, no. 3, pp. 211–221, Sep. 2006, doi: 10.1260/135101006778605370.
- [23] M. M. Ebadi, G. Doudak, and I. Smith, "Evaluation of floor vibration caused by human walking in a large glulam beam and deck floor," *Engineering Structures*, vol. 196, p. 109349, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109349.

- [24] H. Liu, "Corrélation entre perception au confort vibratoire et comportement dynamique de planchers bois : apport pour le dimensionnement," thesis, Lyon, INSA, 2006. Accessed: Apr. 10, 2019. [Online]. Available: <http://www.theses.fr/2006ISAL0134>
- [25] A. Ebrahimpour and R. L. Sack, "A review of vibration serviceability criteria for floor structures," *Computers & Structures*, vol. 83, no. 28, pp. 2488–2494, Nov. 2005, doi: 10.1016/j.compstruc.2005.03.023.
- [26] K. Jarnerö, D. Bard, and C. Simmons, "Vibration Performance of Apartment Buildings with Wooden Lightweight Frame-Work–Residents Survey and Field Measurements. AkuLite Report 6." 2013.
- [27] J. Xiong and J. Chen, "Random field model for crowd jumping loads," *Structural Safety*, vol. 76, pp. 197–209, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.strusafe.2018.10.001.
- [28] T. M. Nguyen, "Dynamique non linéaire des systèmes mécaniques couplés: réduction de modèles et identification," These de doctorat, Marne-la-vallée, ENPC, 2007. Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://theses.fr/2007ENPC0706>

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

Tableau 1 : Critères de performance des planchers [3].....	8
Tableau 3 : Descriptif des tâches et répartition sur la durée du projet.....	12
Tableau 3 : Descriptif des essais.....	13
Tableau 4 : Liste et déroulé des essais.....	22
Tableau 5 : Premiers modes de résonance du plancher du lycée Camille Jullian, avant et après mise en place du second œuvre.....	32
Tableau 6 - Signaux joués avec la table vibrante.....	39
Tableau 7 - Proposition de seuils d'acceptabilité des vibrations de plancher en accélération.....	47
Tableau 8 - Proposition de seuils d'acceptabilité des vibrations de plancher en accélération.....	47
Tableau 9 : Amplitudes ah du modèle de charge d'El Asri.....	48
Tableau 10 : Paramètres du modèle de charge d'El Asri.....	48
Figure 1 - valeurs des coefficients a et b [2].....	8
Figure 2 : Seuil d'acceptabilité du niveau d'accélération verticale suivant la fréquence [5].....	9
Figure 3 : Exemple d'abaques pour déterminer l' $OS - RMS90$ [7].....	10
Figure 4 : Evaluation du confort pour différents types de plancher en fonction de leur fréquence [12]...	11
Figure 5 : Ceinture connecté Polar H10 pour les données physiologiques.....	14
Figure 6 : Smartphones connectés aux ceintures polar H10 via l'application HR Monitor pour l'enregistrement des données physiologiques.....	14
Figure 7 - Intervalle R-R (ms).....	15
Figure 8 : Essais du 1er et 2 mars 2022, deux personnes assises, une personne couchée.....	16
Figure 9 : Essais du 18 mars et du 5 avril 2022, 4 personnes assises.....	16
Figure 10 - Fiche d'évaluation vis à vis des vibrations.....	17
Figure 11 : Vue isométrique du plancher acier.....	19
Figure 12 : Vue du plancher acier après coulage de la dalle béton.....	19
Figure 13 : Plan du plancher à dominante bois.....	20
Figure 14 : Essais statiques sur le plancher à dominante acier, a) Ajout de masse, b) Courbe masse/flèche.....	20
Figure 15 : Diagramme de stabilité issu de l'analyse modale expérimentale du plancher acier.....	21
Figure 16 : Déformées modales sur plancher à dominante acier, a) 1re déformée, b) 2e déformée.....	22
Figure 17 - Activités rythmiques [18].....	23
Figure 18 - Photos des essais, a) groupe de 8, b) groupe de 16 personnes.....	23
Figure 19 - Placement des accéléromètres sur les chaises des récepteurs et illustration d'un essai.....	24
Figure 20 : Plan des essais pour la marche.....	24
Figure 21 : Plan des essais pour le trot.....	25
Figure 22 : Plan des essais pour les sauts simples.....	25
Figure 23 : Essais au ballon d'impact (ballon japonais).....	26
Figure 24 : a) Photo de l'essai avec machine à laver, b) Allure des accélérations dans les trois axes mesurés avec la machine à laver.....	26
Figure 25 : Plans de l'école Frida Kahlo, a) Accueil ALSH RdC, b) Classe élémentaire 8 1er étage.....	27
Figure 26 : Quatre premiers modes de vibration de la structure à l'école Frida Kalho.....	28
Figure 27 : Réalisation des essais de marche à l'école Frida Kahlo.....	29
Figure 28 : Evolution de l'accélération RMS max mesurée sous les récepteurs en fonction du nombre de générateurs.....	30
Figure 30 - Schéma du plancher et de la position des récepteurs (carré bleu) et des générateurs (croix noire). Le maillage est celui utilisé pour l'analyse modale.....	32
Figure 31 : Réalisation des essais de Jumping Jack au lycée Camille Jullian avec 16 générateurs.....	33
Figure 32 : Grille d'entretien semi-directif.....	35
Figure 33 : Perception des vibrations des planchers en bois dans la vie de tous les jours.....	35
Figure 35 - Corrélation entre les différents paramètres des essais sur table vibrante.....	38
Figure 36 - Moyenne et écart type des ressentis des différents récepteurs (32 réponses).....	39
Figure 37 - Moyenne du niveau de ressenti en fonction du niveau d'accélération efficace (l'abscisse est indiquée en échelle log). Le triangle orange correspond aux sauts à 30bpm.....	40
Figure 38 - Corrélogramme (à gauche) et scatter plot (à droite) des essais.....	41

Figure 39 - Accélération RMS maximale en fonction du niveau de confort ressenti pour les essais en laboratoire.....	42
Figure 40 - Diagramme en boîte et moustaches	42
Figure 41 - Inconfort et indicateurs des niveaux de vibration pour les différentes sollicitations testées..	43
Figure 42 - Valeur normalisée de l'accélération efficace en fonction de la sollicitation	44
Figure 43 - Accélération RMS maximale en fonction du niveau de confort ressenti.....	44
Figure 44 - Niveau d'accélération mesuré suivant la sollicitation et le nombre de générateurs.....	45
Figure 45 - Accélération RMS maximale en fonction du niveau de confort ressenti.....	46
Figure 46 - - Niveau d'accélération par sollicitation pour les récepteurs ayant répondu "pas de perception de la vibration"	46
Figure 47 : DSP de la charge d'une personne mesurées et identifiées	50
Figure 48 – Fonction Spectrale de l'Ondelette du 1 ^{er} harmonique de la charge d'excitation (jumping jack)	51

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions. À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

PROJET GIVILIF – Vibration des planchers légers

L'utilisation de matériaux légers fait apparaître le besoin de prendre en compte les vibrations lors du dimensionnement des planchers afin de garantir, au-delà de la stabilité du bâtiment, le confort des usagers. L'essor de la construction en acier ou en bois ne pourra avoir lieu que si les bâtiments offrent un niveau de confort équivalent ou meilleur que celui des solutions plus habituelles, afin d'avoir une acceptation sociale de ces bâtiments.

Les deux objectifs du projet sont d'améliorer la modélisation des sources de vibrations, notamment les groupes de personnes, et définir des seuils d'acceptabilité. Des essais à en condition contrôlé dans un laboratoire sont d'abord effectués pour identifier les facteurs principaux d'inconfort et définir des protocoles d'essais n'introduisant pas de biais. Puis des essais in situ sont réalisés pour observer les niveaux de vibration et d'inconfort dans des configurations réalistes. Les planchers ont été instrumentés et les participants ont été interrogés et leurs indicateurs physiologiques ont été mesurés. L'ensemble de ces expérimentations a permis de définir, dans des conditions particulières, des niveaux enveloppes d'accélération qui pourraient mener à de l'inconfort modéré ou insupportable. De plus, des modèles de charge des planchers en fonction du nombre d'occupant ont pu être établis et pourront être intégrés dans les prochaines règles de dimensionnement.

Définition de seuils de tolérance des vibrations au plus juste, afin de ne pas surdimensionner les planchers légers sans contrevenir au confort des usagers

Définition de nouveaux modèles de chargement pour mieux dimensionner les planchers, notamment en cas de réhabilitation et changement d'usage

