



HAL
open science

Interaction foule-structure sur les planchers à usage événementiel

Vincent Baumann

► **To cite this version:**

Vincent Baumann. Interaction foule-structure sur les planchers à usage événementiel. Mécanique des structures [physics.class-ph]. Université Gustave Eiffel, 2024. Français. NNT : 2024UEFL2038 . tel-04905640

HAL Id: tel-04905640

<https://theses.hal.science/tel-04905640v1>

Submitted on 22 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE PARIS-EST
ECOLE DOCTORALE SCIENCES INGENIERIE ENVIRONNEMENT
THESE DE DOCTORAT

Thèse présentée pour obtenir le diplôme de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PARIS-EST

Spécialité : Structures et matériaux

Présentée par :

Vincent BAUMANN

Sujet de la Thèse :

Interaction foule-structure sur des planchers à usage événementiel

Université Gustave Eiffel, Département MAST, Laboratoire EMGCU

Soutenue le 16 octobre 2024 devant le jury composé de :

<i>Rapporteurs</i>	PA.	Vítomir RACIC	University of Belgrade
	Pr.	Roger SERRA	INSA Centre Val de Loire
<i>Examineurs</i>	Dr.	Fabienne ANFOSSO-LEDEE	Université Gustave Eiffel
	Pr.	Sandrine DUBOUIHL	Université Bordeaux Montaigne
	Pr.	Michalis FRAGIADAKIS	National Technical University of Athens
<i>Président du jury</i>	Pr.	Fabrice THOUVEREZ	Ecole Centrale de Lyon
<i>Directeur de Thèse</i>	Dr.	Pierre ARGOUL	Ecole des Ponts ParisTech
<i>Encadrant</i>	Dr.	Lucas ADELÀÏDE	Université Gustave Eiffel
<i>Invités</i>	Dr.	Cássio GASPARGAS	PUC-Rio
	Dr.	Son PHAM	CTICM

A la mémoire de mon grand-père, en souvenir de ma merveilleuse grand-mère, à ma mère.

« La vie est un mouvement inégal, irrégulier et multiforme »

« Notre vie n'est que mouvement »

Michel de Montaigne

Essais

Remerciements

Une thèse est en apparence un exercice solitaire qui doit en réalité sa réussite à la participation essentielle de personnes que je tiens tout particulièrement à remercier ici.

Je remercie tout d'abord mes encadrants, Pierre Argoul, mon directeur de thèse, pour m'avoir fait confiance dès le début et Lucas Adélaïde qui a porté le projet d'essai avec un enthousiasme communicatif. Ces essais n'auraient pas été possibles sans l'équipe de techniciens du laboratoire EMGCU et en particulier Jean-Claude Renaud avec la contribution précieuse de Nicolas Aubert et Aghiad Khadour pour la mise en œuvre de la fibre optique. Merci à Renaud-Pierre Martin et Franziska Schmidt pour m'avoir permis d'organiser cette ambitieuse campagne. Enfin je remercie mon comité de suivi, François Toutlemonde, Fabienne Anfosso-Lédée et Jean-Noël Roux.

Ce sujet de thèse prend racine dans un projet passionnant qui m'aura occupé de nombreuses années et je ne saurais assez remercier Thomas Brunet, Yvan Ansermoz et Arthur Lablanchi pour leur intérêt, leur soutien et leur confiance.

Le prototype d'essai a été réalisé grâce à la contribution des entreprises du projet de référence. Je remercie SMB et en particulier Dominique Dhier, Stéphane Morvan, Christophe Malle, Titouan Le Nancq et Fabrice Beasse pour la parfaite réalisation de la charpente. Je remercie l'entreprise PETIT et notamment Zakaria Zerrouki, François-Xavier Gonnot et Alexandre Leblond pour la mise en sécurité et la réalisation du platelage. Un grand merci à TAYLOR en la personne de Philippe Dufflot qui a montré un intérêt constant pour le sujet et dont la fourniture des amortisseurs a été un grand apport pour le projet de recherche. Je remercie BTP consultant et notamment Aurelio Marques pour avoir vérifié la conformité de l'installation pour la réception du public.

Je remercie l'Université de Liège et en particulier Vincent Denoël pour sa participation à la campagne préalable d'identification modale du prototype. Merci aussi à Edouard Verstraelen et Loïc Verhees.

Les essais reposent sur l'étude de l'interaction entre une foule et une structure. Merci donc aux étudiants de l'ENSAPVS de S3/S5 et à Xavier Dousson, Sandra Parvu et Emmanuel Doutriaux pour avoir permis la participation des étudiants aux essais de rodage des capteurs. Merci à Philippe Bach et Marion Merliaud pour m'avoir permis de mobiliser les étudiants de S2 en résistance des matériaux pour les essais de foule. Cela a été une contribution précieuse et une belle aventure pédagogique. Merci aux étudiants pour leur enthousiasme.

Il me faut bien sûr remercier mon bureau d'étude, setec bâtiment, qui m'a toujours soutenu dans mes projets iconoclastes, le dernier en date étant celui-ci. Merci donc à Jérôme Mayet, Adnane Berrazeg et Daniel Abittan pour leur soutien constant depuis plusieurs années. Je remercie également Michel Kahan pour l'intérêt porté au sujet. Enfin je remercie bien sûr mes collègues de département et en particulier Martin Botero, Jérémie Pelletier, Gérald Duvallet, Stéphany Le Rhun et Emma-Jane Touhey qui m'ont aidé dans ce long projet.

Je remercie mes amis et mes proches pour m'avoir supporté toutes ces années, dans tous les sens du terme. Merci en particulier à Clément, Thomas, Pierre et Paul pour me sortir quand il le faut. Merci à Agathe d'avoir été là quand il le fallait. Merci à Marion de m'avoir aéré la tête. Merci Alain de garder un œil sur moi quand je dérive un peu. Un grand merci à Herminie et Antoine pour leurs encouragements. Sylvain et Xavier vous êtes en dernier mais tant que notre mère veille, ça ira.

Je pense avoir parfois conscience de ma chance, j'espère vous rendre à tous ce que je vous dois.

Résumé

La plupart des travaux réalisés sur la dynamique des planchers se concentrent en général sur une approche de confort et il s'agit aussi pour le concepteur de disposer de raisonnements pratiques permettant de limiter les ruptures des structures dans des cas d'usages spécifiques sur le court terme (résonance avec excitation généralisée) et le long terme (fatigue). Bien que la dynamique des planchers soit maîtrisée dans le domaine du comportement linéaire, certaines sollicitations complexes rendent difficile la détermination des charges supportées par l'ouvrage, tant en amplitude qu'en fréquence. C'est le cas des mouvements de foule qui génèrent un chargement dynamique avec une spécificité liée au comportement humain. La modélisation précise de l'action de la foule revêt un intérêt particulier pour les bâtiments aux planchers légers et élancés. Avec les retours d'expérience depuis les années 1990 dans les tribunes de stade ou les salles de concert, des recherches ont été amorcées autour de l'interaction dynamique entre la foule et la structure.

Après une introduction générale au contexte de l'étude, l'état de l'art de la modélisation de l'action verticale de la foule selon le type d'activité est rappelé. Pour un individu en mouvement, l'excitation induite est usuellement considérée périodique et donc développable en séries de Fourier. On détermine ainsi l'action verticale globale de la foule qui doit tenir compte de paramètres complémentaires comme la répartition spatiale et la variabilité de la nature de l'action suivant les personnes. En plus de l'aptitude des individus à se synchroniser individuellement avec la source musicale, il s'agit de caractériser la coordination entre les individus et leur capacité à maintenir l'excitation dans le temps. Une fois l'action définie, il faut caractériser l'interaction entre la foule et le plancher. En effet, la réponse de la structure peut modifier en retour l'action de la foule. En fonction des niveaux de vibrations ressentis, l'individu peut modifier son action en amplitude, en fréquence et en phase. Dans l'autre sens, on constate une modification des paramètres modaux du système structurel global dans le cas de la présence d'une foule active ou statique. Les principales méthodes de modélisation dans la littérature sont ainsi rappelées.

Dans une troisième partie, un cas d'étude permet d'illustrer les enjeux scientifiques et normatifs associés au dimensionnement des planchers soumis aux usages événementiels. Les principes de vérification pratique en confort, en résistance ultime et en fatigue sont évoqués de sorte à identifier les paramètres clefs et les ordres de grandeur. Pour finir, un moyen de correction dynamique par amortisseur visqueux est exposé.

La quatrième partie est dédiée à la description d'un prototype expérimental inspiré du cas d'étude et assimilable à une passerelle mixte acier-béton. Une première campagne d'essais vise à identifier les caractéristiques modales de l'ouvrage et notamment l'évolution de l'amortissement en fonction de l'amplitude de vibration. L'ouvrage est étudié avec et sans son système d'amortisseurs amovibles. Dans une cinquième partie, les caractéristiques modales de l'ouvrage à vide sont identifiées et on présente les résultats d'essais d'amortissement avec des individus statiques et mobiles obtenus par excitation mécanique contrôlée. Enfin, on présente les essais avec des groupes de personnes actifs de 12 à 108 individus. Les résultats d'essais sont décrits en mettant en regard l'évolution de la sollicitation et la réponse de l'ouvrage.

Dans une sixième partie, on spécifie les différents paramètres importants pouvant influencer sur le comportement de la foule. L'élément central de cette thèse expérimentale est la détermination de la coordination des participants comparée à la littérature. En effet, cette étude permet de prolonger des courbes expérimentales de coordination jusqu'à 100 personnes. Dans un second temps, on évalue l'amortissement apporté par la foule suivant le type d'activité. L'objectif principal de cette étude est de proposer une méthodologie de prise en compte de l'interaction à la fois représentative des efforts réellement développés et simple dans sa modélisation.

Mots clés : Dynamique des planchers, concert, mouvement de foule, amortissement, interaction foule-structure, essais en vraie grandeur

Abstract

Most of the work on floors structural dynamics generally focuses on a comfort approach and it is also useful for the designer to get practical guidelines allowing to prevent structural failure in cases of specific uses on the short-term (resonance with generalized excitation) and long-term (fatigue). Although floors structural dynamics is well-known in the field of linear behaviour, some complex loadings make it difficult to determine the loads on the structure, both in amplitude and frequency. This is the case with crowd motion, which generates a dynamic load with a specificity linked to human behaviour. Accurate modelling of crowd dynamic loading is of particular interest for buildings with light and slender floors. With the experience gained since the 1990s in grandstands or concert halls, research has begun to study the dynamic interaction between the crowd and the structure.

After a general introduction to the context of the study, we recall the theoretical basis for modelling vertical action according to the type of activity. For an individual in motion, induced excitation is usually considered to be periodic, and is therefore decomposed in Fourier series. This determines the overall vertical action of the crowd, which must take into account complementary parameters such as spatial distribution and the variability of action between individuals. In addition to the ability of individuals to synchronize individually with the music source, the aim is to characterize the level of coordination between individuals and their ability to maintain the action over time. Once the action has been defined, it is necessary to describe the interaction between the crowd and the floor. The response of the structure can indeed modify the action of the crowd. Depending on the vibration levels felt, the individual can modify his or her action in amplitude, frequency, and phase. On the other hand, modal parameters of the overall structural system are also modified in the case of an active or static crowd. The various modelling methods for considering the interaction depending on the activity are reviewed.

In a third part, a case study highlights the scientific and normative issues associated with event uses on floors. Practical design principles for comfort, resistance and fatigue are exposed to identify the main influential parameters and orders of magnitude. As a conclusion, the dimensioning of a viscous damper system is proposed.

The fourth part is dedicated to the description of an experimental prototype inspired by the reference project comparable to a steel-concrete composite bridge. A first test campaign aims to identify the modal characteristics of the structure and the evolution of damping as a function of vibration amplitude. The structure is also studied with a system of removable viscous dampers. In a fifth section, the modal characteristics of the empty structure are identified and the results of damping tests with static and mobile individuals obtained by controlled mechanical excitation are presented. Finally, we present progressive tests with groups of active people ranging from 12 to 108. The results of the tests are described by comparing the evolution of the load and the response of the structure.

In a sixth section, we specify the various important parameters that can influence the crowd behaviour. The main contribution of this experimental thesis is the evaluation of the coordination compared to the literature. This study allows to extend experimental charts up to 100 people at the same time. Secondly, we evaluate damping brought by the crowd according to the type of activity. The main purpose of this study is to propose a methodology to consider the interaction both representative of the really developed efforts and simple in its modelling.

Keywords: Floors structural dynamics, concert, crowd motion, damping, crowd-structure interaction, full scale testing

Table des matières

Résumé.....	7
1 Introduction.....	28
1.1 Les lieux	28
1.1.1 Espace classique.....	28
1.1.2 Espace réinvesti	29
1.1.3 Espace événementiel	30
1.1.4 Espace polyvalent	31
1.2 La musique	32
1.3 La foule	32
1.4 La danse	33
1.5 Le temps	33
2 Etat de l'art.....	36
2.1 Caractérisation de l'action d'une foule sans interaction avec la structure support	36
2.1.1 Action verticale d'un individu	36
2.1.2 Paramètres d'influence de l'action verticale de la foule	42
2.1.3 Modélisation de l'action de la foule dans un concert.....	43
2.2 Interaction foule-structure.....	49
2.2.1 Approches déterministes et stochastiques.....	49
2.2.2 Participation de la foule à la structure en vibration	50
2.2.3 Impact de la réponse de la structure sur l'action de la foule	61
2.3 Synthèse des référentiels et corpus normatifs internationaux.....	62
3 Enjeux généraux de la démarche de recherche	66
3.1 Enjeux scientifiques	66
3.1.1 Amortissement intrinsèque de l'ouvrage en fonction de l'amplitude.....	66
3.1.2 Sensibilité de la sollicitation de la foule en configuration concert	67
3.1.3 Evaluation de la contribution des personnes à l'amortissement	69
3.2 Analyse critique de la démarche pratique d'ingénierie de conception	70
3.2.1 Présentation du cas d'étude	70
3.2.2 Caractéristiques du plancher type	72
3.2.3 Vérifications de confort et de résistance aux états limites.....	78
3.2.4 Comportement à la fatigue.....	88
3.2.5 Mesures conservatoires de correction du comportement dynamique	101
3.3 Synthèse des enjeux scientifiques et techniques.....	108

4	<i>Prototype et protocole expérimental</i>	112
4.1	Description du prototype	112
4.1.1	Référence.....	112
4.1.2	Description générale.....	113
4.1.3	Ordres de grandeur des capacités structurelles.....	116
4.1.4	Phasage de construction.....	124
4.2	Moyens humains et instrumentation	127
4.2.1	Inventaire général des moyens à mettre en œuvre.....	127
4.2.2	Excitation dynamique.....	128
4.2.3	Métrologie.....	135
4.3	Déroulement général des essais	145
4.3.1	Phase 1 : Caractérisation modale avec excitateur et sans amortisseurs.....	145
4.3.2	Phase 2 : Essais de groupes sans amortisseurs.....	146
4.3.3	Phase 3 : Caractérisation modale avec excitateur et amortisseurs.....	147
4.3.4	Phase 4 : Essais de foule avec et sans amortisseurs.....	147
5	<i>Analyse des résultats d'essai</i>	150
5.1	Excitation mécanique et identification des caractéristiques dynamiques	150
5.1.1	Caractéristiques dynamiques à vide.....	150
5.1.2	Caractéristiques dynamiques à vide avec amortisseurs visqueux additionnels.....	162
5.1.3	Caractéristiques dynamiques en présence de public actif ou passif.....	168
5.2	Excitation par des personnes coordonnées et d'actions variables	175
5.2.1	Essais de groupes.....	175
5.2.2	Essais de foule.....	182
6	<i>Caractérisation de l'interaction foule-structure</i>	198
6.1	Sensibilité de la sollicitation de la foule en configuration concert	198
6.1.1	Influence du contexte.....	199
6.1.2	Influence de la réponse vibratoire du support sur l'action.....	207
6.1.3	Coordination au saut en fonction du nombre de participants.....	217
6.2	Evaluation de la contribution des personnes à l'amortissement	224
6.2.1	Modélisation de l'amortissement apporté par un groupe statique.....	224
6.2.2	Cas de personnes en situation de marche.....	231
6.2.3	Estimation de l'amortissement apporté par une foule dansant sur place.....	232
6.2.4	Cas du balancement vertical en excitation contrôlée.....	236
6.2.5	Cas du saut en excitation contrôlée.....	238
6.2.6	Amortissement au moment de l'arrêt d'une action de saut.....	240
6.2.7	Synthèse des amortissements selon le type d'activité.....	244

7	<i>Synthèse des résultats de la recherche</i>	248
7.1	Amortissement intrinsèque d'un ouvrage en fonction de l'amplitude	248
7.1.1	Amortissement propre à l'ouvrage.....	248
7.1.2	Amortissement de l'ouvrage équipé d'amortisseurs.....	248
7.2	Sensibilité de la sollicitation de la foule en configuration concert	249
7.2.1	Influence de l'ambiance musicale.....	249
7.2.2	Influence de la réponse vibratoire du support sur l'action.....	251
7.2.3	Coordination au saut en fonction du nombre de participants	251
7.3	Evaluation de la contribution des personnes à l'amortissement	253
	<i>Conclusion</i>	255
	<i>Perspectives</i>	257
	<i>Bibliographie</i>	259
	<i>Annexes</i>	265

Liste des figures

Figure 1 : DJ set dans une configuration classique (© Jake Davis).....	28
Figure 2 : Discothèque dans une centrale électrique désaffectée (© Stefanie Loos).....	29
Figure 3 : Discothèque située dans une ancienne imprimerie (© Printworks).....	29
Figure 4 : Kanye West à la Fondation Louis Vuitton en 2015 (© studio.institute)	30
Figure 5 : Soirée Super Cercle le 9/06/2022 (© Bourse de Commerce / Pinault Collection)	30
Figure 6 : Hall de l'ENPC (© D. Delaporte) et amphithéâtre Cauchy (© F. Apesteguy).....	31
Figure 7 : Soirée annuelle dans le Hall de l'ENPC au-dessus de l'amphithéâtre (© SBCS)	31
Figure 8 : Participants à un pogo pendant un concert de rap (© Street Press).....	33
Figure 9 : Modélisation périodique ($H = 3$) du signal d'excitation de la marche à 2 Hz.....	38
Figure 10 : Modélisation périodique ($H = 6$) du signal d'excitation au saut à une fréquence de 2 Hz .	38
Figure 11 : Modélisation périodique de différents types de sauts à une fréquence de 2 Hz	39
Figure 12 : Hauteur de saut théorique en fonction de la fréquence pour différents ratios de contact	41
Figure 13 : Hauteurs de saut théoriques en fonction des fréquences d'excitation courantes.....	41
Figure 14 : Action moyenne de groupe ramenée à un individu pour une fréquence de 2 Hz.....	45
Figure 15 : Distribution en fréquence d'échantillons musicaux (30) des années 60	46
Figure 16 : Distribution en fréquence d'échantillons musicaux (30) des années 70	47
Figure 17 : Distribution en fréquence d'échantillons musicaux (30) des années 80	47
Figure 18 : Distribution en fréquence d'échantillons musicaux (30) de type Dance (années 90)	47
Figure 19 : Distribution en fréquence d'échantillons musicaux (30) de type Indie (années 90)	47
Figure 20 : Distribution en fréquence d'échantillons musicaux (30) de type Pop (années 90)	47
Figure 21 : Distribution en fréquence d'échantillons musicaux (30) de type Rock (années 90).....	47
Figure 22 : Cumul de distribution en fréquence des échantillons musicaux par genre.....	48
Figure 23 : Distribution des fréquences des musiques et des fréquences d'excitation de la foule.....	48
Figure 24 : Configuration d'interaction en saut généralisé.....	50
Figure 25 : Configuration d'interaction en balancement vertical (ou danse) généralisé.....	50
Figure 26 : Configuration d'interaction avec actions individuelles variables.....	50
Figure 27 : Système à un degré de liberté avec excitation au saut par un individu.....	51
Figure 28 : Modélisation dynamique simplifiée d'un individu passif (à gauche) et actif (à droite).....	56
Figure 29 : Coefficients d'efficacité pour les scénarios 2,3 et 4 des règles pour les tribunes [27]	57
Figure 30 : Principe de modélisation à plusieurs degrés de liberté du système foule-structure.....	59
Figure 31 : Principe de modélisation à deux degrés de liberté du système foule-structure	59
Figure 32 : Fondation Cartier du Palais Royal vue depuis la place du Palais Royal (© AJN)	70
Figure 33 : Ecorché représentant une configuration libre des plateformes (© AJN)	70
Figure 34 : Exemple de configuration exposition avec des plateformes alignées au RDC (© AJN)	71
Figure 35 : Configuration du mode concert avec plateformes alignées au RDC (© AJN)	71
Figure 36 : Plan de synthèse des plateformes avec mécanismes intégrés en bleu (© setec)	72
Figure 37 : Axonométrie de la charpente de l'ensemble des plateformes (© setec).....	72
Figure 38 : Axonométrie de la charpente acier de la plateforme 4 et détail de rive (© setec).....	72
Figure 39 : Vue de la charpente métallique avec le système de levage embarqué.....	73
Figure 40 : Schéma statique général des plateformes	74
Figure 41 : Modèle type 1 mixte avec dalle 2D modélisée en plaques et poutres filaires.....	74

Figure 42 : Modèle type 2 filaire avec section mixte et effet Vierendeel transversal	74
Figure 43 : Mode 1 : Flexion à un ventre (4,06 Hz / Modèle Type 1 - 3,70 Hz / Modèle type 2)	75
Figure 44 : Mode 2 : Flexion asymétrique des rives longitudinales (5,39 Hz / Modèle type 1)	75
Figure 45 : Mode 3 : Flexion asymétrique des rives transversales (7,44 Hz / Modèle type 1)	75
Figure 46 : Allure du mode 1 (gauche) et mode 2 (droite) de la plateforme 4	79
Figure 47 : Allure du mode 3 (gauche) et mode 4 (droite) de la plateforme 4	79
Figure 48 : Configuration type de service en concert dit « normal » (© Tanguendo)	80
Figure 49 : Configuration type de service en concert dit « extrême » (© V.Baumann)	81
Figure 50 : Charge surfacique d'impact au saut normal pour un groupe synchronisé	83
Figure 51 : Action surfacique de la foule sur le plancher	84
Figure 52 : Charge surfacique équivalente au rappel élastique du plancher en résonance	84
Figure 53 : Effondrement de la tribune du stade de Nimègue par résonance au saut en 2021 [46] ...	86
Figure 54 : Effondrement de la piste de danse d'un mariage, Jérusalem, 2001 [44]	87
Figure 55 : Sollicitation de saut normalisée moyenne pour un individu de poids G_{moy} à 2 Hz	90
Figure 56 : Sollicitation de danse normalisée moyenne pour un individu dansant à 2 Hz	90
Figure 57 : Contraintes normales dans le modèle type 1 sous charge uniforme de 10 kN/m ²	91
Figure 58 : Détail 1 : Soudure du profilé reconstitué de rive longitudinale (bleu turquoise)	92
Figure 59 : Contraintes normales dans le profil de rive sous charge uniforme de 10 kN/m ²	92
Figure 60 : Catégorie de détail selon l'EC3 partie 1-9 retenue pour la vérification	92
Figure 61 : Détail 2 : Soudure de la pièce d'angle avec la poutre de rive	93
Figure 62 : Contraintes normales au droit de la soudure de la pièce d'angle avec la poutre de rive...	93
Figure 63 : Catégorie de détail selon l'EC3 partie 1-9 retenue pour la vérification	93
Figure 64 : Distribution de probabilité des fréquences d'excitation (gris clair)	95
Figure 65 : Sollicitation de la foule pour des sauts à 2 Hz	95
Figure 66 : Charge surfacique équivalente au rappel élastique du plancher pour le saut à 2 Hz	95
Figure 67 : Sollicitation de la foule pour la danse à 2 Hz	96
Figure 68 : Charge surfacique équivalente au rappel élastique du plancher pour la danse à 2 Hz	96
Figure 69 : Etendues de contraintes primaires en fonction de la fréquence d'excitation par la foule.	96
Figure 70 : Courbe EC3 de résistance à la fatigue pour des étendues de contraintes normales	97
Figure 71 : Amortisseurs visqueux amovibles positionnés sous la plateforme	102
Figure 72 : Implantation conservatoire d'amortisseurs visqueux	103
Figure 73 : Principe de détail d'intégration et de fixation d'un amortisseur amovible	103
Figure 74 : Implantation pratique probable des amortisseurs si nécessaires	104
Figure 75 : Variation de la longueur de l'amortisseur suivant le déplacement vertical	105
Figure 76 : Représentativité du prototype par rapport à la plateforme 4	112
Figure 77 : Vue en élévation et de dessus du prototype (3D de conception)	113
Figure 78 : Vue de la charpente du prototype	113
Figure 79 : Degré de liberté horizontaux par appui	114
Figure 80 : Conditions d'appui au niveau de la culée Ouest	114
Figure 81 : Conditions d'appui au niveau de la culée Est	114
Figure 82 : Dalle d'essai du laboratoire EMGCU de l'université Gustave Eiffel	115
Figure 83 : Implantation du prototype sur la dalle d'essai	115
Figure 84 : Chargement d'impact de la foule de 108 étudiants sautant à 2,5 Hz	117
Figure 85 : Chargement statique équivalent à la réponse de la structure amortie à 1%	118
Figure 86 : Fabrication de la charpente acier à Ploufragan le 5/10/2022	124
Figure 87 : Livraison de la charpente au laboratoire le 14/11/2022	124
Figure 88 : Montage de la charpente et pose du bac acier entre le 15/11 et le 17/11/2022	124
Figure 89 : Mise en place des échafaudages du 21/11 au 25/11/2022	125

Figure 90 : Ferrailage le 29/11/2022 et étaieiment de la dalle et des poutres.....	125
Figure 91 : Coulage de la dalle le 30/11/2022.....	125
Figure 92 : Pose des dalletes le 5/01/2023 et marquage au sol.....	126
Figure 93 : Mise en place des amortisseurs livrés par TAYLOR le 6/03/2023.....	126
Figure 94 : Essais avec excitateur mécanique de l'ULiège le 10/03/2023.....	128
Figure 95 : Etudiants volontaires de l'ENSAPVS en S2.....	129
Figure 96 : Distribution [%] des tempos [Hz] des 380 titres musicaux dansants des S3 et S5.....	130
Figure 97 : Distribution des années des titres musicaux dansants.....	130
Figure 98 : Distribution des tempos des titres de la playlist de synthèse.....	132
Figure 99 : Distribution des années des titres de la playlist de synthèse.....	132
Figure 100 : Application Métronome Beats utilisée comme métronome.....	133
Figure 101 : Enceintes JBL Partybox 310 de 240 W.....	133
Figure 102 : Marquage au sol des dalletes.....	134
Figure 103 : Repérage de positionnement d'Est en Ouest.....	134
Figure 104 : Plan général d'implantation des capteurs.....	135
Figure 105 : Implantation générale des capteurs fixés sur la charpente.....	135
Figure 106 : Implantation des accéléromètres LORD.....	136
Figure 107 : Accéléromètre LORD au voisinage d'un capteur de déplacement LVDT sur pied.....	136
Figure 108 : Implantation des capteurs de déplacement LVDT.....	137
Figure 109 : Vélocimètre.....	137
Figure 110 : Implantation des vélocimètres.....	137
Figure 111 : Positionnement des sondes de température.....	138
Figure 112 : Centrale d'acquisition et poste de mesure de l'instrumentation sur prototype.....	138
Figure 113 : Fixation des fibres actives sur le ferrailage.....	139
Figure 114 : Implantation des fibres actives et de l'acquisition.....	139
Figure 115 : Extrémité des fibres en attente après coulage et centrale d'acquisition de la fibre.....	139
Figure 116 : Plaques de force K-Force de Kinvent et cadre de protection pour le saut.....	140
Figure 117 : Plaques de force K-Deltas de Kinvent.....	141
Figure 118 : Centrale inertielle fixée par adhésif et centrale d'acquisition COMETA.....	141
Figure 119 : Emplacement des capteurs de synchronisation pendant le test H2 du 13/04/2023.....	142
Figure 120 : Positionnement des caméras GOPRO (angle de vue large d'environ 120°).....	143
Figure 121 : Vues depuis les caméras fixes.....	143
Figure 122 : Propriétés modales du prototype sans dalletes et à vide de public (Données ULiège).....	150
Figure 123 : Propriétés modales du prototype avec dalletes et à vide de public (Données ULiège).....	151
Figure 124 : Mode 1 du prototype aux éléments finis 3D.....	152
Figure 125 : Mode 2 du prototype aux éléments finis 3D.....	152
Figure 126 : Mode 3 du prototype aux éléments finis 3D.....	152
Figure 127 : Mode 4 du prototype aux éléments finis 3D.....	153
Figure 128 : Déformation de la fibre nord durant l'essai S1 du 23/01 (Données COSYS/IMSE).....	153
Figure 129 : Déformation moyenne et différentielle entre fibres optiques (Données COSYS/IMSE).....	154
Figure 130 : Évolution de la fréquence propre en fonction du déplacement (Tests 1 et 2).....	158
Figure 131 : Déplacement du capteur LVDT [mm] en fonction du temps (Test 2 avec dalletes).....	159
Figure 132 : Evolution de l'amortissement en fonction de l'accélération (Tests 1 et 2).....	160
Figure 133 : Evolution de l'amortissement en fonction du déplacement (Tests 1 et 2).....	160
Figure 134 : Propriétés modales du prototype sans dalletes, à vide et avec amortisseurs (ULiège).....	162
Figure 135 : Propriétés modales du prototype avec dalletes, à vide et avec amortisseurs (ULiège).....	163
Figure 136 : Evolution de la fréquence sans dalletes (Tests 1 et 6) en fonction du déplacement....	164
Figure 137 : Evolution de la fréquence avec dalletes (Tests 2 et 7) en fonction du déplacement....	164

Figure 138 : Loi de comportement de l'amortisseur sur la base des tests d'usine TAYLOR	165
Figure 139 : Variation de l'amortissement en fonction du déplacement (Tests 6 et 7)	166
Figure 140 : Variation de l'amortissement en fonction de la vitesse (Tests 6 et 7)	166
Figure 141 : Variation de l'amortissement en fonction de l'accélération (Tests 6 et 7)	167
Figure 142 : Comparaison de la valeur estimée de l'amortissement avec la valeur d'usine	167
Figure 143 : Test avec excitateur et 40 individus statiques (Test 3)	168
Figure 144 : Positionnement des participants et de l'excitateur sur les dalles (Test 3)	168
Figure 145 : FRF, amortissement et fréquence en fonction de l'accélération du plancher (ULiège) .	170
Figure 146 : Test avec excitateur avec 40 individus en situation de marche (Test 4)	171
Figure 147 : Positionnement des participants et de l'excitateur sur les dalles (Test 4)	171
Figure 148 : FRF, amortissement et fréquence en fonction de l'accélération du plancher (ULiège) .	171
Figure 149 : Vue axonométrique du test de marche (Test 4)	172
Figure 150 : Test avec excitateur avec 18 individus statiques (Test 5)	173
Figure 151 : Positionnement des participants et de l'excitateur sur les dalles (Test 5)	173
Figure 152 : FRF, amortissement et fréquence en fonction de l'accélération du plancher (ULiège) .	174
Figure 153 : Configuration des essais de groupe : personnes actives en vert et passives en orange	175
Figure 154 : Test S1 de danse libre des participants S5	178
Figure 155 : Test S1 de danse libre des participants S3	180
Figure 156 : Participants S2 en amphithéâtre avant les essais du 20 avril	182
Figure 157 : Tests de coordination G1 à G5 avec les participants S2	186
Figure 158 : Préparation du lancement de la série de tests F avec les participants S2	188
Figure 159 : Test F2B avec les participants S2	188
Figure 160 : Norme de l'accélération brute du capteur COMETA du leader 5 pour le test F2B	189
Figure 161 : Norme de l'accélération filtrée du capteur COMETA du leader 5 pour le test F2B	189
Figure 162 : Impact du leader 5 au test F2B via plaque de force (rouge) et accéléromètre (vert)	190
Figure 163 : Exemple d'accélération au centre issus des capteurs COMETA, Lord et LVDT	190
Figure 164 : Accélération maximales pics des séries E, F et A avec les S2 en fonction du tempo	191
Figure 165 : $k_{p,moy,10}(t)$ en gris et $k_{p,eff,10}(t)$ en noir pour le test F2B (Freed from desire)	192
Figure 166 : Facteur d'impact des séries de tests E, F et A en fonction du tempo [Hz]	193
Figure 167 : Accélération maximales pics [m/s^2] de la série de tests G en fonction du tempo [Hz] ..	194
Figure 168 : Facteur d'impact $k_{p,max,moy,10}$ de la série de tests G en fonction du tempo [Hz]	194
Figure 169 : Accélération maximales pics [m/s^2] de la série de tests H en fonction du tempo [Hz] ..	195
Figure 170 : Facteur d'impact $k_{p,max,moy,10}$ de la série de tests H en fonction du tempo [Hz]	195
Figure 171 : Distribution fréquentielle [Hz] des années 60 (All out 60s / 100 titres)	200
Figure 172 : Distribution fréquentielle [Hz] des années 70 (All out 70s / 100 titres)	200
Figure 173 : Distribution fréquentielle [Hz] des années 80 (All out 80s / 100 titres)	201
Figure 174 : Distribution fréquentielle [Hz] des années 90 (All out 90s / 100 titres)	201
Figure 175 : Distribution fréquentielle [Hz] des années 2000 (All out 2000s / 100 titres)	201
Figure 176 : Distribution fréquentielle [Hz] des années 2010 (All out 2010s / 100 titres)	201
Figure 177 : Comparaison des distributions fréquentielles [Hz] et moyenne sur 60 ans	202
Figure 178 : Distribution fréquentielle [Hz - BPM] moyenne sur 60 ans corrigée	203
Figure 179 : Comparaison de la distribution référence avec la distribution des étudiants S3-S5	203
Figure 180 : Spectrogramme du signal sonore F2B en [Hz] et accélérogramme [m/s^2] à mi-portée .	204
Figure 181 : Spectrogramme sonore, $k_{p,moy,10}(t)$ et accélération à mi-portée [g] du test F2B	205
Figure 182 : Test 3bis de ressenti à 40 personnes statiques	207
Figure 183 : Questionnaire type de ressenti rempli à chaque test par un individu	207
Figure 184 : Boîtes à moustache de l'intensité ressentie en fonction de $a_{pic,moy}$ [m/s^2]	208
Figure 185 : Distribution de l'indice de confort en fonction de $a_{pic,moy}$ [m/s^2]	209

Figure 186 : Test 5 de ressenti à 18 personnes statiques	209
Figure 187 : Distribution de l'intensité ressentie en fonction de $a_{pic,moy}$ [m/s^2]	210
Figure 188 : Distribution de l'indice de confort en fonction de $a_{pic,moy}$ [m/s^2].....	210
Figure 189 : Comparaison de l'intensité ressentie en fonction de $a_{pic,moy}$ [m/s^2].....	211
Figure 190 : Comparaison de l'indice de confort en fonction de $a_{pic,moy}$ [m/s^2]	211
Figure 191 : Pendant et après le saut à 16 personnes sans amortisseurs (CAR SA) $a_{pic} = 3,4m/s^2$	214
Figure 192 : Test G5 2,8 Hz : Accélération réelle (rouge) et périodisation du motif maximum (bleu).....	217
Figure 193 : Test G5 2,8 Hz : Signal d'accélération maximale périodisée	217
Figure 194 : Test G5 2,8 Hz : Coefficients de Fourier et phases du signal périodisé (Matlab).....	218
Figure 195 : Test G5 2,8 Hz : Comparaison du signal reconstitué (rouge) avec l'original (bleu).....	218
Figure 196 : Test G5 2,6 Hz : Facteurs d'impact $k_{p,moy,10}$, $k_{p,moy,global}$ et accélération [m/s^2]	219
Figure 197 : Coefficients de Fourier de groupe $C_h(N)\alpha_h$	220
Figure 198 : Variante de modélisation à deux degrés de liberté du système foule-structure.....	224
Figure 199 : Amplification dynamique selon présence de public et de l'amortissement structurel ..	226
Figure 200 : Amortissement global équivalent selon la fréquence individuelle des personnes.....	227
Figure 201 : Amortissement équivalent selon la fréquence individuelle pour $\xi_h = 22\%$	229
Figure 202 : Amortissement équivalent selon la fréquence individuelle pour $\xi_h = 60\%$	229
Figure 203 : Abaque des paramètres individuels pour les essais avec 18 personnes statiques	230
Figure 204 : Abaque des paramètres individuels pour les essais avec 40 personnes statiques	230
Figure 205 : Abaque des paramètres individuels pour les essais avec 40 personnes en marche.....	231
Figure 206 : Facteurs d'amplification dynamique selon couplage.....	233
Figure 207 : Evolution de l'amortissement équivalent selon fréquence de la foule	233
Figure 208 : Facteurs d'amplification dynamique selon couplage.....	234
Figure 209 : Evolution de l'amortissement équivalent selon fréquence de la foule	235
Figure 210 : Configuration des participants S3 du test A5	236
Figure 211 : Positionnement des participants sur les dallettes	236
Figure 212 : Estimation de l'excitation du test A5 à 2,5 Hz et comparaison.....	237
Figure 213 : Estimation de l'excitation du test A5 à 2,7 Hz et comparaison.....	237
Figure 214 : Estimation de l'excitation du test E5 à 2,5 Hz et comparaison	238
Figure 215 : Estimation de l'excitation du test E5 à 2,6 Hz et comparaison	238
Figure 216 : Estimation de l'excitation du test E5 à 2,7 Hz et comparaison	239
Figure 217 : Estimation de l'excitation du test E5 à 2,8 Hz et comparaison	239
Figure 218 : Décroissance de l'accélération du prototype à l'arrêt du saut du test E5 à 2,5 Hz	240
Figure 219 : Evolution de l'amortissement en fonction de l'accélération du prototype	241
Figure 220 : Estimation de la fréquence propre équivalente des individus à $1 m/s^2$	241
Figure 221 : Estimation de la fréquence propre équivalente des individus à $0,35 m/s^2$	241
Figure 222 : Décroissance de l'accélération du prototype à l'arrêt du saut du test H5 à 2,6Hz.....	242
Figure 223 : Evolution de l'amortissement en fonction de l'accélération du prototype	243
Figure 224 : Estimation de la fréquence propre équivalente des individus à $0,91 m/s^2$	243
Figure 225 : Estimation de la fréquence propre équivalente des individus à $0,11 m/s^2$	243
Figure 226 : Comparaison de l'évolution de l'amortissement en fonction du déplacement	248
Figure 227 : Evolution de la fréquence avec dallettes en fonction du déplacement.....	248
Figure 228 : Variation de l'amortissement avec et sans amortisseurs en fonction du déplacement.	249
Figure 229 : Distribution fréquentielle [Hz - BPM] moyenne sur 60 ans corrigée	250
Figure 230 : Spectrogramme du signal sonore F2B en [Hz] et accélérogramme [m/s^2] à mi-portée .	250
Figure 231 : Pendant et après le saut à 16 personnes sans amortisseurs (CAR SA) $a_{pic} = 3,4 m/s^2$	251
Figure 232 : Coefficients de Fourier de groupe $C_h(N)\alpha_h$	252
Figure 233 : Abaque des paramètres individuels pour les essais avec 40 personnes statiques	253

Figure 234 : Fin des essais de foule	257
Figure 235 : Effondrement de la piste de danse d'un mariage, Jérusalem, 2001, [44]	265
Figure 236 : Effondrement du plancher devant la scène, Canada, 2008, [47].....	265
Figure 237 : Affaissement devant la scène d'un plancher, Nouvelle-Zélande, 2012, [48].....	266
Figure 238 : Effondrement de la fosse lors d'un concert dans un bar, Saint-Louis, 2015, [49]	266
Figure 239 : Effondrement de plancher de discothèque, Ténérife, 2017, [45].....	266
Figure 240 : Effondrement d'une jetée lors d'un concert, Espagne, 2018, [50].....	267
Figure 241 : Effondrement d'un plancher par suite d'une soirée étudiante, Etats-Unis, 2018, [43]..	267
Figure 242 : Effondrement d'un plancher bois dans un bar dansant, Etats-Unis, 2018, [51]	267
Figure 243 : Effondrement du plancher d'un bar, Bogota, 2019, [52]	268
Figure 244 : Effondrement de la tribune du stade de Nimègue, 2021, [46]	268
Figure 245 : Affaissement d'un plancher dans une salle de concert, Sydney, 2022, [53].....	268
Figure 246 : Mise en résonance inquiétante d'un plancher, Detroit, 2022, [54].....	269
Figure 247 : Effondrement d'un faux-plancher pendant un concert, Paris, 2023, [55]	269
Figure 248 : Mini tremblement de terre au Circus Maximus, Rome, 2023, [56]	269
Figure 249 : Localisation des fissures sur la plan de démolition (en bleu).....	278
Figure 250 : Fissures ouest entres les dalles 9 et 10	278
Figure 251 : Fissures centrales entre dalles 6 et 7 et fissures est entre dalles 3 et 4.....	279
Figure 252 : Fissure principale due à la flexion et fissures de retrait.....	279

Liste des tableaux

Tableau 1 : Plages de fréquences d'excitation usuelles de la littérature.....	37
Tableau 2 : Coefficient de Fourier et déphasages usuels de la littérature.....	37
Tableau 3 : Coefficient de Fourier et déphasages usuels de la littérature selon le type de saut	39
Tableau 4 : Densité de la foule selon les normes et guides internationaux	42
Tableau 5 : Coefficient de coordination $C_h(N)$ pour le saut selon le BRE Digest 426 de 1997 [15].....	43
Tableau 6 : Coefficient de coordination $C_h(N > 50)$ pour le saut selon l'ISO 10137 [7]	44
Tableau 7 : Coefficient de coordination $C_h(N < 65)$ pour le saut selon le BRE Digest 426 2004 [8].....	44
Tableau 8 : Coefficients de Fourier moyens pour une foule de 8192 personnes ($\alpha_{moy} = 0,4$)	44
Tableau 9 : Coefficient de coordination équivalent pour le saut avec une foule importante	45
Tableau 10 : Coefficient de Fourier et phases décrivant l'action d'une foule d'étudiants au saut	45
Tableau 11 : Coefficient de Fourier pour les actions de groupes et de foule hors saut coordonné.....	45
Tableau 12 : Paramètres dynamiques de modélisation d'un individu selon [27].....	56
Tableau 13 : Coefficients de Fourier de l'excitation au balancement selon [27].....	58
Tableau 14 : Paramètres dynamiques individuels identifiés dans la littérature.....	58
Tableau 15 : Seuils pic de détection et de confort selon les référentiels pour des concerts	61
Tableau 16 : Inventaire de normes et guides utiles traitant de l'action de la foule	62
Tableau 17 : Définition des seuils de confort selon l'accélération du support.....	66
Tableau 18 : Définition de la notion de densité de la foule dans le cadre de l'étude.....	69
Tableau 19 : Décomposition du poids propre de la plateforme 4	73
Tableau 20 : Plages d'amortissement structurel usuelles à faible amplitude.....	76
Tableau 21 : Plages d'amortissement structurel à forte amplitude.....	76
Tableau 22 : Ordre de grandeur des amortissements par Reynolds et Pavic [42] lors d'un match.....	77
Tableau 23 : Amortissement usuel des salles de danse selon Bachmann [6]	77
Tableau 24 : Synthèse des amortissements retenus pour le projet de référence	77
Tableau 25 : Paramètres de calcul retenus pour le concert normal	80
Tableau 26 : Estimation de l'accélération maximale en mode concert normal.....	80
Tableau 27 : Paramètres de calcul retenus pour le concert extrême	81
Tableau 28 : Estimation de l'accélération maximale en mode concert extrême.....	81
Tableau 29 : Paramètres de calcul au saut normal dans le cas d'un individu.....	82
Tableau 30 : Charge de dimensionnement statique réglementaire usuelle	83
Tableau 31 : Charge de dimensionnement dynamique accidentelle	83
Tableau 32 : Coefficients de Fourier de l'action de saut avec plus de 400 personnes	84
Tableau 33 : Charge surfacique de dimensionnement statique de la structure de plancher	85
Tableau 34 : Charges de dimensionnement dynamique de la structure de plancher	85
Tableau 35 : Déformations et accélérations maximales à la résonance	85
Tableau 36 : Inventaire d'incidents liés à des activités événementielles	87
Tableau 37 : Coefficients moyens par individu pour le saut en groupe de plus de 400 personnes.....	90
Tableau 38 : Coefficients moyens par individu pour l'action de la danse en groupe	90
Tableau 39 : Paramètres généraux de calcul à la fatigue avec l'Eurocode 3 partie 1-9.....	94
Tableau 40 : Paramètres de la sollicitation de calcul	94
Tableau 41 : Nombre de concerts admissibles par an $N_{c/an}$ et endommagement primaire associé D_1 100	
Tableau 42 : Caractéristiques dynamiques de base de l'ouvrage non amorti	104

Tableau 43 : Détermination de l'amortissement de l'ouvrage corrigé avec les amortisseurs.....	106
Tableau 44 : Détermination de l'effort maximal développé par les amortisseurs	106
Tableau 45 : Résultats en configuration accidentelle ELA de type saut généralisé	107
Tableau 46 : Evolution du confort pour la danse normale avec amortisseurs.....	107
Tableau 47 : Evolution du confort pour la danse extrême avec amortisseurs.....	107
Tableau 48 : Chargements permanents de la structure.....	116
Tableau 49 : Paramètres de charge dynamique équivalente pour $\xi = 1\%$ à la résonance pour $h = 2$	117
Tableau 50 : Synthèse des charges d'exploitation statiques et dynamiques équivalentes	118
Tableau 51 : Principaux paramètres géométriques et mécaniques de calcul.....	119
Tableau 52 : Sollicitation de groupe (Gr) et de foule (Fo) avec et sans amortisseurs (A)	120
Tableau 53 : Taux de sollicitation de la dalle en flexion positive	120
Tableau 54 : Taux de sollicitation de la fibre inférieure de la poutre acier en flexion positive	120
Tableau 55 : Etat de fissuration de la dalle en flexion négative (F : fissuré)	120
Tableau 56 : Taux de sollicitation de la poutre acier seule en flexion positive.....	121
Tableau 57 : Flèches permanentes à 30 jours compris retrait avec et sans dalles	121
Tableau 58 : Flèches permanentes à 6 mois compris retrait et fluage avec et sans dalles.....	121
Tableau 59 : Paramètres de raideur pour le calcul des déformations en section mixte	122
Tableau 60 : Déformations dynamiques verticales vers le haut et limites admissibles.....	122
Tableau 61 : Déformations dynamiques verticales vers le bas et limites admissibles.....	123
Tableau 62 : Paramètres de raideur pour le calcul des déformations en section acier.....	123
Tableau 63 : Déformations dynamiques verticales ultimes vers le bas et limites admissibles.....	123
Tableau 64 : Essais de compression des éprouvettes de béton de la dalle du prototype	126
Tableau 65 : Playlist de synthèse suivant la fréquence de sollicitation recherchée	131
Tableau 66 : Différentes phases d'essais.....	145
Tableau 67 : Essais avec excitateur sans amortisseurs	145
Tableau 68 : Essais de groupe avec les étudiants S5.....	146
Tableau 69 : Essais de groupe avec les étudiants S3.....	146
Tableau 70 : Essais avec excitateur et amortisseurs	147
Tableau 71 : Essais de foule avec les étudiants S2	147
Tableau 72 : Propriétés modales du prototype sans dalles et à vide de public (Données ULiège)	150
Tableau 73 : Propriétés modales du prototype avec dalles et à vide de public (Données ULiège)	151
Tableau 74 : Comparaison des fréquences propres entre mesures avec fibres et modèle EF	154
Tableau 75 : Caractéristiques des matériaux du prototype	155
Tableau 76 : Caractéristiques géométriques du prototype	155
Tableau 77 : Ferrailage du prototype	155
Tableau 78 : Bac acier du prototype	155
Tableau 79 : Costières du prototype	156
Tableau 80 : Poutres longitudinales du prototype.....	156
Tableau 81 : Caractéristiques générales de la section mixte	156
Tableau 82 : Charges permanentes du prototype.....	156
Tableau 83 : Fréquences propres par la formule analytique de la poutre sur 2 appuis articulés.....	156
Tableau 84 : Déplacement vers le haut pour fissurer la dalle avec (AD) et sans dalles (SD).....	158
Tableau 85 : Propriétés modales du prototype sans dalles, à vide et avec amortisseurs (ULiège)	162
Tableau 86 : Propriétés modales du prototype avec dalles, à vide et avec amortisseurs (ULiège)	163
Tableau 87 : Taux d'amortissement attendu sans dalles	165
Tableau 88 : Taux d'amortissement attendu avec dalles	165
Tableau 89 : Caractéristiques physiques des participants	169
Tableau 90 : Propriétés modales du prototype avec dalles avec 40 individus statiques (ULiège).	170

Tableau 91 : Propriétés modales du prototype avec dallettes avec 40 individus mobiles (ULiège) ...	172
Tableau 92 : Caractéristiques physiques des participants	173
Tableau 93 : Propriétés modales du prototype avec dallettes avec 18 individus statiques (ULiège) .	174
Tableau 94 : Séries de tests A : Balancement au métronome	175
Tableau 95 : Série de tests B/C : Balancement en musique avec ou sans plaques de force.....	176
Tableau 96 : Série de tests D : Excitation libre en musique	176
Tableau 97 : Série de tests E : Saut au métronome	177
Tableau 98 : Série de tests F : Saut en musique	177
Tableau 99 : Programme détaillé des essais du matin du 23/01/2023 avec les S5	178
Tableau 100 : Programme détaillé des essais de l'après-midi du 23/01/2023 avec les S5.....	179
Tableau 101 : Emplacements, instrumentation et caractéristiques des participants S5.....	179
Tableau 102 : Programme détaillé des essais du matin du 24/01/2023 avec les S3	180
Tableau 103 : Programme détaillé des essais de l'après-midi du 24/01/2023 avec les S3.....	181
Tableau 104 : Emplacements, instrumentation et caractéristiques des participants S3.....	181
Tableau 105 : Caractéristiques physiques générales des participants S2 pour les essais de foule	182
Tableau 106 : Données personnelles moyennes des participants S2 par journée d'essai.....	182
Tableau 107 : Programme détaillé des essais du 16/03/2023 avec les participants S2	183
Tableau 108 : Programme détaillé des essais du matin du 13/04/2023 avec les S2	184
Tableau 109 : Programme détaillé des essais de l'après-midi du 13/04/2023 avec les S2.....	185
Tableau 110 : Programme détaillé des essais de l'après-midi du 20/04/2023 avec les S2.....	187
Tableau 111 : Genres musicaux classés en fonction des tempos usuels	199
Tableau 112 : Distributions par décennies, moyenne sur 60 ans et moyenne corrigée.....	202
Tableau 113 : Niveaux de confort	208
Tableau 114 : Synthèse des résultats des essais de ressenti statique à 40 individus	208
Tableau 115 : Synthèse des résultats des essais de ressenti statique à 18 individus	210
Tableau 116 : Coefficient de forme modale normalisé au centre de chaque dallette	212
Tableau 117 : Ressenti des participants aux tests de balancements et de sauts au métronome	212
Tableau 118 : Ressenti des participants aux test de sauts G et H au métronome.....	213
Tableau 119 : Synthèse des ressentis pour les essais de foule en musique	215
Tableau 120 : Coefficients de coordination maximums et moyens de l'expérimentation	221
Tableau 121 : Hypothèses de calcul et coefficients de Fourier de l'excitation pour la série G	222
Tableau 122 : Hypothèses de calcul et coefficients de Fourier de l'excitation pour la série H.....	223
Tableau 123 : Rappel des propriétés modales avec dallettes et 40 individus statiques.....	225
Tableau 124 : Rappel des propriétés modales avec dallettes à vide	225
Tableau 125 : Propriétés de la structure	225
Tableau 126 : Propriétés du groupe de participants.....	226
Tableau 127 : Paramètres relatifs pour le modèle d'amortissement	226
Tableau 128 : Amortissement de la structure seule sans public.....	227
Tableau 129 : Amortissement équivalent attribuable à la foule pour une structure non amortie	227
Tableau 130 : Amortissement équivalent du système couplé avec une structure amortie	227
Tableau 131 : Rappel des propriétés modales avec dallettes et 18 individus statiques.....	228
Tableau 132 : Rappel des propriétés modales avec dallettes à vide	228
Tableau 133 : Propriétés de la structure	228
Tableau 134 : Propriétés du groupe de participants.....	228
Tableau 135 : Paramètres relatifs pour le modèle d'amortissement	228
Tableau 136 : Amortissement équivalent du système couplé avec une structure amortie	229
Tableau 137 : Résultats avec modifications des paramètres modaux des individus	229
Tableau 138 : Rappel des propriétés modales avec dallettes et 40 individus mobiles.....	231

Tableau 139 : Propriétés de la structure	231
Tableau 140 : Propriétés du groupe de participants.....	231
Tableau 141 : Amortissement équivalent du système couplé avec une structure amortie	231
Tableau 142 : Paramètres dynamiques propres de la structure	232
Tableau 143 : Paramètres dynamiques propres du groupe.....	232
Tableau 144 : Paramètres dynamiques relatifs du système couplé.....	232
Tableau 145 : Détermination de l'amortissement équivalent	233
Tableau 146 : Paramètres dynamiques propres du groupe.....	234
Tableau 147 : Paramètres dynamiques relatifs du système couplé.....	234
Tableau 148 : Détermination de l'amortissement équivalent	235
Tableau 149 : Ecart entre le maximum de l'excitation réelle et son estimation.....	237
Tableau 150 : Ecart entre le maximum de l'excitation réelle et son estimation.....	239
Tableau 151 : Détermination de l'amortissement par la méthode du décrétement logarithmique	240
Tableau 152 : Détermination de l'amortissement par la méthode du décrétement logarithmique	242
Tableau 153 : Tableau de synthèse des amortissements mesurés et estimés	244
Tableau 154 : Variabilité de l'amortissement suivant l'activité	245
Tableau 155 : Distributions par décennies, moyenne sur 60 ans et moyenne corrigée.....	249
Tableau 156 : Variabilité de l'amortissement suivant l'activité	253
Tableau 157 : Caractéristiques physiques des participants pour les essais de foule avec les S2	272
Tableau 158 : Position des individus sur la dalle pour les essais du 16/03/2023	274
Tableau 159 : Position des individus sur la dalle pour les essais du 13/04/2023	276
Tableau 160 : Position des individus sur la dalle pour les essais du 20/04/2023	277

Liste des annexes

Annexe 1 : Incidents liés à des activités événementielles.....	265
Annexe 2 : Contenu type de la fiche de données personnelles	270
Annexe 3 : Données personnelles anonymisées des participants aux essais de foule	271
Annexe 4 : Positionnement détaillé des individus sur la dalle d'essai aux essais de foule.....	273
Annexe 5 : Etat de fissuration de la dalle après les essais	278

Chapitre 1

Dans ce chapitre, on introduit la thématique du concert d'un point de vue plus large que l'enjeu structurel spécifique traité par la suite. On aborde de manière liminaire le contexte général : les lieux contemporains, la musique, la notion de foule, l'action de danser et la temporalité.

1 Introduction

Qu'est-ce que l'interaction foule-structure sur des planchers à usage événementiel ? C'est une question que l'on peut se poser sous de nombreux aspects tant ce sujet est à la fois vaste et complexe. Nous l'abordons par la suite d'un point de vue scientifique et technique mais il est difficile de segmenter aussi simplement le problème tant on peut y voir a minima un lien entre la sociologie, la psychologie, la biomécanique, la physique, l'architecture et l'ingénierie.

Aussi, avant de s'intéresser directement à l'interaction foule-structure dans son acception mécanique intéressant le chercheur en sciences de l'ingénierie, il s'agit de préciser les usages qui peuvent être associés à la présente démarche de recherche. En outre, l'usage informe la manière d'envisager l'action et les comportements étudiés par la suite.

1.1 Les lieux

1.1.1 Espace classique

Les lieux principalement concernés par cette recherche sont premièrement les discothèques qui sont des espaces clos à accès contrôlé prenant place à l'étage d'un bâtiment. Les hangars avec dallage sur terre-plein ne posent en général pas de problèmes vis-à-vis du phénomène étudié ici. Il s'agit de s'intéresser aux lieux constitués d'un plancher porté qui peut être sujet à des vibrations sensibles, peu importe le matériau de structure même si l'étude présentée ultérieurement s'appuie sur une expérimentation de plancher mixte acier-béton.

Les discothèques modernes sont apparues dans les années 60 [1] même si le concept de boîte de nuit se développe progressivement depuis le début du 20^{ème} siècle avec l'évolution des mœurs et des styles musicaux via les cabarets et les music-halls. D'ailleurs, certaines discothèques redeviennent parfois des lieux de concert avec la présence de groupes en lieu et place du traditionnel disc-jockey.

De manière usuelle, une discothèque s'organise spatialement par la présence d'un bar, d'une ou plusieurs pistes de danse et éventuellement une scène ou des podiums sur lesquels sont positionnés un disc-jockey ou des artistes. Ce sont en général des espaces aveugles éclairés avec des jeux de lumières dynamiques dans l'objectif de générer une expérience immersive (Figure 1).



Figure 1 : DJ set dans une configuration classique (© Jake Davis)

1.1.2 Espace réinvesti

La discothèque est souvent associée à la culture underground, elle tend à investir des bâtiments non prévus initialement pour cela. Les exemples contemporains les plus célèbres sont les discothèques Berghain à Berlin (Figure 2) et The Printworks (Figure 3) à Londres, des hauts lieux de la musique électronique mondiale. A Berlin, un ancien bunker a même servi de boîte de nuit techno hardcore à la chute du mur. Les exemples les plus connus sont des anciens bâtiments industriels dont les capacités portantes des structures sont en général assez élevées et ne nécessitent donc pas de restructuration. Mais parfois les structures peuvent ne pas présenter les caractéristiques requises à l'accueil d'événements particulièrement énergétiques et c'est une des motivations de cette recherche. On peut citer l'exemple d'un hall d'exposition reconverti en salle de concert mais qui ne présentait pas les caractéristiques suffisantes pour prévenir des problèmes vibratoires importants (cas N°10 p98 de [2]).

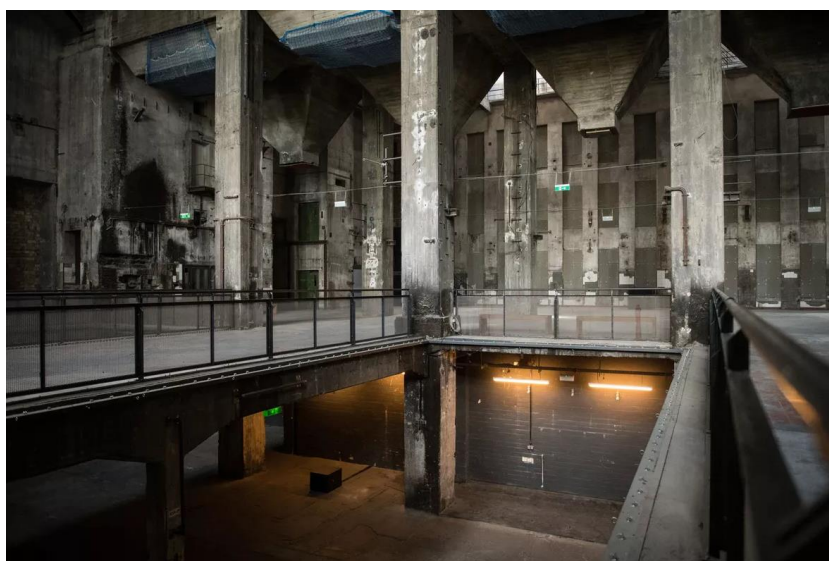


Figure 2 : Discothèque dans une centrale électrique désaffectée (© Stefanie Loos)

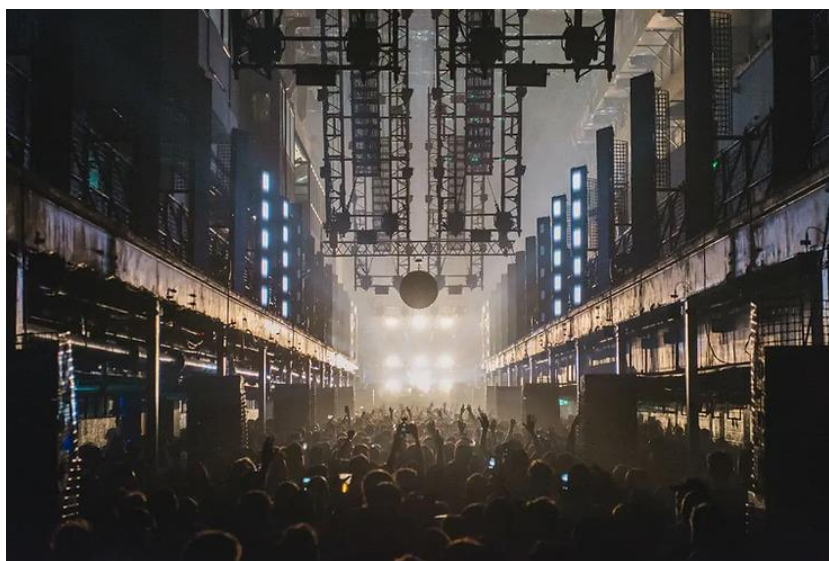


Figure 3 : Discothèque située dans une ancienne imprimerie (© Printworks)

1.1.3 Espace événementiel

On assiste également à l'apparition de discothèques, clubs ou salles de concert éphémères. De grands groupes de luxe développent des programmes dédiés à l'art contemporain mais fortement associés à des usages événementiels tels des défilés, des concerts inauguraux, des soirées privées ou publiques qui sont souvent le lieu d'intervention des plus grands artistes ou DJ contemporains. On peut citer les concerts à la Fondation Louis Vuitton de Kanye West en 2015 (Figure 4) lors de la fashion-week et de Jay-Z en 2023 pour l'inauguration de l'exposition Basquiat / Warhol. La collection Pinault organise également des soirées animées par des DJ, par exemple dans le cadre de son réseau de jeunes abonnés Super Cercle (Figure 5). La présente recherche s'inscrit tout particulièrement dans ce cadre qui a tendance à se développer a priori ou a posteriori de la construction de ces lieux culturels protéiformes.



Figure 4 : Kanye West à la Fondation Louis Vuitton en 2015 (© studio.institute)



Figure 5 : Soirée Super Cercle le 9/06/2022 (© Bourse de Commerce / Pinault Collection)

1.1.4 Espace polyvalent

Dans la continuité des espaces culturels et événementiels précédents qui sont à classer dans une catégorie spécifique par leur rayonnement international et leur programmation, on peut évoquer d'autres espaces non définis comme espaces de concert, ni même tout à fait comme espaces événementiels. Ce sont par exemple les halls ou espaces communs de circulation. Dans certains établissements publics ou privés, des soirées ou cocktails peuvent y être organisés. C'est en particulier le cas dans les campus universitaires. Comme situation bien connue par expérience, on peut citer le hall de l'ENPC (Figure 6) situé au-dessus d'un grand amphithéâtre en sous-sol et dont le plancher haut peut accueillir ponctuellement des soirées étudiantes (Figure 7) au cours desquelles les personnes sont parfois plus familières entre elles que dans une discothèque classique. Cela signifie que l'on peut s'attendre à des phénomènes rythmiques d'ensemble potentiellement très bien coordonnés.



Figure 6 : Hall de l'ENPC (© D. Delaporte) et amphithéâtre Cauchy (© F. Apesteguy)



Figure 7 : Soirée annuelle dans le Hall de l'ENPC au-dessus de l'amphithéâtre (© SBCE)

1.2 La musique

La musique est extrêmement versatile, suit les modes et les principales évolutions sociétales. C'est pourquoi on ne se retreint donc ici à aucun genre musical particulier. De plus, pour un genre donné, il existe déjà une amplitude assez large de possibilités en termes de rythme et d'invitation à la danse. La musique de discothèque contemporaine est relativement dominée par la musique électronique mais on observe un métissage permanent qui intègre des airs disco, rocks, hip-hop ou latino qui conduisent à la création de genres hybrides. A l'échelle de vie des structures, il faut pouvoir envisager un spectre de possibilités assez large en tirant l'expérience des courants musicaux s'étant développés pendant les 60 dernières années, c'est-à-dire depuis l'avènement de l'ère de la discothèque moderne. Ceci est d'autant plus important que la manière de fréquenter les discothèques a évolué depuis quelques années avec une fréquentation dépendante de la programmation ; parfois spécialisée autour d'un artiste ou d'un genre particulier. La frontière entre la discothèque et la salle de concert est parfois de plus en plus ténue et on peut presque y trouver un recouvrement sémantique.

Certains auditoriums destinés en général à un public relativement statique et même souvent pour des programmations de musique classique ont tendance à élargir le spectre musical pour accueillir des concerts pops ou rap qui induisent des comportements très différents de ceux parfois imaginés ou connus jusqu'à présent pour les ouvrages. Certaines pratiques et problèmes apparus dans l'ingénierie des structures confirment que la spécification des espaces selon le comportement des gens en rapport à un genre musical unique est relativement risquée pour l'intégrité des ouvrages et parfois même pour la sécurité des personnes.

1.3 La foule

La foule est un groupe d'individus auquel on peut associer des propriétés d'ensemble, qu'elles soient physiques ou comportementales. Une exposition ayant eu lieu à la cité des sciences et de l'industrie en 2022 [3] traite de cette notion selon différents points de vue et montre comment elle demande de croiser un grand nombre de disciplines qui ont souvent de manière usuelle peu d'interactions entre elles à l'instar des sciences physiques et sociales. Dans le cas des salles de concert, on peut considérer qu'un ensemble de personnes constitue une foule à partir du moment où l'on atteint une densité minimale dont le seuil reste subjectif et que les individus se retrouvent ensemble pour réagir à la musique chacun à leur manière mais en interaction. La notion d'interaction est importante en concert dans la mesure où l'action des uns peut, par proximité, influencer sur l'action des autres. C'est à dire qu'un individu peut être amené à avoir un comportement qu'il n'aurait pas eu seul par effet d'entraînement. Cela peut s'observer dans le sens positif via la manifestation d'un certain enthousiasme mais aussi négatif via des mouvements de panique. De nombreux modèles mathématiques ont été développés pour simuler le comportement au déplacement des foules dans le plan et nous n'étudions pas ici des scénarios d'évacuations ou de circulations. Il s'agit de comprendre comment modéliser une action verticale d'ensemble sur une structure support à partir de la connaissance plus ou moins complète des actions individuelles et en intégrant l'aspect comportemental. On envisage ici un public compris entre 20 et 30 ans qui correspond principalement à la population fréquentant les lieux évoqués précédemment. On envisage donc des populations relativement homogènes en âge même si les individus ne se connaissent pas tous ou seulement pour des groupes de tailles limitées.

1.4 La danse

Comme la musique, la notion de danse est fondamentalement évolutive. Elle dépend des genres musicaux mais aussi des conventions sociales quand elle est pratiquée dans un environnement collectif. Mais dans notre cas, on envisage la danse dans le cadre d'un concert ou d'une discothèque. Ainsi on imagine des individus quasi-statiques dans le plan en raison de la forte densité et du fait qu'ils constituent initialement une audience, des spectateurs. En revanche on conserve la possibilité de se mouvoir à la verticale : certains vont simplement se tenir debout, d'autres fléchir légèrement les genoux en rythme, certains sautiller parfois d'un pied sur l'autre et d'autres carrément sauter sur place. L'action la plus énergique envisageable est le pogo issu du mouvement punk. Cette forme de danse peut se retrouver à présent dans de nombreux autres genres musicaux dont le rap. C'est donc l'action la plus extrême envisagée car elle est relativement simple donc accessible au plus grand nombre et très énergique. Nous n'étudierons pas d'autres comportements plus complexes qui induisent un mouvement plan des participants souvent associé au pogo (Figure 8), et notamment des rapprochements entre deux parties de la foule ou des déplacements coordonnés par un leader.



Figure 8 : Participants à un pogo pendant un concert de rap (© Street Press)

1.5 Le temps

Une des principales difficultés est d'estimer la temporalité de ces événements. Elle peut être très variable suivant les pays et les établissements. Une discothèque classique ouvre généralement sur une plage de 23h à 6h. Il existe aussi des clubs qui peuvent même rester ouverts en continu sur plusieurs jours, voir sur plusieurs semaines. Mais on peut aussi avoir des usages beaucoup plus sporadiques avec des soirées ou concerts ponctuels pouvant durer 3h quelques fois dans l'année. C'est une donnée fondamentale dans la mesure où des enjeux importants y sont associés. L'état physique des participants peut d'abord fortement dépendre du moment de la journée et de la durée. Les structures peuvent donc aussi subir des cycles de sollicitations extrêmement variables en amplitude et en durée. On verra plus tard que la notion de durée des sollicitations énergétiques des planchers est fondamentale pour développer une stratégie de dimensionnement ou de justification de l'existant adaptée et non surdimensionnée. Par la suite, on considérera un usage limité et occasionnel, correspondant à des établissements non dédiés spécifiquement à l'usage de discothèque mais pouvant accueillir des manifestations d'une ampleur significative. Bien sûr, certains raisonnements et grandeurs pourront être extrapolés à d'autres situations mais les exemples se baseront sur cette hypothèse.

Chapitre 2

Dans ce chapitre, on aborde l'état de l'art associé à la modélisation de l'action d'un individu puis d'une foule dans les guides de référence. On aborde ensuite la notion d'interaction foule-structure. On traite d'abord de la manière la plus courante de modéliser la réponse de la structure pour différentes actions associées à un événement de type concert et on aborde ensuite en retour l'influence de la vibration sur l'action. L'état de l'art est principalement basé sur les guides de référence disponibles afin de comprendre ce qui est à la disposition des ingénieurs structure et comment la recherche actuelle pourrait l'améliorer.

2 Etat de l'art

2.1 Caractérisation de l'action d'une foule sans interaction avec la structure support

2.1.1 Action verticale d'un individu

L'action d'un individu varie notablement en fonction de son activité. Pour ce qui concerne la sollicitation des planchers événementiels dans la direction verticale, on peut distinguer principalement 4 typologies principales (en excluant la typologie triviale de l'immobilité) de la plus faible à la plus forte excitation :

- La marche
- La danse
- Le balancement
- Le saut

Tandis que le saut se caractérise par une phase plus ou moins longue d'absence de contact de la personne avec le sol, le balancement consiste en un mouvement de flexion des genoux sans perte de contact [4]. On peut aussi distinguer deux formes de balancement vertical ; avec ou sans décollement des talons. Le balancement vertical et le saut sont des actions qui concernent tout particulièrement les foules spectatrices de concert. La marche et la danse complètent le spectre de sollicitations en particulier pour les discothèques.

2.1.1.1 Modélisation périodique de l'excitation

Il est d'usage dans la littérature de décrire la sollicitation verticale d'un individu $F_i(t)$ supposée parfaitement périodique sous la forme d'une série de Fourier, c'est-à-dire une superposition d'harmoniques de fréquence multiple de la première harmonique :

$$F_i(t) = G_i \left(1 + \sum_{h=1}^H \alpha_h \sin(h\omega_p t + \varphi_h) \right) \quad (1)$$

G_i : Le poids de l'individu

α_h : Le coefficient de Fourier de l'harmonique h

ω_p : La pulsation de la première harmonique ($\omega_p = 2\pi f_p$)

φ_h : Le déphasage de l'harmonique h

H : Le nombre d'harmoniques considérées pour décrire la sollicitation

Cette modélisation périodique est discutable car on observe en pratique que l'excitation d'un individu n'est pas parfaitement périodique en raison du caractère irrégulier de l'action humaine. On peut donc développer des modèles stochastiques plus complexes permettant de tenir compte de cet aspect [5]. Par la suite, on continuera à raisonner avec une modélisation déterministe périodique en première approche.

2.1.1.2 Fréquences d'excitation

Les individus sont capables d'exciter autour d'une fréquence de base (1^{ère} harmonique) qui peut varier non seulement selon le type d'activité mais aussi en fonction des capacités physiques et de concentration propres à chacun. Afin de se ramener à l'excitation d'un individu type, on rassemble Tableau 1 les valeurs usuellement recueillies dans la littérature, les guides et normes internationales.

Fréquences	Marche	Danse	Balancement	Saut	Activité rythmique
Source	Bachmann [6]	Bachmann [6]	ISO 10137 [7]	BRE Digest [8]	NBC 2005 [9]
Fréquence max [Hz]	2,4	3	3	3,5	4
Fréquence min [Hz]	1,6	1,5	1,5	1,5	1

Tableau 1 : Plages de fréquences d'excitation usuelles de la littérature

Il est à noter que Mc Donald et Zivanovic [4] montrent expérimentalement que les individus sont aptes à soutenir des fréquences de balancement jusqu'à 4 Hz. La NBC 2005 [9] précise que dans le cas de groupes en activités rythmiques (incluant danse, balancement vertical et saut), les fréquences les plus critiques se situent entre 2 et 2,75 Hz.

2.1.1.3 Coefficients de Fourier

2.1.1.3.1 Variations générales selon la nature de l'excitation

La modélisation du signal excitant se construit en général dans la littérature sur la base de 3 à 6 harmoniques selon la complexité du signal réel à reproduire. Chaque harmonique est caractérisée par son coefficient de Fourier et son déphasage. Pour un type de sollicitation donnée, les études peuvent montrer une dépendance du coefficient de Fourier à la fréquence d'excitation [7]. De manière générale, il existe des variations entre les individus que ce soit en raison de leur morphologie, de leur niveau d'activité et de leur capacité à exciter sur un spectre de fréquence plus ou moins large. Aussi, les valeurs des coefficients de Fourier et les déphasages généralement retenus sont des valeurs normalisées ou moyennes. Le déphasage n'est pas systématiquement donné, les calculs étant souvent effectués de manière dissociée par harmoniques.

On résume Tableau 2 les ordres de grandeur des coefficients usuellement donnés dans les guides ou normes internationales.

Activité	Source	h	0	1	2	3	4	5	6
Marche	Bachmann [6]	α_h	1,0	0,40	0,10	0,10			
		φ_h	0,00	0,00	-1,57	-1,57			
Danse	Bachmann [6]	α_h	1,0	0,50	0,15	0,10			
		φ_h							
Balancement	ISO 10137 [7]	α_h	1,0	0,50	0,25	0,15			
		φ_h							
Saut normal	BRE Digest 426 [8]	α_h	1,0	1,80	1,29	0,67	0,16	0,10	0,13
		φ_h	0,00	0,52	-0,52	-1,57	-2,62	-0,52	-1,57

Tableau 2 : Coefficient de Fourier et déphasages usuels de la littérature

Sur la Figure 9, on représente l'allure de la sollicitation à la marche pour 3 harmoniques à une fréquence de 2 Hz. Le signal est normalisé par rapport au poids de l'individu de sorte à pouvoir visualiser la variation de l'effort vertical exercé sur le sol par rapport au poids statique de l'individu. On notera que la marche est mentionnée ici à titre de comparaison avec les activités événementielles et on se référera à la littérature pour une approche plus détaillée [10].

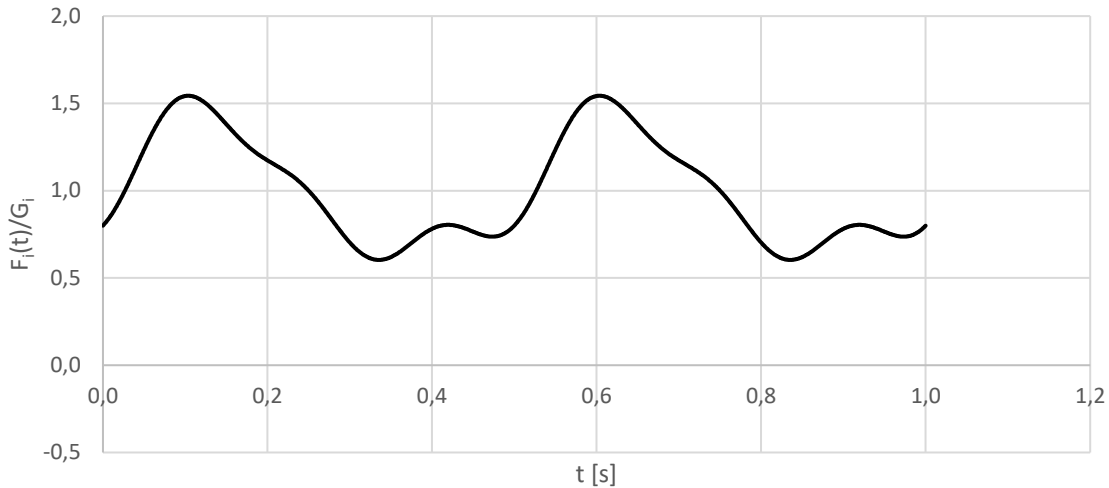


Figure 9 : Modélisation périodique ($H = 3$) du signal d'excitation de la marche à 2 Hz

Le saut normal à une fréquence de 2 Hz est représenté à la Figure 10. On observe une variation significative de l'effort entre une situation de marche et une situation de saut pouvant engendrer un effort d'impact équivalent à 4,7 fois le poids statique de l'individu. A noter que la modélisation périodique du saut à 6 harmoniques laisse encore percevoir quelques imperfections de la représentation du signal dans les intervalles où l'individu n'est plus en contact avec le sol et pour lesquelles $F_i(t)$ est par définition parfaitement nulle.

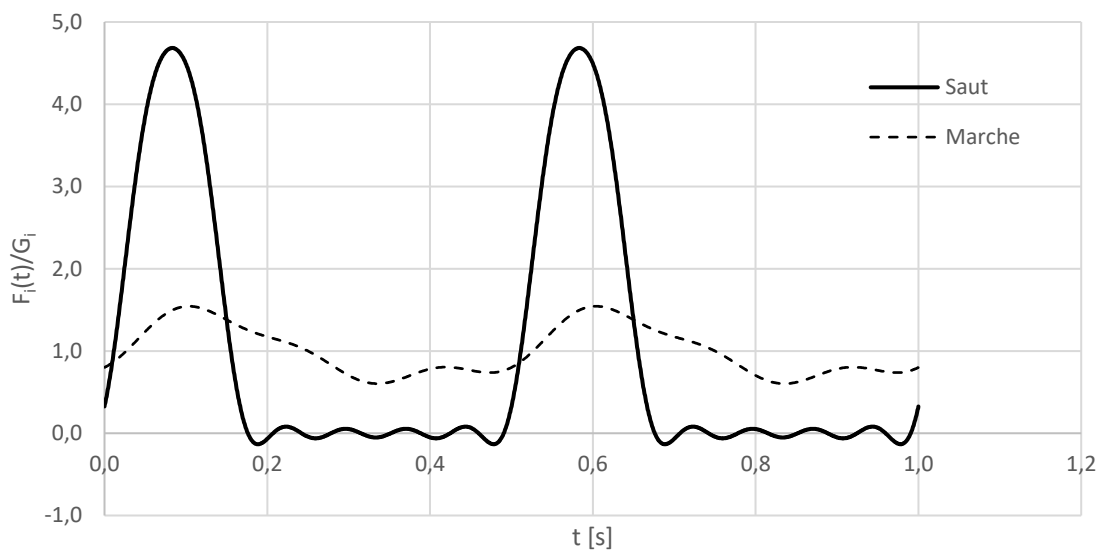


Figure 10 : Modélisation périodique ($H = 6$) du signal d'excitation au saut à une fréquence de 2 Hz

2.1.1.3.2 Variations de l'action de saut

On a pu voir que le saut est une action potentiellement très intense. Néanmoins, il est à noter que l'intensité de l'impact dépend du ratio de contact avec le sol, à savoir le temps de contact au sol t_p sur la période de l'excitation T_p (Bachmann [2] et BRE Digest 426 2004 [8]). Selon ce modèle, plus l'impact est court, plus le ratio de contact est faible, plus la force dynamique est importante. Le saut peut donc être modélisé comme un signal sinusoïdal sur le temps de contact avec un facteur d'impact inversement proportionnel au ratio de contact. Le facteur d'impact est déduit en considérant que la valeur moyenne de l'action est égale au poids statique de l'individu.

$$F_i(t) = k_p G_i \sin\left(\pi \frac{t}{t_p}\right) \quad 0 \leq t \leq t_p \quad (2)$$

$$F_i(t) = 0 \quad t_p \leq t \leq T_p \quad (3)$$

Avec le facteur d'impact k_p et le ratio de contact α :

$$k_p = \frac{\pi}{2\alpha} ; \quad \alpha = \frac{t_p}{T_p} \quad (4)$$

Les ratios de contact usuellement considérés en relation avec le niveau d'activité modélisé sous la forme d'une série de Fourier sont donnés dans le BRE 2004 [8] et repris dans le Tableau 3. Des expérimentations récentes (McDonald et Zivanovic [4] ou Elis [8]) montrent que les ratios de contact au saut observés sont plutôt de l'ordre de 0,5. Des ratios inférieurs sont considérés comme rares.

Activité (BRE 426 2004 [8])	α	h	0	1	2	3	4	5	6
Sautillement	0,67	α_h	1,0	1,29	0,16	0,13	0,04	0,02	0,03
		φ_h	0,00	-0,52	-2,62	-1,57	-0,52	-2,62	-1,57
Saut d'activités rythmiques	0,50	α_h	1,0	1,57	0,67	0,00	0,13	0,00	0,06
		φ_h	0,00	0,00	-1,57	0,00	-1,57	0,00	-1,57
Saut normal	0,33	α_h	1,0	1,80	1,29	0,67	0,16	0,10	0,13
		φ_h	0,00	0,52	-0,52	-1,57	-2,62	-0,52	-1,57

Tableau 3 : Coefficient de Fourier et déphasages usuels de la littérature selon le type de saut

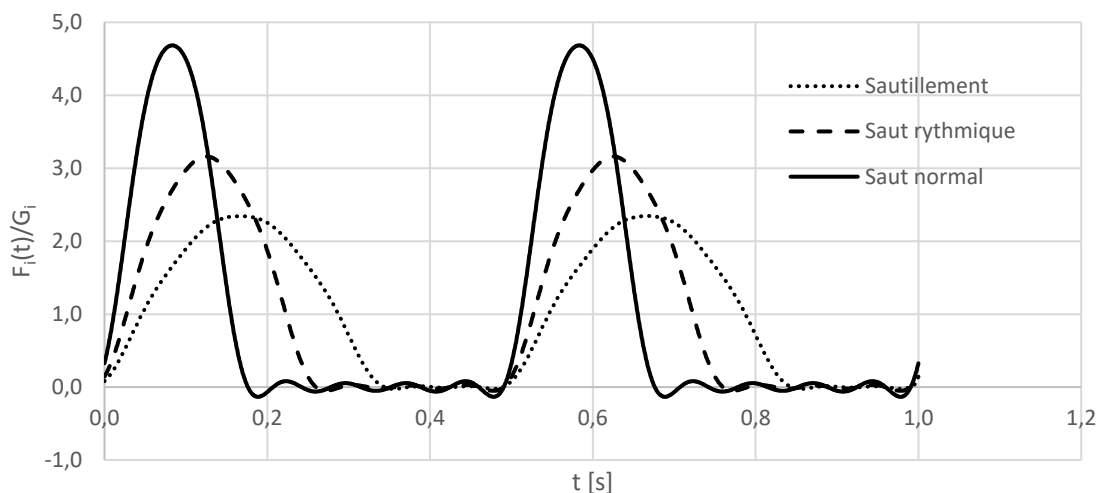


Figure 11 : Modélisation périodique de différents types de sauts à une fréquence de 2 Hz

Le BRE Digest 426 2004 [8] donne l'expression des coefficients de Fourier et du déphasage des harmoniques en fonction du ratio de contact :

$$\alpha_h = \begin{cases} \frac{\pi}{2} ; \text{ si } 2h\alpha = 1 \\ \left| \frac{2 \cos(h\pi\alpha)}{1 - (2h\alpha)^2} \right| ; \text{ si } 2h\alpha \neq 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$\varphi_h = \begin{cases} 0 ; \text{ si } 2h\alpha = 1 \\ \left\{ \begin{array}{l} \tan^{-1} \left(\frac{1 + \cos(2h\pi\alpha)}{\sin(2h\pi\alpha)} \right) - \pi ; \text{ si } \frac{\sin(2h\pi\alpha)}{1 - (2h\alpha)^2} < 0 \\ -\frac{\pi}{2} ; \text{ si } \sin(2h\pi\alpha) = 0 \\ \tan^{-1} \left(\frac{1 + \cos(2h\pi\alpha)}{\sin(2h\pi\alpha)} \right) ; \text{ si } \frac{\sin(2h\pi\alpha)}{1 - (2h\alpha)^2} > 0 \end{array} \right\} ; \text{ si } 2h\alpha \neq 1 \end{cases} \quad (6)$$

Il est à noter que le ratio de contact est lié à la hauteur du saut selon l'ISO 10137 [7]. Plus le saut est haut, plus l'intensité de la force est importante et plus le temps de contact est court. L'ISO 10137 [7] donne des ordres de grandeur de saut pour des facteur d'impact élevés. Il est intéressant pour les essais qui seront faits ultérieurement de tenter de se doter d'une loi plus générale pour se représenter visuellement la hauteur de saut correspondant aux sauts courants présentés précédemment (sautillement, saut d'activités rythmiques, saut normal).

Le raisonnement théorique proposé ici se base sur le fait que la personne au saut se trouve en situation de chute libre lorsqu'elle est décollée du sol. Par conséquent, elle n'est soumise qu'à son poids propre en négligeant bien sûr les frottements de l'air. Ainsi, elle présente pendant cette phase une accélération égale à la gravité. En notant t_a le temps passé en l'air, on peut en déduire par intégration la relation avec la position verticale du centre de masse en fonction du temps. La personne touche le sol en début et fin de cycle de saut soit en $t = 0$ et $t = t_a$. On peut donc en déduire l'expression de $z(t)$ et $v(t)$:

$$z(t) = \frac{1}{2} g(t_a - t)t \quad 0 \leq t \leq t_a \quad (7)$$

$$v(t) = g \left(\frac{t_a}{2} - t \right) \quad 0 \leq t \leq t_a \quad (8)$$

La vitesse verticale s'annule en $t = \frac{t_a}{2}$, ce qui correspond à la hauteur de saut que l'on note h_s .

On obtient donc une relation entre la durée passée en l'air et la hauteur de saut :

$$h_s = \frac{1}{8} g t_a^2 \quad (9)$$

Or on peut également faire le lien entre la durée passée en l'air et le ratio de contact moyennant la connaissance de la période de saut T_p ou, de manière plus parlante, la fréquence f_p .

$$\alpha = \frac{t_p}{T_p} = 1 - \frac{t_a}{T_p} = 1 - f_p t_a \quad (10)$$

En exprimant le temps passé en l'air en fonction de α et la fréquence de saut, on en déduit la relation donnant la hauteur de saut :

$$h_s(\alpha, f_p) = \frac{g(1-\alpha)^2}{8f_p^2} \quad (11)$$

On trace Figure 12 les courbes de hauteur de saut en fonction des fréquences usuelles pour les 5 grandes typologies de saut. A noter que Ellis [11] considère que le saut moyen usuel est caractérisé par un ratio de contact de l'ordre de 0,4. On constate que la hauteur de saut décroît rapidement avec l'augmentation de la fréquence. Un saut moyen présente une hauteur de 20 cm à 1,5 Hz et de 4 cm à 3,5 Hz. On voit donc une nuance que n'introduisait pas l'ISO 10137 dans les valeurs données : l'influence de la fréquence.

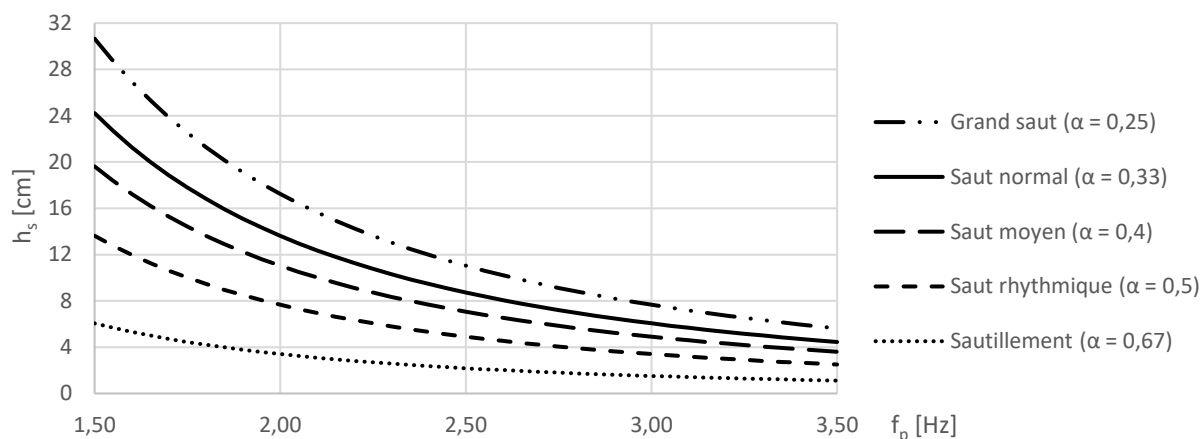


Figure 12 : Hauteur de saut théorique en fonction de la fréquence pour différents ratios de contact

En recentrant Figure 13 sur la zone de saut courants entre 1,9 Hz et 2,2 Hz, on peut définir les hauteurs moyennes correspondant à un saut à 2 Hz. Un saut moyen sera un saut de l'ordre de 11 cm tandis que les sautilllements se traduisent par une hauteur de 3,4 cm. Ces graphiques seraient particulièrement utiles pour pré-analyser des résultats d'essai sur la base de vidéos. Avec la mesure de h_s et f_p , on pourrait remonter aux coefficients de Fourier par la détermination graphique de α .

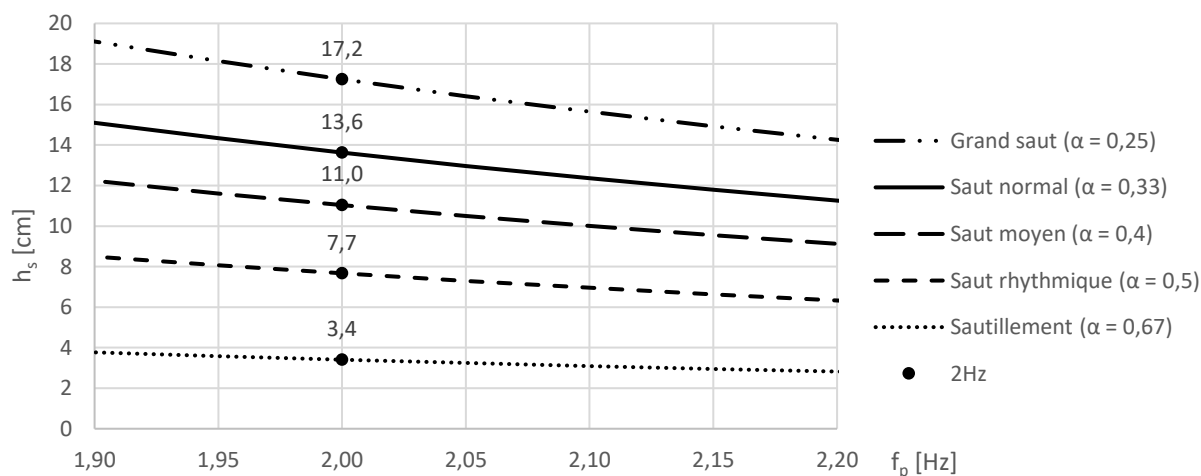


Figure 13 : Hauteurs de saut théoriques en fonction des fréquences d'excitation courantes

2.1.2 Paramètres d'influence de l'action verticale de la foule

2.1.2.1 Répartition spatiale des individus : notion de densité surfacique de la foule

La répartition spatiale des individus sur le plancher est une donnée fondamentale conditionnant l'intensité globale de la sollicitation. On définit usuellement une densité surfacique d correspondant à la moyenne du nombre de personnes occupant un m^2 de plancher. Cette moyenne est en général effectuée sur la totalité de l'ouvrage dans l'esprit des règlements définissant les effectifs admissibles dans un bâtiment. Néanmoins, pour des vérifications locales (par exemple la résistance locale de platelage entre deux poutres) ou nécessitant de tenir compte de la forme des modes excitables, il peut être nécessaire de préciser la densité de la foule par secteurs de plancher. On peut considérer que le devant d'une scène peut donner lieu à des concentrations importantes de personnes. Les règlements ou guides disponibles donnent les valeurs du Tableau 4.

Densité d (p/m ²)	Moyenne	Maximum
BRE 426 2004 [8]	Selon admission	6
ISO 10137 [7]	0,8	6
Bachmann et Ammann [2]	2	6

Tableau 4 : Densité de la foule selon les normes et guides internationaux

Le BRE 426 2004 [8] se base sur la capacité d'admission pour déterminer la densité fréquente de personnes dans une zone. Si on se réfère au règlement ERP pour les établissements de type L (Arrêté du 5 février 2007 [12]) comprenant notamment les salles de spectacles, on limite à 3 personnes par m^2 le nombre de personnes assistant à une manifestation sans disposer de sièges ou de bancs.

On peut en conclure qu'une valeur courante de 2 p/m² comme proposé par Bachmann et Ammann [2] et repris dans la SCI P354 [13] semble être une bonne valeur moyenne usuelle tenant compte des contrôles d'effectifs et des observations pratiques. Une valeur maximale locale de 6 p/m² est en revanche une valeur qui fait consensus actuellement dans la littérature.

2.1.2.2 Variations individuelles temporelles : Fréquence et intensité

Lors d'un concert, les individus corrigent en permanence leur excitation et donc la fréquence de saut pour coller à la fréquence de la source musicale de référence. Ce caractère légèrement apériodique se conjugue avec une variation du motif d'excitation se traduisant par des hauteurs de saut variables d'un saut à l'autre pour un même individu. L'action continue d'un individu présente donc des cycles de contact de durées variables et une intensité maximale fluctuante [5] [14].

2.1.2.3 Variations d'ensemble : Déphasage relatif et variation d'intensité de la force

Les individus présentent des temps de réactions propres par rapport à la source musicale qui induisent des déphasages relatifs. Cela a pour conséquence directe de voir les pics de sollicitations ne pas coïncider parfaitement. A coefficients de Fourier et fréquence fixés, si on divise l'excitation globale résultante par le nombre de personnes, on obtient un effort dynamique moyen inférieur à l'effort individuel. Il y a un effet atténuateur significatif du déphasage dans un groupe. De plus, la limite haute de fréquence excitable par un groupe serait réduite à 2,8 Hz contre 3,5 Hz pour un individu selon le BRE Digest 426 [15] mais ceci est contesté par Littler [16] qui renvoie à des essais complémentaires.

Sans compter les variations de poids propre, chaque individu peut avoir une hauteur moyenne de saut différente, ce qui induit des variations pour les coefficients de Fourier entre les individus.

2.1.3 Modélisation de l'action de la foule dans un concert

2.1.3.1 Action de la foule au saut et coordination

Pour tenir compte des variations aléatoires propres à l'action des différents individus, on peut retrouver dans la littérature des modèles proposant de tenir compte d'une atténuation de l'effort global surfacique par rapport à une force globale résultante calculée sans imperfections individuelles (excitation individuelle parfaitement périodique) et relatives (individus identiques et synchronisés).

La problématique est de disposer de données expérimentales pour de grands nombres de personnes. Les modèles trouvés dans la littérature reposent en général sur des mesures effectuées dans des tribunes [17] en situation de foule réelle avec plusieurs activités simultanées (public debout ou assis, statique ou en mouvement) ou sur des planchers dans des configurations expérimentales contrôlées mais faisant intervenir de l'ordre d'une soixantaine de personnes au maximum. Aussi, des modèles expérimentaux ont été extrapolés par des méthodes numériques statistiques permettant de donner une indication de l'évolution des coefficients de Fourier décrivant l'action globale de la foule au-delà d'une centaine de personnes pour une activité donnée (par exemple le saut).

La prise en compte des imperfections individuelles et d'ensemble est importante notamment pour la sollicitation la plus intense qu'est le saut afin de ne pas surdimensionner inutilement les structures en supposant une synchronisation parfaite pour de grands groupes. Les approches se précisent depuis la fin des années 1990 pour développer une modélisation appropriée de l'excitation globale de la foule d'un point de vue déterministe. Même si le caractère aléatoire de l'excitation globale persiste pour un même groupe de personnes, on note que les variations de coordination se réduisent pour de grandes foules [11]. Le modèle déterministe consiste à définir un coefficient de coordination qui réduit l'action globale calculée comme la somme des actions individuelles sans tenir compte de l'irrégularité réelle en fréquence de l'excitation et des variations interindividuelles en action et en phase :

$$f_{moy}(t) = dF_{moy}(t) = dG_{moy} \left(1 + \sum_{h=1}^H C_h(N) \alpha_h \sin(h\omega_p t + \varphi_h) \right) \quad (12)$$

d : Nombre N d'individus de poids moyen G_{moy} dans la foule divisé par l'aire S de plancher

$C_h(N)$: Coefficient de coordination pour l'harmonique h qui peut dépendre de N

$f_{moy}(t)$: Force surfacique moyenne équivalente à l'action de la foule

$F_{moy}(t)$: Force moyenne équivalente ramenée à un individu

Le BRE Digest 426 1997 [15] proposait de retenir une réduction forfaitaire de l'action globale d'une foule au saut d'un facteur $\frac{2}{3}$ (Tableau 5). Ceci est repris directement dans l'annexe A des BS 6399 : Partie 1 : 1996 [18].

Coordination selon BRE Digest 426 1997 [15]	h = 1	h = 2	h = 3
Coordination au saut $C_h(N)$	0,67	0,67	0,67

Tableau 5 : Coefficient de coordination $C_h(N)$ pour le saut selon le BRE Digest 426 de 1997 [15]

L'ISO 10137 [7] de 2007, qui ne regarde que les vérifications de confort dans son cadre d'application, spécifie le coefficient de coordination en fonction du niveau d'entraînement de la foule et par harmonique (Tableau 6). La coordination est d'autant plus faible que les gens sont moins entraînés et que les harmoniques sont élevés. Les coefficients sont donnés pour des groupes supérieurs à 50 personnes mais ne dépendent pas du nombre d'individus constituant le groupe.

Coordination selon ISO 10137 [7]	h = 1	h = 2	h = 3
Haute (activité rythmique d'individus entraînés)	0,8	0,67	0,5
Moyenne (supporters dans un stade)	0,67	0,5	0,4
Faible (public d'un concert pop)	0,5	0,4	0,3

Tableau 6 : Coefficient de coordination $C_h(N > 50)$ pour le saut selon l'ISO 10137 [7]

Le BRE Digest 426 2004 [8] auquel l'annexe nationale des British Standards [19] fait référence, propose des coefficients de Fourier qui dépendent du nombre de participants pour représenter l'excitation périodique moyenne de la foule au saut ramenée à un individu. Une expérimentation avec un groupe de taille variable jusqu'à 64 personnes sautant sur un plancher a en effet permis d'établir les modèles de variation du Tableau 7.

Coordination selon BRE Digest 426 2004 [8]	h = 1	h = 2	h = 3
Coefficients de Fourier α_h expérimentaux pour un individu	1,61	0,94	0,44
Coefficient de coordination des participants C ($N < 65$)	$N^{-0,082}$	$N^{-0,24}$	$N^{-0,31}$
Coefficients de Fourier α_h expérimentaux pour 64 individus	1,14	0,35	0,12
Coefficient de coordination du groupe le plus grand C (64)	0,71	0,37	0,28

Tableau 7 : Coefficient de coordination $C_h(N < 65)$ pour le saut selon le BRE Digest 426 2004 [8]

En comparant les valeurs pour 64 personnes entre l'ISO 10137 [7] et le BRE Digest 426 2004 [8], on constate une correspondance avec la coordination moyenne de l'ISO 10137 pour la première harmonique et une correspondance avec la coordination faible pour les deux harmoniques suivantes.

Une extrapolation numérique basée sur les résultats d'essais avec 64 individus a été réalisée [11]. La modélisation se base sur une valeur moyenne de ratio de contact de 0,4 et tient compte :

- Des écarts de fréquence par rapport à la source musicale pour un individu donné
- De la variation dans le temps du ratio de contact pour un individu donné
- De la variation du ratio de contact selon l'individu considéré
- Du déphasage entre les individus

On donne Tableau 8 les coefficients de Fourier moyens ramenés à un individu pour une foule comprise entre environ 400 et 8192 personnes d'après les courbes de modélisation du BRE Digest 426 2004 [8]:

Coefficient de Fourier	h = 1	h = 2	h = 3	h = 4	h = 5	h = 6
400 < N étudiants < 8192	1,40	0,469	0,072	0,0070	0,0024	0,0018
400 < N danseurs PRO < 8192	1,52	0,655	0,157	0,0281	0,0073	0,0019
1 individu avec $\alpha = 0,4$	1,72	1,037	0,340	0,0669	0,1333	0,0280

Tableau 8 : Coefficients de Fourier moyens pour une foule de 8192 personnes ($\alpha_{moy} = 0,4$)

En divisant par les coefficients de Fourier d'un individu présentant un ratio de contact de 0,4 on en déduit les coefficients de coordination associées pour les 3 premières harmoniques au Tableau 9.

Coordination équivalente pour $\alpha = 0,4$	$h = 1$	$h = 2$	$h = 3$
$400 < N \text{ étudiants} < 8192$	0,82	0,45	0,21
$400 < N \text{ danseurs PRO} < 8192$	0,89	0,63	0,46

Tableau 9 : Coefficient de coordination équivalent pour le saut avec une foule importante

Il est à noter que dans le cadre de l'étude d'un plancher de discothèque, il est approprié de retenir une sollicitation de type étudiants comme proposé par Elis et Ji [8] pour tenir compte d'un degré de synchronisation courant.

On peut donc constater la relative volatilité des coefficients de coordination trouvés dans la littérature selon la nature de l'événement et le type de public concerné. Pour des vérifications de planchers de discothèque ou salles de concert accueillant du public, il semble raisonnable de retenir les données obtenues avec des étudiants. Il ressort également qu'une valeur de ratio de contact moyenne de 0,4 semble bien représenter l'action de saut observée usuellement en pratique. Aussi pour de grandes foules ($N > 400$) sur des planchers sans obstacles matériels occupés par des populations jeunes dans le cadre d'un concert pop ou d'une discothèque, on peut envisager le modèle de sollicitation de groupe uniformément répartie du Tableau 10 et représenté Figure 14.

$400 < N \text{ étudiants} < 8192$	$h = 1$	$h = 2$	$h = 3$	$h = 4$	$h = 5$	$h = 6$
Coeff. De Fourier α_h (pour $\alpha = 0,4$)	1,72	1,037	0,340	0,0669	0,1333	0,0280
Coeff. De groupe $C_h(N)\alpha_h$	1,40	0,469	0,072	0,0070	0,0024	0,0018
Phase φ_h (pour $\alpha = 0,4$)	0,31	-0,94	-2,20	-0,31	-1,57	-2,83

Tableau 10 : Coefficient de Fourier et phases décrivant l'action d'une foule d'étudiants au saut

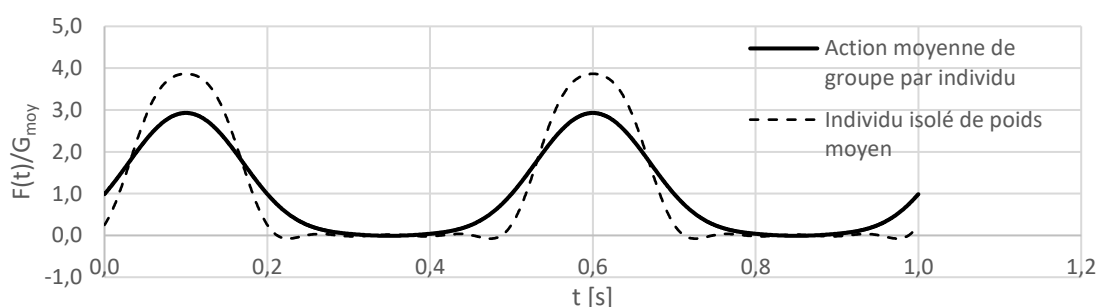


Figure 14 : Action moyenne de groupe ramenée à un individu pour une fréquence de 2 Hz

2.1.3.2 Actions de la foule hors saut coordonné : balancement vertical et danse

Les codes canadiens [9] et l'ISO 10137 [7] donnent des valeurs de coefficients de Fourier pour des groupes de personnes en situation de danse ou des spectateurs lors de concerts. Rien n'empêche d'avoir des situations de sauts coordonnés dans un concert et de retenir les coefficients de Fourier évoqués au §2.1.3.1. On peut noter des variations assez sensibles entre les normes (Tableau 11).

Activité	Sièges	Norme	Commentaires	$h = 1$	$h = 2$	$h = 3$
Balancement vertical	Oui	ISO 10137 [7]	$C_h(N) = 1 ; \forall N ; \forall h$	0,50	0,25	0,15
Danse	Non	NBC 2005 [9]	Minimum $N > 20$	0,50	0,05	-
Concert rock	Non	NBC 2005 [9]	Minimum $N > 20$	0,40	0,15	-
Concert agité	Oui	NBC 2005 [9]	Minimum $N > 20$	0,25	0,05	-

Tableau 11 : Coefficient de Fourier pour les actions de groupes et de foule hors saut coordonné

2.1.3.3 Chargement cyclique pour une vérification à la fatigue

On s'est concentré jusqu'à présent sur la description paramétrique de la sollicitation de la foule. Il est donc possible de construire un chargement adapté à une vérification de confort ou de résistance d'un plancher suivant l'usage envisagé. Néanmoins, il reste à définir le principe de construction d'un chargement cyclique tenant compte de plusieurs concerts successifs afin de procéder à des vérifications de fatigue comme suggéré par le guide Hivoss [20] (p17). La construction du chargement de fatigue doit tenir compte notamment de la durée et de la fréquence des événements mais aussi de la dispersion des fréquences de sollicitation de la foule afin de représenter le plus fidèlement possible le caractère aléatoire d'une programmation musicale.

2.1.3.3.1 Densité de la foule en service

Afin de tenir compte de la situation de service courant de l'ouvrage pour le calcul à la fatigue, il convient de définir une densité de foule moyenne, par exemple 2 p/m².

2.1.3.3.2 Durée moyenne d'un concert et comportement de la foule

Il s'agit dans un second temps de définir la durée d'un concert avec la part de temps pouvant être attribuée à certains niveaux d'activité. Par exemple, on peut supposer une durée moyenne de concert de 4h pour laquelle on retient une activité particulièrement intense de saut pendant une durée totale d'1h et une activité plus calme de la foule avec de la danse pendant les 3h restantes.

2.1.3.3.3 Durée d'utilisation du projet et fréquence des concerts

Dans un troisième temps, il s'agit de fixer la durée d'utilisation du plancher. Si on se réfère aux règlements pour des structures de bâtiment, celle-ci est généralement de 50 ans. Le maître d'ouvrage et/ou l'exploitant devra également spécifier la fréquence des concerts de sorte à définir le nombre total de concerts attendus pendant la vie de l'ouvrage.

2.1.3.3.4 Distribution des fréquences guides de l'excitation

Pour que la vérification soit réaliste, il faut tenir compte du caractère dispersé des fréquences d'excitation par la foule en raison de la variation de fréquence guide des musiques diffusées. On se réfère pour cela à l'étude de Ginty et al. [21] citée dans le BRE Digest 426 2004 [8]. L'étude se base sur l'étude de 210 musiques de genres musicaux variés (Années 60 (30), années 70 (30), années 80 (30), années 90 (120)) dont les tempos ont été relevés et dont on rappelle ici les distributions :

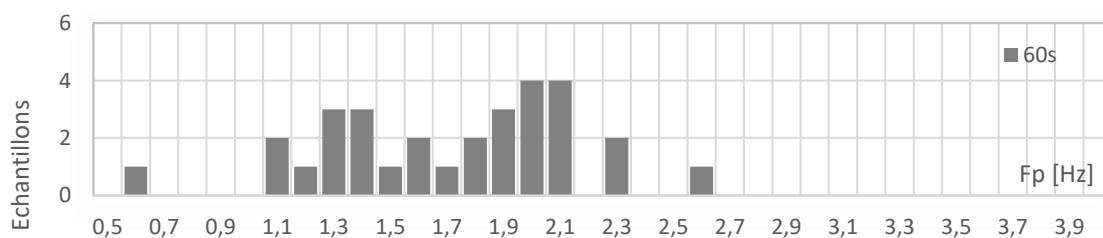


Figure 15 : Distribution en fréquence d'échantillons musicaux (30) des années 60

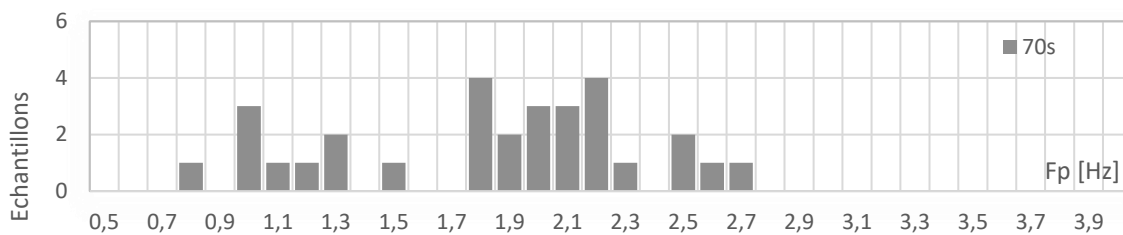


Figure 16 : Distribution en fréquence d'échantillons musicaux (30) des années 70

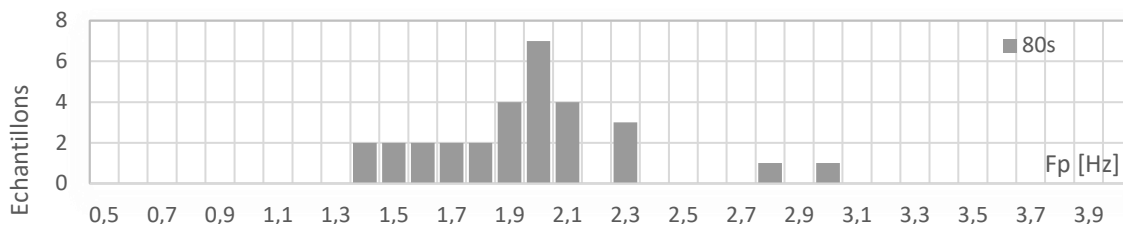


Figure 17 : Distribution en fréquence d'échantillons musicaux (30) des années 80

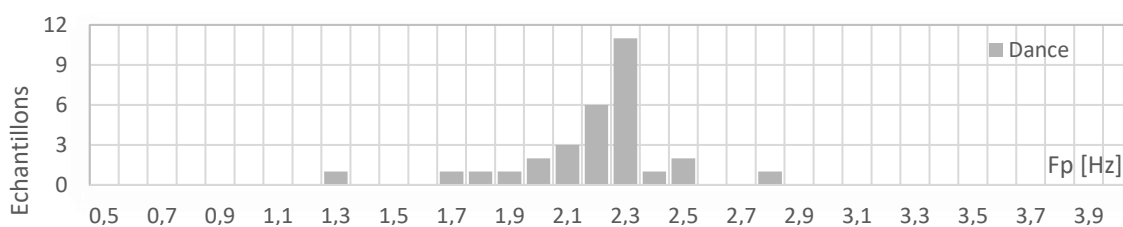


Figure 18 : Distribution en fréquence d'échantillons musicaux (30) de type Dance (années 90)

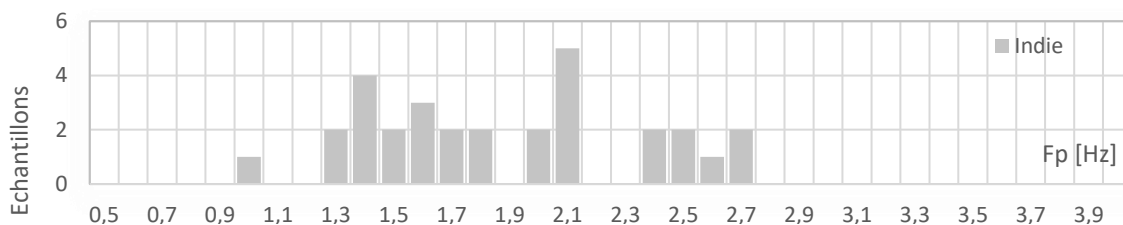


Figure 19 : Distribution en fréquence d'échantillons musicaux (30) de type Indie (années 90)

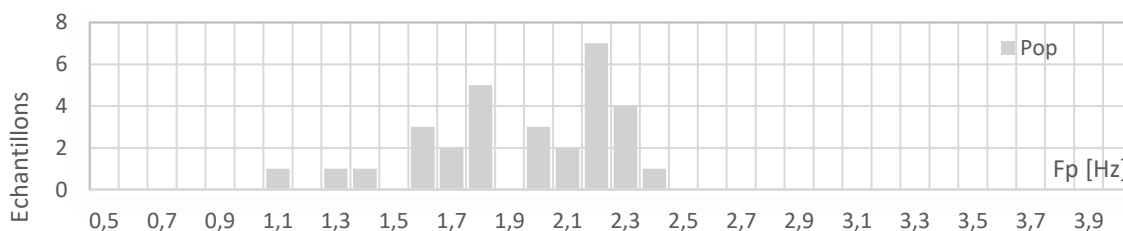


Figure 20 : Distribution en fréquence d'échantillons musicaux (30) de type Pop (années 90)

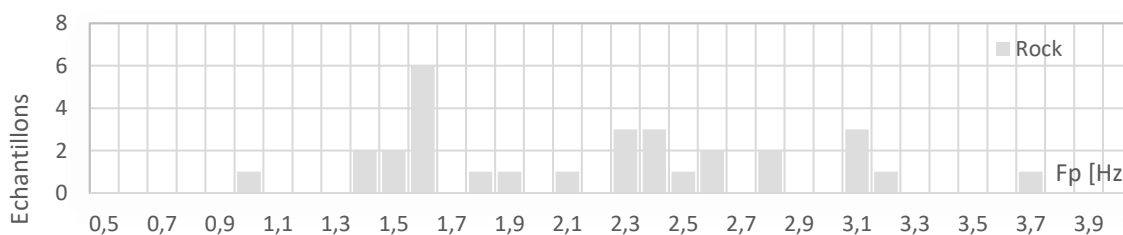


Figure 21 : Distribution en fréquence d'échantillons musicaux (30) de type Rock (années 90)

Par soucis de représenter l'ensemble des genres musicaux, on pourra considérer par la suite la distribution cumulée des genres musicaux Figure 22.

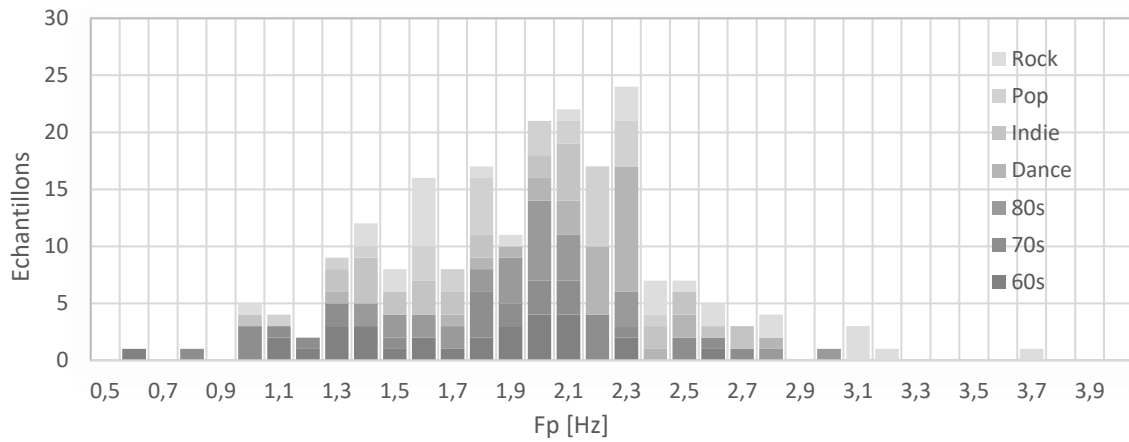


Figure 22 : Cumul de distribution en fréquence des échantillons musicaux par genre

Ginty et al. [21] mentionnent la difficulté des foules à suivre des fréquences de musiques hors de la plage 1,2 Hz – 2,8 Hz. Les musiques situées en dessous de 1,2 Hz peuvent néanmoins induire une sollicitation de la foule au double de la fréquence et les musiques situées au-dessus de 2,8 Hz peuvent induire des sollicitations de la foule à une fréquence divisée par deux. Entre 1,2 Hz et 2,8 Hz, la foule est supposée être en mouvement à la fréquence de la musique. Partant de ces principes, on en déduit la distribution de fréquences d'excitation Figure 23 qui sera utilisée pour le calcul à la fatigue.

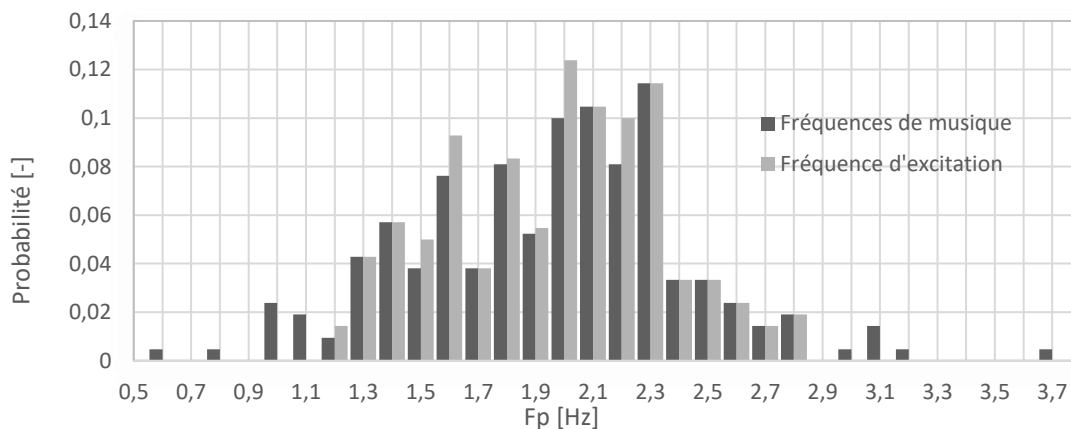


Figure 23 : Distribution des fréquences des musiques et des fréquences d'excitation de la foule

La distribution de fréquences d'excitation permet de déterminer la part de temps pour lequel un public assistant à un concert sollicite le plancher à une fréquence donnée. D'après le graphique ci-dessus, on considérera par exemple que la foule saute à 2 Hz (+/- 0.05Hz) pendant 12% du temps au saut (1h), soit 7,2 min. De même pour la danse, la foule excitera l'ouvrage à 2Hz (+/- 0.05Hz) pendant 12% du temps dédié (3h) soit 21,6 min. Ce calcul de temps de sollicitation par fréquence d'excitation doit être fait pour chaque intervalle de fréquence. De cette manière on pourra évaluer la réponse de l'ouvrage pour chaque plage de fréquence d'excitation et en déduire les étendues de contraintes pour le détail vérifié à la fatigue.

2.2 Interaction foule-structure

L'interaction de la foule avec la structure peut s'envisager selon deux points de vue distincts : l'action de la foule sur la structure et réciproquement l'action de la structure sur la foule. Dans le premier cas, il est possible de considérer la participation de la foule non pas simplement comme une source d'excitation extérieure mais aussi en tant que système mécanique en lien avec le plancher en vibration. Dans le deuxième cas, il faut considérer le caractère humain de la foule qui peut adapter son comportement et donc son action excitatrice en fonction du niveau de vibration du plancher.

2.2.1 Approches déterministes et stochastiques

Les méthodes usuelles du dimensionnement des structures tendent à privilégier des approches déterministes. Cependant, l'action des personnes sur une structure est par essence aléatoire et variable dans le temps. L'emploi de méthodes déterministes tient au fait que les ingénieurs souhaitent maîtriser les ordres de grandeurs au moyen de représentations simples ou intuitives des phénomènes. Ainsi, les Eurocodes tiennent compte d'une partie des incertitudes inhérentes à la nature des actions par des méthodes semi-probabilistes au moyen de coefficients partiels de sécurité. L'ingénieur n'a alors en général qu'à réaliser un calcul purement déterministe pour les actions statiques ou certaines actions dynamiques comme les séismes grâce à des spectres de calcul.

Mais on peut avoir envie d'évaluer l'effet sur la réponse de la structure des incertitudes portant sur les actions. En général, l'approche la plus courante au premier abord est de réaliser plusieurs calculs dynamiques à partir de différents enregistrements d'actions. On fait ensuite des statistiques sur les réponses via les méthodes de Monte-Carlo. Mais cette méthode a l'inconvénient d'être chronophage puisqu'elle nécessite autant de calculs dynamiques que d'échantillons d'action testés. Aussi il a été développé des méthodes stochastiques qui consistent à réaliser des modèles statistiques des données d'entrée afin d'obtenir un modèle statistique de la réponse avec un seul calcul dynamique. A partir de ce modèle, il est possible de déduire une estimation du maximum de la réponse pour une période donnée [22].

Ces approches stochastiques peuvent être menées dans le domaine temporel, à l'instar de la méthode déterministe classique qui peut être vue comme un cas particulier de la méthode probabiliste. Mais il est en général préféré de travailler dans le domaine fréquentiel via la transformation de Fourier pour simplifier la résolution. En effet l'approche fréquentielle permet de s'affranchir de la réponse transitoire et de ne conserver que la composante stationnaire d'intérêt [23].

Certaines approches récentes tentent de complexifier les modélisations dynamiques pour une représentation plus fine et réaliste [24]. Ces approches essaient de représenter l'action individuelle de chaque individu qu'il soit actif ou passif. Cela conduit à un modèle dynamique relativement complexe à appréhender. La lourdeur de la modélisation dynamique est compensée par l'emploi de l'approche stochastique. Mais cela peut se faire au détriment de l'intelligibilité du calcul.

Les principes de modélisation présentés ici resteront d'approche simple et intuitive. L'objectif est d'abord d'étudier la base de données expérimentales. D'autres approches plus complexes pourront être menées à la suite de ces travaux. L'approche stochastique se nourrit en effet des données disponibles sur les actions. Or c'est précisément ce qui fait le plus défaut dans la littérature. Si la pertinence de la modélisation du système couplé est un enjeu important, la compréhension intuitive du phénomène l'est tout autant dans un premier temps.

2.2.2 Participation de la foule à la structure en vibration

Les principes de modélisation de la participation de la foule à la vibration de la structure doivent tenir compte de la nature du contact des individus avec l'ouvrage. En effet, les individus présentent des caractéristiques mécaniques (masse, raideur, amortissement) qui modifient les caractéristiques mécaniques du système de plancher considéré isolément.

Dans une première configuration exceptionnelle, on peut envisager la situation d'une foule globale au saut sans aucune personne en contact permanent avec l'ouvrage (Figure 24). Il s'agit de la situation la plus simple à modéliser mais aussi la plus redoutée car source d'un grand niveau de sollicitation de la structure pour une contribution supposée nulle ou très faible de la foule à l'amortissement global de l'ouvrage en vibration [8]. La foule est considérée de manière simple comme une action extérieure au système mécanique analysé. Cette situation est importante en pratique pour avoir une approche du niveau de sollicitation accidentel des planchers même si la probabilité d'occurrence est faible.

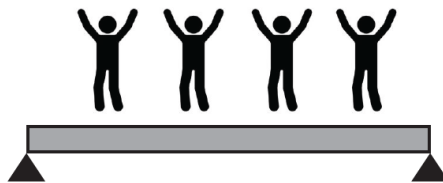


Figure 24 : Configuration d'interaction en saut généralisé

Dans une deuxième configuration plus courante, on peut imaginer la présence d'individus en balancement vertical généralisé et en contact permanent avec la structure (Figure 25). Ce cas représente le comportement usuel d'une foule compacte assistant à un concert. La foule fait partie intégrante du système mécanique du plancher analysé. On peut la représenter de manière équivalente à un système masse-ressort-amortisseur relié au plancher.

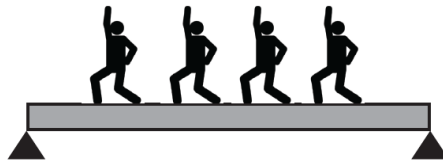


Figure 25 : Configuration d'interaction en balancement vertical (ou danse) généralisé

Une troisième configuration usuelle mais plus complexe dans son approche consiste à considérer que chaque individu puisse avoir son excitation propre : balancement vertical, saut ou même avoir une position statique (Figure 26).

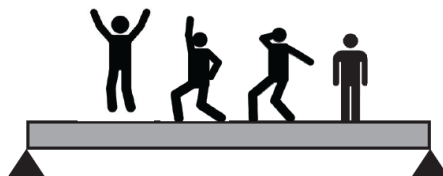


Figure 26 : Configuration d'interaction avec actions individuelles variables

Ces trois modélisations sont intéressantes dans la mesure où elles permettent d'approcher le dimensionnement des structures selon la durée des modes de sollicitations. La première configuration est utile pour une approche en résistance accidentelle tandis que les deux autres configurations sont des approches permettant de contribuer à la définition d'un chargement cyclique de fatigue.

2.2.2.1 Cas extrême d'une foule en saut généralisé

2.2.2.1.1 Hypothèses de modélisation de la foule au saut généralisé

Un individu qui saute présente une durée d'absence de contact avec la structure en vibration. Par principe, on ne prend pas en considération la masse de la foule dans la détermination de la masse modale du plancher étudié. La foule est alors considérée comme une simple action extérieure sans contribution d'ordre mécanique (masse, raideur ou amortissement) au système de plancher. C'est une méthode simple et sécuritaire dénommée modèle de la « force seule » [8]. Mais des études sont en cours pour mieux décrire cette interaction complexe en tenant compte des paramètres biomécaniques et éviter de surestimer les accélérations calculées [25] [26].

2.2.2.1.2 Réponse d'un système à un degré de liberté et action statique équivalente à un individu

Considérons l'action au saut d'une personne sur un système masse-ressort-amortisseur (Figure 27).

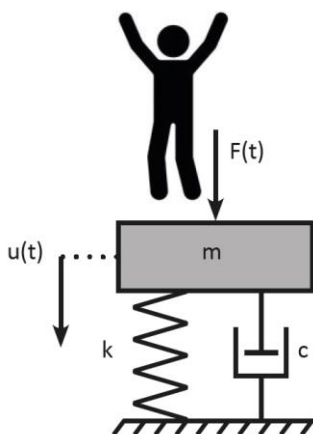


Figure 27 : Système à un degré de liberté avec excitation au saut par un individu

L'équation d'équilibre dynamique classique s'écrit :

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F(t) \quad (13)$$

En introduisant la pulsation propre ω et le taux d'amortissement critique ζ :

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (14)$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (15)$$

L'équation devient :

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega\dot{u} + \omega^2u = \frac{F(t)}{m} \quad (16)$$

On fait l'hypothèse d'une sollicitation périodique à la pulsation $\omega_p = 2\pi f_p$ de l'individu de poids G_i décomposable en série de Fourier, soit une somme d'excitations à H harmoniques h :

$$F(t) = G \left(1 + \sum_{h=1}^H \alpha_h \sin(h\omega_p t + \varphi_h) \right) \quad (17)$$

On en déduit la solution de l'équation en régime permanent :

$$u(t) = \frac{G}{k} \left(1 + \sum_{h=1}^H \alpha_h A_h \sin(h2\pi f_p t + \varphi_h + \theta_h) \right) \quad (18)$$

Avec le coefficient d'amplification dynamique :

$$A_h = \frac{1}{\sqrt{(1 - (\beta h)^2)^2 + (2\xi\beta h)^2}} \quad (19)$$

Le déphasage de la réponse par rapport à l'excitation :

$$\theta_h = \tan^{-1} \left(\frac{-2\xi\beta h}{1 - (\beta h)^2} \right); \quad -\pi \leq \theta_h \leq 0 \quad (20)$$

Le rapport entre la fréquence d'excitation et la fréquence propre du système excité :

$$\beta = \frac{\omega_p}{\omega} \quad (21)$$

On s'intéresse à l'effort élastique développé dans la structure support :

$$F_{el}(t) = ku(t) \quad (22)$$

Que l'on peut réécrire :

$$F_{el}(t) = G \left(1 + \sum_{h=1}^H \alpha_h A_h \sin(h2\pi f_p t + \varphi_h + \theta_h) \right) \quad (23)$$

Si l'on souhaite vérifier la résistance de la structure support, il s'agit de déterminer le maximum de l'effort élastique. Une approche conservative consiste à faire abstraction du déphasage entre les harmoniques de la réponse.

$$F_{el,max} \leq G \left(1 + \sum_{h=1}^H \alpha_h A_h \right) \quad (24)$$

Les coefficients de Fourier étant globalement décroissants avec les harmoniques, on obtiendra l'effort élastique maximal pour une harmonique excitatrice de l'individu à la fréquence propre de l'ouvrage support.

Dans le cas d'une structure simplement posée sur le sol, il faut également déterminer l'effort élastique minimum car celui-ci peut être négatif en fonction de l'amplification dynamique :

$$F_{el,min} \geq G \left(1 - \sum_{h=1}^H \alpha_h A_h \right) \quad (25)$$

Il s'agit ici du principe général britannique pour envisager le dimensionnement des structures. On retrouve pour une structure simple à un degré de liberté les efforts statiques équivalents aux extrema de la sollicitation dynamique donnée dans la SCI P354 §8.1 [13] et le BRE Digest 426 [8].

2.2.2.1.3 Réponse dynamique d'un plancher à la foule et action statique équivalente

On peut généraliser l'approche précédente dans le cas d'une structure de plancher à la flexibilité distribuée. Considérons donc un plancher à deux dimensions (x, y) du plan de masse surfacique $m(x, y)$ soumis à une charge extérieure surfacique normale au plan moyen $f(x, y, t)$.

On applique le principe des puissances virtuelles avec une vitesse virtuelle verticale $\dot{u}_v(x, y, t)$:

$$P_i(\dot{u}_v) + P_e(\dot{u}_v) = P_a(\dot{u}_v) \quad (26)$$

Avec :

La puissance des quantités d'accélération :

$$P_a(\dot{u}_v) = \iint m(x, y) \ddot{u}(x, y, t) \dot{u}_v(x, y, t) dx dy \quad (27)$$

La puissance des forces extérieures :

$$P_e(\dot{u}_v) = \iint f(x, y, t) \dot{u}_v(x, y, t) dx dy \quad (28)$$

La puissance des efforts internes en considérant une plaque uniquement soumise à de la flexion selon les hypothèses de Kirchhoff-Love et en notant κ la courbure :

$$P_i(\dot{u}_v) = - \iint (M_{xx} \kappa_{xx,v} + M_{yy} \kappa_{yy,v} + M_{xy} \kappa_{xy,v}) dx dy \quad (29)$$

On peut ensuite retrouver les relations suivantes avec la loi de comportement du matériau élastique :

$$M_{xx} = D(\kappa_{xx} + \nu \kappa_{yy}); M_{yy} = D(\kappa_{yy} + \nu \kappa_{xx}); M_{xy} = D(1 - \nu) \kappa_{xy} \quad (30)$$

Avec le module d'Young E , l'épaisseur de la plaque h et le coefficient de Poisson ν , D s'écrit :

$$D = \frac{E h^3}{12 (1 - \nu^2)} \quad (31)$$

On peut écrire les courbures en fonction des déplacement verticaux :

$$\kappa_{xx} = \frac{d^2 u}{dx^2}; \kappa_{yy} = \frac{d^2 u}{dy^2}; \kappa_{xy} = \frac{d^2 u}{dxdy} \quad (32)$$

$$\kappa_{xx,v} = \frac{d^2 \dot{u}_v}{dx^2}; \kappa_{yy,v} = \frac{d^2 \dot{u}_v}{dy^2}; \kappa_{xy,v} = \frac{d^2 \dot{u}_v}{dxdy} \quad (33)$$

En nommant $z(t)$ la coordonnée généralisée et $\psi(x, y)$ l'allure de la déformée, la déformation verticale s'écrit en chaque point de la plaque de coordonnées (x, y) :

$$u(x, y, t) = \psi(x, y) z(t) \quad (34)$$

De même pour la vitesse virtuelle qui s'écrit sur le même principe :

$$\dot{u}_v(x, y, t) = \psi(x, y) \dot{z}_v(t) \quad (35)$$

En définissant la raideur généralisée k^* :

$$k^* = k_{xx}^* + k_{yy}^* + k_{xy}^* \quad (36)$$

$$k_{xx}^* = \iint D \left(\frac{d^2\psi}{dx^2} + v \frac{d^2\psi}{dy^2} \right) \frac{d^2\psi}{dx^2} dx dy \quad (37)$$

$$k_{yy}^* = \iint D \left(\frac{d^2\psi}{dy^2} + v \frac{d^2\psi}{dx^2} \right) \frac{d^2\psi}{dy^2} dx dy \quad (38)$$

$$k_{xy}^* = \iint D(1-v) \left(\frac{d^2\psi}{dxdy} \right)^2 dx dy \quad (39)$$

La masse généralisée m^* :

$$m^* = \iint m(x,y) \psi(x,y)^2 dx dy \quad (40)$$

Et la force généralisée f^* :

$$f^* = \iint f(x,y,t) \psi(x,y) dx dy \quad (41)$$

On peut donc réécrire la puissance des efforts internes :

$$P_i(\dot{u}_v) = -k^* z(t) \dot{z}_v(t) \quad (42)$$

La puissance des quantités d'accélération :

$$P_a(\dot{u}_v) = m^* \ddot{z}(t) \dot{z}_v(t) \quad (43)$$

La puissance des efforts extérieurs :

$$P_e(\dot{u}_v) = f^* \dot{z}_v(t) \quad (44)$$

Le principe des puissances virtuelles conduit alors à l'équation d'équilibre suivante :

$$m^* \ddot{z}(t) + k^* z(t) = f^* \quad (45)$$

On retrouve l'équation différentielle de l'oscillateur simple à 1 degré de liberté non amorti. On extrapole l'équation précédente à un système amorti en introduisant par hypothèse un amortissement généralisé noté c^* tel que :

$$m^* \ddot{z}(t) + k^* z(t) + c^* \dot{z}(t) = f^* \quad (46)$$

En introduisant la pulsation propre ω^* et le taux d'amortissement critique ζ^* :

$$\omega^* = \sqrt{\frac{k^*}{m^*}} \quad (47)$$

$$\zeta^* = \frac{c^*}{2\sqrt{k^*m^*}} \quad (48)$$

L'équation devient :

$$\ddot{z} + 2\zeta^* \omega^* \dot{z} + \omega^{*2} z = \frac{f^*}{m^*} \quad (49)$$

Faisons l'hypothèse d'une charge $f(x,y,t) = f(t)$ uniformément répartie pour exciter le premier mode symétrique d'une plaque posée par exemple simplement sur ses 4 angles :

$$f^*(t) = f(t) \iint \psi(x,y) dx dy \quad (50)$$

En considérant une excitation extérieure périodique de la forme suivante :

$$f(t) = g \left(1 + \sum_{h=1}^H \alpha_h \sin(h\omega_p t + \varphi_h) \right) \quad (51)$$

On obtient l'expression de la coordonnée généralisée en régime permanent :

$$z(t) = \frac{g}{k^*} \left(1 + \sum_{h=1}^H \alpha_h A_h^* \sin(h2\pi f_p t + \varphi_h + \theta_h^*) \right) \iint \psi(x, y) dx dy \quad (52)$$

Et on en déduit le déplacement en régime permanent :

$$u(x, y, t) = \psi(x, y) \frac{g}{k^*} \left(1 + \sum_{h=1}^H \alpha_h A_h^* \sin(h2\pi f_p t + \varphi_h + \theta_h^*) \right) \iint \psi(x, y) dx dy \quad (53)$$

Avec le coefficient d'amplification dynamique :

$$A_h^* = \frac{1}{\sqrt{(1 - (\beta^* h)^2)^2 + (2\zeta^* \beta^* h)^2}} \quad (54)$$

Le déphasage de la réponse par rapport à l'excitation :

$$\theta_h^* = \tan^{-1} \left(\frac{-2\zeta^* \beta^* h}{1 - (h\beta^*)^2} \right); -\pi \leq \theta_h^* \leq 0 \quad (55)$$

Le rapport entre la fréquence d'excitation et la fréquence propre du système excité :

$$\beta^* = \frac{\omega_p}{\omega^*} \quad (56)$$

L'effort élastique généralisé s'écrit donc à chaque instant t :

$$k^* z(t) = g \left(1 + \sum_{h=1}^H \alpha_h A_h^* \sin(h2\pi f_p t + \varphi_h + \theta_h^*) \right) \iint \psi(x, y) dx dy \quad (57)$$

On peut ainsi identifier par analogie avec l'équation (50) l'effort surfacique statique équivalent à un instant t qui peut être utile pour dimensionner la structure avec un modèle de calcul en fixant le paramètre β^* :

$$f_{eq}(t) = g \left(1 + \sum_{h=1}^H \alpha_h A_h^* \sin(2\pi h f_p t + \varphi_h + \theta_h^*) \right) \quad (58)$$

On retrouve ici l'expression de l'effort de dimensionnement proposé par la SCI P354 [13].

2.2.2.2 Cas fréquent d'une foule dansante ou en balancement vertical

2.2.2.2.1 Hypothèse de modélisation et objectif du raisonnement

Dans la modélisation de la danse et du balancement vertical, on considère que la foule est en contact permanent avec l'ouvrage et qu'elle fait par conséquent partie du système en vibration. Contrairement au saut, la foule ne se résume pas à une action dynamique externe, elle participe au système par sa masse sans pour autant être rigidement liée à la structure ce qui induit l'introduction d'une raideur de liaison finie et une dissipation de l'énergie se traduisant par un amortissement. L'hypothèse forte qui sera faite par la suite pour simplifier l'analyse sera de dissocier la réponse globale du système foule-structure et l'effort de contact exercé sur la structure par la foule. Cela signifie que l'on néglige l'interaction de la structure sur la foule. L'objectif du raisonnement est d'arriver à l'obtention de formules analytiques permettant d'appréhender simplement et de manière sécuritaire une configuration d'excitation dynamique uniforme sur un plancher où la foule est considérée par contact comme faisant partie du système en vibration. Des modèles complexes existent mais ils ne sont pas souvent d'application facile et donc rapide pour le projeteur.

2.2.2.2.2 Modélisation mécanique d'un individu

La modélisation mécanique d'un individu est un sujet de recherche qui semble encore assez peu conventionnellement stabilisé dans la mesure où l'on peut avoir encore certaines variations de modèles et de paramètres associés dans la littérature. Il ne s'agit pas ici de rentrer dans des considérations détaillées mais d'exposer le modèle le plus pratique et les paramètres qui semblent globalement faire consensus à ce stade. Le modèle le plus simple disponible dans la littérature [27] consiste à modéliser un individu comme une masse m_h liée au support par un ressort de raideur k_h et un amortisseur d'amortissement c_h . On y associe le pourcentage d'amortissement critique ξ_h et la fréquence propre f_h . Le système ainsi défini est lié ponctuellement à la structure via l'amortisseur et le ressort. Si l'individu est actif, on introduit un couple de forces verticales $p(t)$ s'exerçant dans des sens opposés d'un côté sur le support et de l'autre sur la masse corporelle m_h (Figure 28).

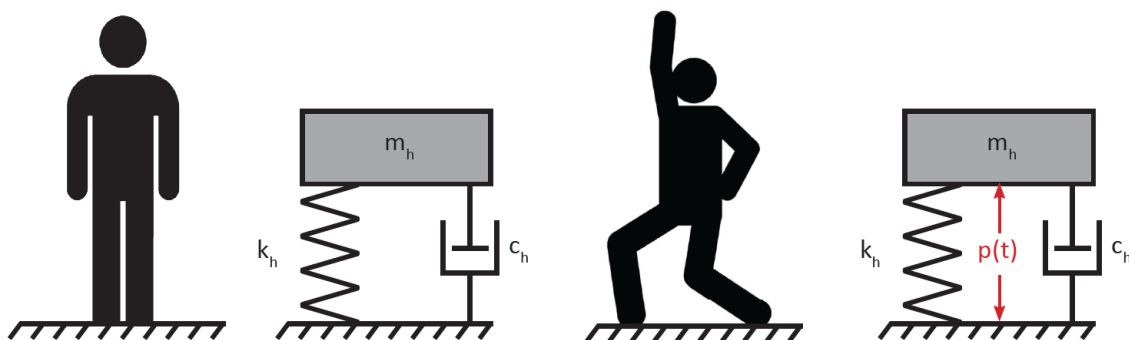


Figure 28 : Modélisation dynamique simplifiée d'un individu passif (à gauche) et actif (à droite)

Les recommandations anglaises pour la dynamique des tribunes [27] fournissent les paramètres du Tableau 12.

Configuration de la foule	m_h [kg]	f_h [Hz]	ξ_h
Personnes assises	80	5	40%
Personnes actives et principalement debout	80	2,3	25%

Tableau 12 : Paramètres dynamiques de modélisation d'un individu selon [27]

On y donne également l'expression de l'excitation $p(t)$:

$$p(t) = \rho_j(f_p) G \sum_{h=1}^3 \alpha_h \sin(h\omega_p t + \varphi_h) \quad (59)$$

Avec :

$\rho_j(f_p)$: Le facteur d'efficacité de la foule dont l'expression diffère selon que l'on veuille étudier le risque de panique pour des événements particulièrement énergétiques (appelés scénario 4) ou le confort pour des événements plus courants (appelés scénario 2 ou 3). Il dépend uniquement de la fréquence de l'activité de la foule. Dans le scénario 4, on considère une bande d'excitation en fréquence plus large que pour des événements plus courants (Figure 29).

$$\rho_4(f_p) = \operatorname{sech}(f_p - 2) = \frac{2}{e^{f_p-2} + e^{-(f_p-2)}} \quad (60)$$

$$\rho_{2,3}(f_p) = e^{-2(f_p-1,8)^2} \quad (61)$$

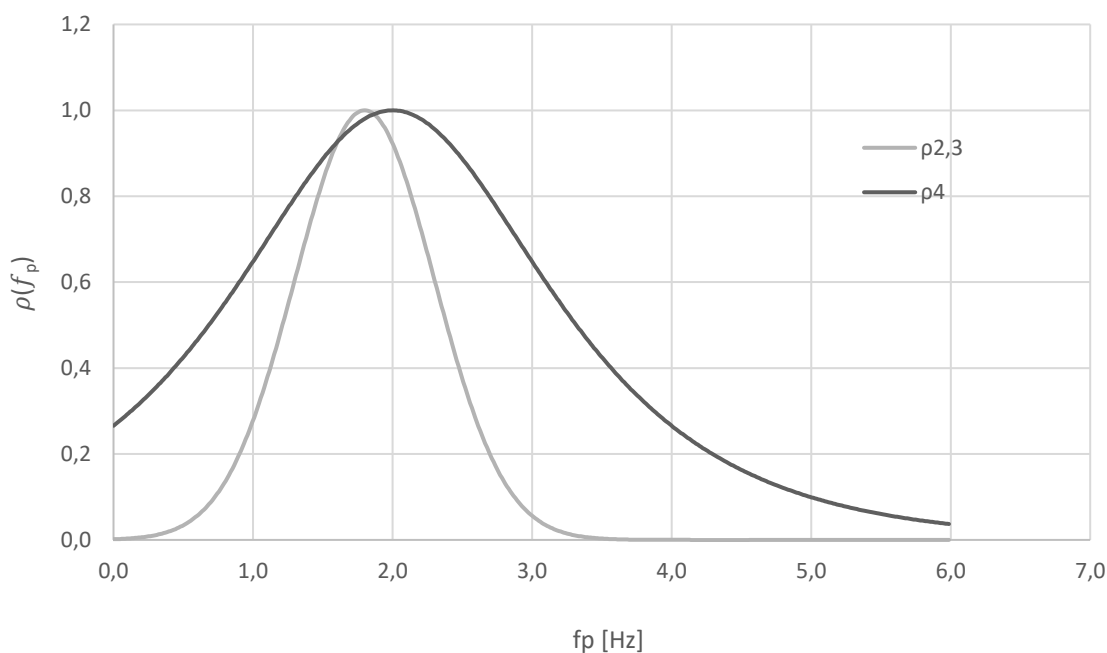


Figure 29 : Coefficients d'efficacité pour les scénarios 2,3 et 4 des règles pour les tribunes [27]

L'origine de ces coefficients d'efficacité est peu détaillée mais on comprend par leur définition qu'ils permettent de tenir compte de la capacité des personnes à suivre plus ou moins bien certaines fréquences de musiques. Il sera plus facile de suivre des tempos aux alentours de 2 Hz que des tempos plus élevés ou plus lents. On considère pour le scénario de panique une capacité d'excitation en fréquence plus étendue (jusqu'à environ 6 Hz) que pour le confort pour lequel la capacité d'excitation est plafonnée à 3,5 Hz.

Les coefficients de Fourier des scénarios 3 et 4 (Tableau 13) associés à l'excitation sont basés sur les résultats obtenus au balancement vertical de 50 personnes sur une plateforme rigide par Parkhouse et Ewins en 2006 [28]. On précise que ces valeurs sont considérées constantes pour des groupes supérieurs à 50 personnes mais peuvent augmenter considérablement avec la taille réduite du groupe. Cela sous-entend implicitement que l'influence de la coordination de la foule y est intégrée.

Scénario	Activité	α_1	α_2	α_3
Scénario 2	Majoritairement assis avec mouvement rythmique coordonné occasionnel par des personnes debout	0,12	0,015	0
Scénario 3	Toute la foule considérée active. Mouvement modéré de balancement vertical.	0,188	0,047	0,013
Scénario 4	Toute la foule est active. Excitation double du scénario 3.	0,375	0,095	0,026

Tableau 13 : Coefficients de Fourier de l'excitation au balancement selon [27]

On pourrait comprendre intuitivement que les personnes actives qui se tiennent debout présentent mécaniquement plus de souplesse que celles qui sont assises. Ce que ne précise pas la littérature sur les tribunes est l'éventuelle différence entre une personne debout inactive et une personne active se balançant verticalement. Il semble se dégager dans la littérature que la fréquence propre dans la configuration debout statique se situe généralement entre 5 Hz et 8 Hz avec une valeur moyenne proche de 6,5 Hz à faible amplitude de vibration [29]. Néanmoins, la fréquence propre diminuerait avec l'intensité des accélérations subies [29]. Pour des accélérations jusqu'à 1 m/s² rms, la fréquence propre individuelle pourrait descendre en dessous de 6 Hz [30].

Le débat se concentre ensuite sur l'amortissement associé aux personnes debouts et statiques. Matsumoto et Griffin [30] suggèrent une valeur d'amortissement pouvant aller jusqu'à 69%, tandis que Hashim [29] observe une valeur moyenne d'environ 22%, qui semble plus proche de la valeur d'amortissement du guide anglo-saxon pour les tribunes [27], mais avec un modèle mécanique légèrement plus sophistiqué. C'est un débat qui demande à être clarifié, car d'autres chercheurs semblent avoir trouvé des valeurs intermédiaires entre ces deux extrêmes mais correspondant parfois à différents types de modèles mécaniques représentant les individus [31] [26]. Il faudra à l'avenir une convergence sur le modèle le plus simple et le plus approprié aux activités décrites ainsi que sur les paramètres associés.

Concernant la masse de référence, il est également à noter qu'elle peut varier suivant les populations constituant la foule (genre, classe d'âge, nationalité, revenu, diplôme [32]). Le guide du SETRA [33] recommande par exemple la valeur de 70 kg.

En conséquence, il faudra prêter attention aux variations possibles de tous ces paramètres dans les études d'interaction. Pour une activité donnée, il existe une dépendance à la posture (genoux pliés, position debout et bien droite...). On pourra retenir en première approche les paramètres du Tableau 14 qu'il s'agit de confronter à l'expérience pour caractériser une foule de genre mixte sur un plancher de concert.

Configuration de la foule	m_h [kg]	f_h [Hz]	ξ_h	Réf.
Personnes assises	70 - 80	5	40%	[27]
Personnes debout inactives	70 - 80	5 - 6,5	20% - 70%	[29] [30]
Personnes actives et principalement debout	70 - 80	2,3	25%	[27]

Tableau 14 : Paramètres dynamiques individuels identifiés dans la littérature

2.2.2.2.3 Modélisation à plusieurs degrés de liberté du système foule-plancher

Si on considère une foule uniformément répartie sur l'ouvrage, on peut considérer, d'après l'équivalence mécanique exposée précédemment, que le système foule-plancher peut se représenter par la structure de plancher sur laquelle sont régulièrement fixés des systèmes masses-ressort-amortisseur. Le schéma Figure 30 convient par exemple pour une modélisation éléments finis du plancher pour laquelle il est possible de réaliser une analyse dynamique.

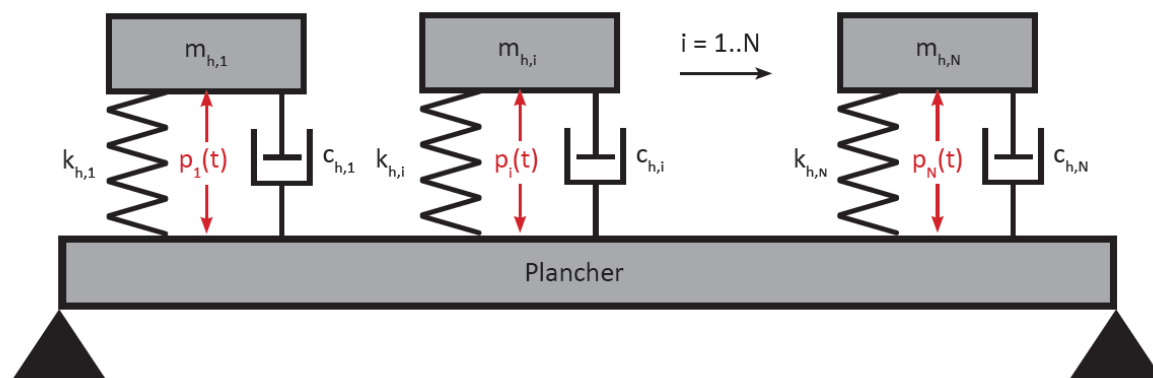


Figure 30 : Principe de modélisation à plusieurs degrés de liberté du système foule-structure

On considère par la suite pour simplifier que les paramètres associés à chaque système représentant un individu sont constants (valeurs moyennes tirées de la littérature). Cherchant à obtenir une solution analytique pour le projecteur, on se ramène à un système à deux degrés de liberté (Figure 31). Pour cela il s'agit de représenter la structure du plancher par un système à un degré de liberté auquel est relié un deuxième système à un degré de liberté représentant la foule de N individus situés sur l'ouvrage dans une configuration identique (par exemple debout et au même niveau d'activité).

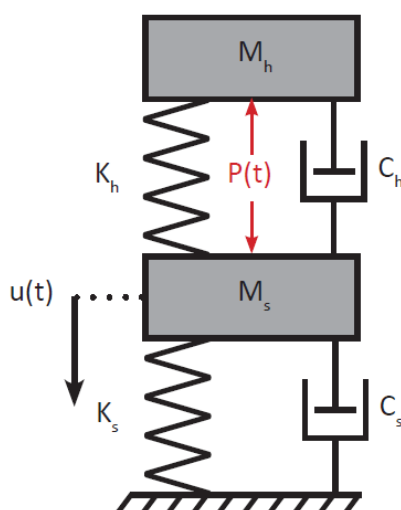


Figure 31 : Principe de modélisation à deux degrés de liberté du système foule-structure

Les paramètres de cette modélisation à deux degrés de libertés s'obtiennent à partir de la modélisation spatiale précédente :

La masse généralisée de la foule M_h :

$$M_h = \sum_{i=1}^N m_{h,i} \psi_i(x, y)^2 \quad (62)$$

La raideur généralisée de la foule K_h :

$$K_h = \omega_h^2 M_h \quad (63)$$

L'amortissement généralisé de la foule C_h :

$$C_h = 2 M_h \omega_h \xi_h \quad (64)$$

La masse généralisée de la structure M_s :

$$M_s = \iint m(x, y) \psi(x, y)^2 dx dy \quad (65)$$

La raideur généralisée de la structure K_s pour le mode considéré, en général le mode fondamental :

$$K_s = \omega_s^2 M_s \quad (66)$$

L'amortissement généralisé de la structure C_s sur la base de l'hypothèse ou la mesure de ξ_s :

$$C_s = 2 M_s \omega_s \xi_s \quad (67)$$

Et la force généralisée $P(t)$:

$$P(t) = \sum_{i=1}^N p_i(t) \psi_i(x, y) \quad (68)$$

La paire de force $P(t)$ excitant le système s'applique sur la masse représentant la foule et le plancher. Cela ne rend pas la résolution du système aussi évidente que souhaitée mais le principe de modélisation a déjà été testée par Pavic et Reynolds [17] pour la vérification d'une tribune. Ces derniers considèrent alors un système à trois degrés de liberté en se laissant la possibilité de distinguer deux groupes de personnes : une partie de foule active ($p_i(t)$ non nul) et une autre passive ($p_i(t)$ nul), considérée assise. Ce choix de modélisation a été fait pour approcher le comportement réel de tribunes équipées d'assises. Les auteurs avaient alors procédé à une résolution via SIMULINK.

2.2.3 Impact de la réponse de la structure sur l'action de la foule

2.2.3.1 Seuil de perception des vibrations et niveaux de confort

Les individus présentent un seuil de détection des vibrations et des niveaux de confort qui varient selon les personnes et leurs activités. Néanmoins on peut définir des données statistiques qui permettent de décrire des seuils conventionnels pour des individus ressentant la vibration sur un plancher où se situe l'excitation. Il ressort que des vibrations verticales de l'ordre de $0,005 \text{ m/s}^2$ peuvent être détectées (valeur rms soit $0,007 \text{ m/s}^2$ au pic pour une vibration sinusoïdale). Au-delà, on peut établir des valeurs de seuils de confort qui varient selon les référentiels (Tableau 15).

Guides	Indétecté	m/s^2	Confort	m/s^2	Perturbant	m/s^2	Inconfort	m/s^2	Panique
SCI P354 [13]	<	0,007	<	0,5	<	1,76	<	3,43	<
ISO 10137 [7]		0,007		-		1,41		2,83	
Bachmann [6]		-		0,5		0,98		2,94	
NBC 2005 [9]		-		-		1,76		-	
Moyenne		0,007		0,5		1,5		3	

Tableau 15 : Seuils pic de détection et de conforfs selon les référentiels pour des concerts

2.2.3.2 Réaction des individus et impact sur la synchronisation entre personnes

D'après les seuils de confort identifiés, on pourra observer une modification du comportement des individus et a fortiori de leurs actions selon le niveau de vibration atteint par le plancher.

Une première observation est que l'intensité de la vibration peut perturber l'action de la personne et donc sa capacité à se synchroniser avec les autres membres du groupe, réduisant ainsi l'impact global du groupe. Deuxièmement, on observe des situations de vibrations extrêmes pour lesquelles certains individus (mais pas forcément tous) ressentiront le besoin de s'arrêter de bouger voir de quitter la zone de plancher. Ceci est au premier abord en faveur de la sécurité puisque cela sous-entend une atténuation potentiellement significative des vibrations notamment au saut généralisé de la foule, si d'abord plusieurs personnes s'arrêtent de sauter et ensuite contribuent à l'amortissement en restant en contact avec la zone en vibration. Cependant ce cas extrême peut devenir problématique puisque des mouvements de foule dangereux pour la sécurité des personnes peuvent être induits suivant la configuration d'évacuation des lieux.

L'interaction de la structure sur la foule est très rarement intégrée dans les modèles de calcul de saut car il est jugé que cela a potentiellement peu d'influence [24]. Mais c'est surtout car elle est difficilement quantifiable suivant le type de public, sa sensibilité, ses facultés de jugement (qui peuvent être altérées) et finalement ses intentions.

Les études récentes d'Abraham et al. [34] précisent qu'un individu peut avoir tendance à se synchroniser plus avec la vibration du support qu'avec le signal sonore pour des hautes fréquences de sauts autour de 2,8 Hz. Il serait intéressant d'identifier si le fait que la foule suive la vibration à partir d'une certaine fréquence engendre une meilleure coordination que le fait de suivre le tempo du signal sonore pour un niveau de vibration plus faible. Dans ce cas, cela signifierait que la coordination dépendrait non seulement du nombre de personne mais aussi de la fréquence du signal sonore ainsi que de l'amplitude de vibration ressentie.

2.3 Synthèse des référentiels et corpus normatifs internationaux

La liste de normes et guides usuels du Tableau 16 est non exhaustive mais permet de disposer d'une vision synthétique des recommandations par pays et en les classant dans l'ordre chronologique.

Type	Pays	Année	Désignation	Auteur(s)	Réf.
Guide	Allemagne	1987	Vibrations in structures induced by man and machines	Bachmann Amman	[2]
Guide	Allemagne	1997	Vibration problems in structure / Practical Guidelines	Bachmann	[6]
Norme	Canada	2006	User's Guide - NBC 2005 Structural Commentaries (Part 4 of Division B), Commentary D	CCBFC	[9]
Norme	Etats-Unis	1997	AISC/CISC, Steel Design Guide Series 11. Floor Vibrations Due to Human Activity	AISC/CISC	[35]
Norme	Etats-Unis	1999	ATC Design Guide 1. Minimizing Floor Vibration	ATC	[36]
Guide	Europe	2008	HIVOSS : Contrôle vibratoire des planchers, Document de référence	RFCS	[20]
Guide	Europe	2008	HIVOSS : Vibrations des passerelles piétonnes, Guide de dimensionnement	RFCS	[37]
Guide	Europe	2013	NCCI : Vibrations	Access Steel	[38]
Norme	France	2003	NF EN 1991-1-1 : Eurocode 1 - Actions sur les structures - Partie 1-1, §2.2(3)	AFNOR	[39]
Norme	France	2004	NF P06-111-2 : Annexe nationale à la NF EN 1991-1-1, §2.2(3)	AFNOR	[40]
Guide	France	2006	Passerelles piétonnes - Evaluation du comportement vibratoire sous l'action des piétons	SETRA AFGC	[33]
Règle	France	2007	Arrêté du 5 février 2007	JORF	[12]
Norme	France	2013	NF EN 1993-1-1/NA: Eurocode 3 - Calcul des structures en acier - Partie 1-1, §7.2.3(1)B	AFNOR	[41]
Norme	International	2007	ISO 10137 : Serviceability of buildings and walkways against vibrations	ISO	[7]
Norme	Royaume-Uni	1996	BS 6399 : Part 1; Loading for Buildings, Annexe A	BSI	[18]
Guide	Royaume-Uni	1997	BRE Digest 426 : The response of structures to dynamic crowd loads	BRE	[15]
Guide	Royaume-Uni	2004	BRE Digest 426 : The response of structures to dynamic crowd loads, nouvelle édition	BRE	[8]
Norme	Royaume-Uni	2005	UK National Annex to Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-1: General actions	BSI	[19]
Guide	Royaume-Uni	2008	Dynamic performance requirements for permanent grandstands subject to crowd action	IStructE	[27]
Guide	Royaume-Uni	2009	SCI P354: Design of floors for vibration, a new approach, revised edition	SCI	[13]

Tableau 16 : Inventaire de normes et guides utiles traitant de l'action de la foule

Chapitre 3

Dans ce chapitre, les problématiques générales identifiées dans l'état de l'art sont définies pour préciser les modélisations et donc améliorer la conception des ouvrages. Pour illustrer les enjeux, on propose l'étude d'un cas particulier de plancher élargi destiné à accueillir des manifestations événementielles occasionnelles. Les vérifications aux états limites de service usuelles sont traitées en premier lieu. Puis, la question moins familière de la résistance aux états limites ultimes est abordée. Enfin, on procède à une vérification à la fatigue et une approche de correction dynamique par amortisseur visqueux est proposée. Pour finir, il en découle une analyse critique des enjeux justifiant le développement d'une étude expérimentale.

3 Enjeux généraux de la démarche de recherche

3.1 Enjeux scientifiques

3.1.1 Amortissement intrinsèque de l'ouvrage en fonction de l'amplitude

3.1.1.1 Amortissement propre à l'ouvrage

La caractérisation de l'interaction foule-structure suppose de pouvoir identifier préalablement les caractéristiques modales intrinsèques de l'ouvrage à vide de public. Il s'agit de connaître la fréquence propre, la masse modale et l'amortissement.

Cependant il est à noter que l'amortissement est susceptible de varier suivant l'amplitude et la fréquence de vibration [7]. En effet, si on considère la part d'amortissement liée aux frictions internes, par exemple au niveau des assemblages de charpente métallique, on peut postuler que l'accroissement de l'amplitude de vibration à fréquence donnée puisse augmenter cet amortissement de même que l'accroissement de la fréquence à amplitude donnée. Néanmoins, il s'agit d'être prudent car ce raisonnement n'est pas forcément systématique et aussi simple quel que soit le matériau. L'amortissement d'une structure comprenant du béton armé peut par exemple être affecté par le niveau de fissuration [6].

Il est d'usage dans la caractérisation dynamique des structures d'évaluer l'amortissement à faible amplitude avec des excitateurs relativement légers. En effet, le principal usage de l'amortissement mesuré est d'évaluer le confort associé à la marche. Cela conduit à des valeurs d'amortissement assez faibles plaçant en sécurité du point de vue du respect des critères. Pour des sollicitations plus énergétiques comme le balancement vertical ou le saut, on peut observer des amplitudes plus importantes et potentiellement des amortissements plus élevés.

Si on vérifie les ouvrages avec un amortissement mesuré à amplitude réduite, on peut les surdimensionner, voire conclure à l'impossibilité d'y autoriser un usage de type concert. Il est donc important de connaître l'amortissement pour plusieurs niveaux d'amplitude afin de pouvoir dimensionner correctement en fonction des usages. Il s'agit aussi de pouvoir décorréliser ce qui relève de l'ouvrage d'un point de vue intrinsèque et ce qui relève de l'interaction avec la foule. Pour cela, on associe le niveau d'amplitude de vibration à l'accélération mesurée de l'ouvrage et au confort ressenti. Cela permet de définir l'amortissement en relation avec des cas d'usage pouvant placer les personnes à différents niveaux de confort (Tableau 17).

Amplitude de vibration	Accélération	Confort
Faible	0,5 m/s ²	Limite supérieure de confort
Moyenne	1 m/s ²	Domaine de gêne
Forte	1,5 m/s ²	Début d'inconfort
Très forte	3 m/s ²	Risque de panique

Tableau 17 : Définition des seuils de confort selon l'accélération du support

Pour atteindre des niveaux d'accélération élevés de l'ordre de 3 m/s², il est généralement nécessaire de disposer d'un excitateur mécanique assez puissant. C'est la principale difficulté pour des ouvrages de grande taille. Pour un ouvrage de fréquence propre égale à 5 Hz, l'excitateur doit être capable de provoquer des déplacements pic de l'ordre de 3 mm pour générer une accélération pic de 3 m/s².

3.1.1.2 Amortissement de l'ouvrage équipé d'amortisseurs

Dans le cas où l'amortissement intrinsèque de la structure serait insuffisant, il s'agit de valider le fonctionnement de systèmes complémentaires d'amortisseurs. On propose ici de recourir à des amortisseurs visqueux jugés plus polyvalents que des amortisseurs dynamiques accordés. Un premier aspect consiste à déterminer le seuil de mise en fonctionnement du dispositif. Le deuxième aspect consiste à étudier l'influence sur le comportement dynamique de l'ouvrage. En effet, on peut se demander si la modélisation parfaitement visqueuse est pertinente et donc si cela n'exercerait pas une influence sur la fréquence propre apparente de l'ouvrage. Il est également intéressant d'étudier si l'amortissement du dispositif est conforme aux calculs théoriques étant donné une légère non-linéarité de la loi de comportement force-vitesse. Un élément important est enfin de savoir si l'amortisseur est capable de dissiper l'énergie à forte amplitude sur des temps longs de sollicitation en raison de l'échauffement. Bien que ce genre de dispositif existe et soit employé pour amortir des ouvrages sous sollicitations sismiques, donc sous fortes amplitudes, il faut rappeler que le dispositif fonctionne rarement sur plus de quelques dizaines de secondes. Le fait de considérer des sollicitations particulièrement énergétiques sur plusieurs minutes, voire plusieurs heures, pose la question de la stabilité des caractéristiques de l'amortisseur visqueux dans le temps.

3.1.2 Sensibilité de la sollicitation de la foule en configuration concert

3.1.2.1 Influence du contexte

L'action des personnes est centrale dans le phénomène étudié. C'est la donnée la plus sensible et la plus aléatoire. Elle dépend de nombreux paramètres qui échappent au seul domaine de la mécanique des structures : la bio-mécanique, la sociologie ou la psychologie. Il faut donc bien se garder de trop déshumaniser l'action pour simplifier en la considérant par exemple comme une action stochastique de type vent ou séisme. Une foule dans un concert comporte des individus encouragés par la musique à une certaine excitation qui s'additionne à des phénomènes d'interactions sociales, dont des effets d'entraînement mutuels.

La première donnée d'importance à établir est une distribution statistique musicale basée sur le tempo. Cela permet de connaître la probabilité d'excitation à une fréquence donnée. Certaines tentatives ont déjà été menées mais avec relativement peu de titres et probablement selon des goûts ou connaissances personnelles [21]. Cette distribution statistique doit être construite dans un contexte spatial et temporel identifié. On s'inscrit ainsi dans un contexte global européen et pour des périodes définies par décennies. La distribution des tempos est centrale dans le cas du calcul à la fatigue d'ouvrages régulièrement exposés à des concerts. On peut en effet s'interroger sur la stabilité de cette distribution statistique à travers le temps étant donné l'évolution des genres musicaux. Mais au-delà des modes qui peuvent moduler certaines pratiques, on peut constater qu'un genre musical ne fait en général que se construire sur la base de genres précédents. D'autre part, le but de la musique diffusée dans les boîtes de nuit est généralement d'inciter les gens au mouvement, ce qui induit une correspondance entre le tempo et les aptitudes physiques des individus. Les générations étant morphologiquement relativement stables sur l'échelle de durée de vie de l'ouvrage, on peut supposer un principe de stabilité des fréquences les plus adaptées pour se mouvoir.

Partant d'une distribution statistique de tempos donnée, cela pourrait paraître suffisant pour dimensionner un ouvrage à la fatigue de manière réaliste. Or il est peut-être encore trop sécuritaire de considérer l'excitation comme constante sur toute la durée d'un titre à une fréquence donnée. On peut naturellement penser qu'une musique présente des moments d'intensité musicale variés et donc

un comportement des individus qui s'adapte en fonction de la composition. Pour une fréquence donnée, on peut émettre l'hypothèse d'une variation de l'intensité de l'action sur la durée d'un titre musical. La capacité à estimer la durée des plus hautes excitations sur la durée d'un titre en complément de la distribution fréquentielle permettrait de définir de manière plus réaliste le nombre de cycles d'une étendue de contrainte donnée sur la durée de vie de l'ouvrage.

L'étude se limite pour l'instant à l'influence de la source musicale. Mais on pourrait évaluer à l'avenir bien d'autres paramètres d'influence complémentaires (période de la journée ou de la nuit, lieu...).

3.1.2.2 *Influence de la réponse vibratoire du support sur l'action*

Un paramètre important de l'interaction foule-structure, dans le sens de l'action de la structure sur la foule, est la perception qu'ont les participants du niveau de vibration et l'influence que cela a sur la motricité.

Dans la littérature (Tableau 15), il a été identifié des seuils de vibration marquant statistiquement des plages de ressenti par les individus pour des configurations d'usage similaires à notre configuration de type concert. Cependant, on peut s'interroger sur la potentielle accoutumance à la vibration des individus et donc la dépendance du ressenti à la durée d'exposition ou à l'expérience. On peut imaginer que les individus ayant déjà été confrontés à des vibrations importantes par le passé puissent être moins surpris et donc plus tolérants sans parler de l'état d'esprit induit par l'ambiance générale.

D'autre part, il est également très important de qualifier le niveau d'activité au moment du ressenti. C'est un élément souvent manquant dans les guides. Le contexte général d'usage n'est en effet pas suffisant. On peut avoir dans un concert des individus statiques, en balancement vertical voire en saut. On peut émettre l'hypothèse que la perception sera différente pour un individu suivant la posture et le niveau de contact avec l'ouvrage.

Enfin, pour un niveau de ressenti donné, il s'agit de déterminer l'influence sur la motricité. Il ressort de la littérature (Tableau 15) que la foule est susceptible de fuir la dalle pour des accélérations pics de l'ordre de 3 m/s^2 . Or on peut s'interroger sur la fiabilité de cette affirmation. Si les personnes soumises à ce niveau d'accélération sont statiques ou en contact permanent avec l'ouvrage, on peut éventuellement le comprendre avec plus de 30% de variation de poids ressenti. En revanche, ce constat semble moins évident si la personne est en train de sauter. Cela peut remettre en question l'idée que les individus puissent mettre fin à leur activité passé un certain niveau de vibration.

Dans l'hypothèse où le ressenti n'ait pas d'influence sur le maintien de l'action des individus, on peut également se demander si le niveau de vibration a une influence sur l'action de saut d'un point de vue purement biomécanique. C'est un phénomène rencontré dans des cas extrêmes sur les trampolines par exemple.

3.1.2.3 *Coordination au saut en fonction du nombre de participants*

Il s'agit de définir au préalable ce que l'on entend ici par les termes de groupe et de foule. Un groupe représentera un nombre d'individus conduisant à une densité inférieure à $0,5 \text{ p/m}^2$. Une foule sera le terme employé pour des groupes avec un nombre d'individus supérieur à $0,5 \text{ p/m}^2$. Une foule sera considérée dense à partir de $0,8 \text{ p/m}^2$. La foule sera très dense à partir de 1 p/m^2 . Au-delà de 3 p/m^2 , on considérera la foule comme hyperdense sachant que l'on peut dans certains cas extrêmes atteindre des concentrations localisées jusqu'à 6 p/m^2 .

Typologie	Densité	Nombre pour 40m ²
Groupe / Foule peu dense	$d < 0,5 \text{ p/m}^2$	$N < 20$
Foule dense	$0,5 \text{ p/m}^2 < d < 1 \text{ p/m}^2$	$20 < N < 40$
Foule très dense	$1 \text{ p/m}^2 < d < 3 \text{ p/m}^2$	$40 < N < 120$
Foule hyperdense	$3 \text{ p/m}^2 < d < 6 \text{ p/m}^2$	$120 < N < 240$

Tableau 18 : Définition de la notion de densité de la foule dans le cadre de l'étude

On se place dans le cas d'une foule très dense dans l'esprit de ce que l'on observe pour des concerts usuels hors situations locales sur l'ouvrage. L'objet est d'enrichir les données expérimentales existantes sur la coordination établie jusqu'à 64 personnes simultanément et de faire le lien avec les extrapolations numériques existantes. Il s'agit en particulier de disposer de plus de retours d'expérience pour évaluer la décroissance des trois premières harmoniques de l'excitation globale résultante en fonction du nombre de personnes. Il est souhaitable de faire des tests expérimentaux jusqu'à 100 personnes pour couvrir des typologies de plancher d'environ 40 m² pour des foules très denses.

3.1.3 Evaluation de la contribution des personnes à l'amortissement

Partant du principe que l'amortissement intrinsèque à l'ouvrage a été préalablement identifié en fonction de l'amplitude de vibration, il est alors possible d'évaluer l'amortissement additionnel apporté par un groupe ou une foule de personnes réparties sur l'ouvrage.

Le premier objectif est de disposer de plus de retours expérimentaux sur les amortissements atteignables suivant l'activité. En effet, la posture et le niveau de contact avec l'ouvrage vont changer, ce qui modifie en retour le système couplé foule-structure. Aussi, il est intéressant de quantifier les variations d'amortissement pour un même ouvrage et les mêmes individus suivant qu'ils soient statiques, en marche, en situation de danse, de balancement vertical ou de saut. Il est également intéressant dans le cas du saut d'étudier l'impact sur l'amortissement global juste après interruption de l'action. Cela permettrait de voir comment l'arrêt spontané de la totalité ou d'une partie de foule à des niveaux de vibration très élevés peut amortir l'ouvrage. Cela peut être utile dans l'évaluation des risques en état limite accidentel.

Parallèlement à l'élargissement des données expérimentales, il semble important de développer des modèles analytiques d'application simple permettant d'estimer les amortissements atteignables. D'un point de vue pratique, les ingénieurs de conception procèdent en général par phases de dimensionnement successives en se basant d'abord sur des ordres de grandeur puis éventuellement sur des modélisations plus complexes lorsque cela s'impose pour des raisons d'optimisation. Sans remettre en question la pertinence de modélisations sophistiquées, il est important de disposer d'outils rapides donnant de bons ordres de grandeur.

A l'instar de certains modèles, on propose d'évaluer une modélisation du système foule-structure couplé à deux degrés de liberté. On reviendrait donc à une structure à un degré de liberté équipée d'un amortisseur dynamique accordé (ADA). La différence réside dans le fait que l'ADA constitué par la foule est par nature généralement mal accordé.

3.2 Analyse critique de la démarche pratique d'ingénierie de conception

3.2.1 Présentation du cas d'étude



Figure 32 : Fondation Cartier du Palais Royal vue depuis la place du Palais Royal (© AJN)

Les développements du chapitre 2 ont permis de caractériser en première approche l'action de la foule selon différents niveaux d'activité en tenant compte de l'interaction foule-structure dans des configurations théoriques usuelles. Il est proposé dans ce paragraphe d'étudier et d'illustrer la sensibilité de chaque configuration de sollicitation que ce soit du point du confort, de la résistance à court terme (ou instantanée) mais aussi de la résistance à la fatigue. La fatigue est étudiée en dernière partie car elle fait intervenir dans la vérification toutes les typologies d'excitation dynamique étudiées individuellement au préalable.

Pour illustrer l'étude de sensibilité de manière cohérente, on se basera sur le projet de plateformes mobiles de la Fondation Cartier du Palais Royal (Figure 32) qui ont pour caractéristique de présenter une géométrie et des conditions d'appui simples (Figure 33).

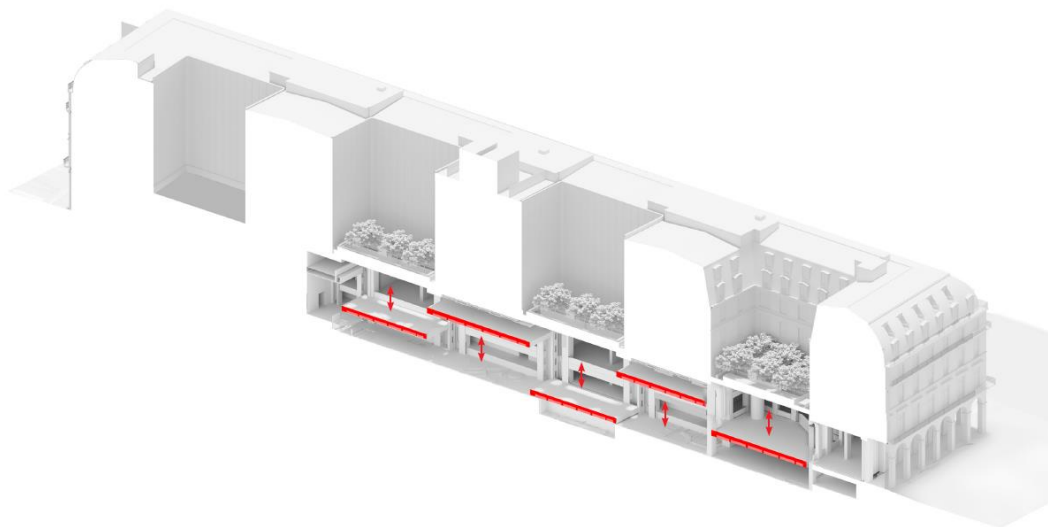


Figure 33 : Ecorché représentant une configuration libre des plateformes (© AJN)

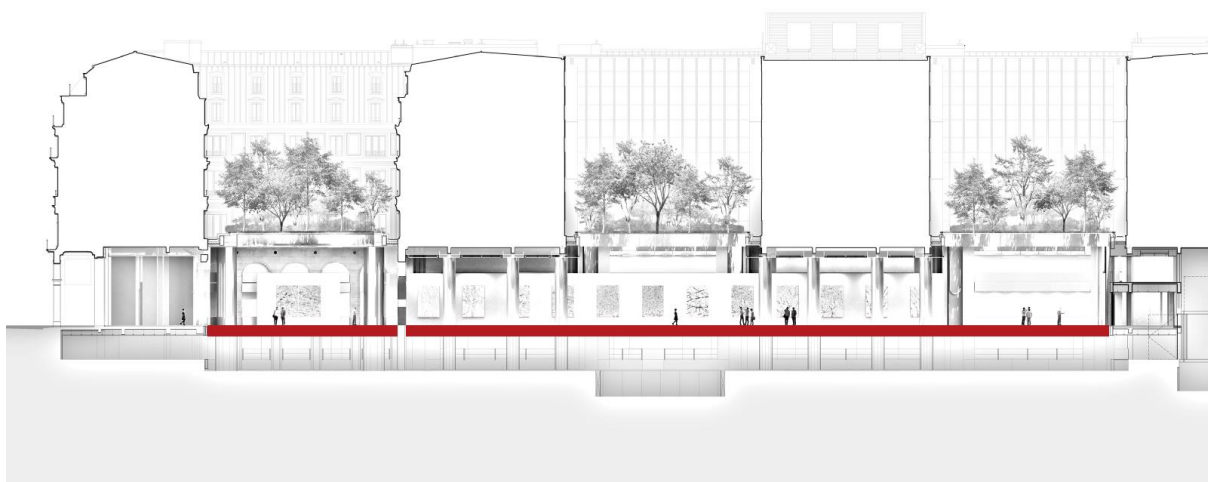


Figure 34 : Exemple de configuration exposition avec des plateformes alignées au RDC (© AJN)

Les plateformes sont des planchers levables par un système de treuils les tractant sur les quatre angles. La configuration de levage explique les conditions d'appui spécifiques en situation verrouillée sur poteaux, à savoir une plaque sur quatre appuis simples et des bords libres. Les planchers peuvent être positionnés verticalement en continuité de 3 niveaux périmétriques existants au R-1, RDC et R+1 mais aussi sur des positions intermédiaires entre les niveaux. Cela génère un grand nombre de configurations possibles auxquelles sont associés des usages multiples : exposition, banquet, cocktails, défilé mais aussi concert. Les deux usages de type défilé et concert ne sont prévus que lorsque les plateformes sont alignées au RDC pour des raisons de sécurité (Figure 34). Dans le programme, la scène est située sur la plateforme 5 et la salle de concert se déploie sur les plateformes 2 à 5, la plateforme 1 servant de vestiaire (Figure 35).

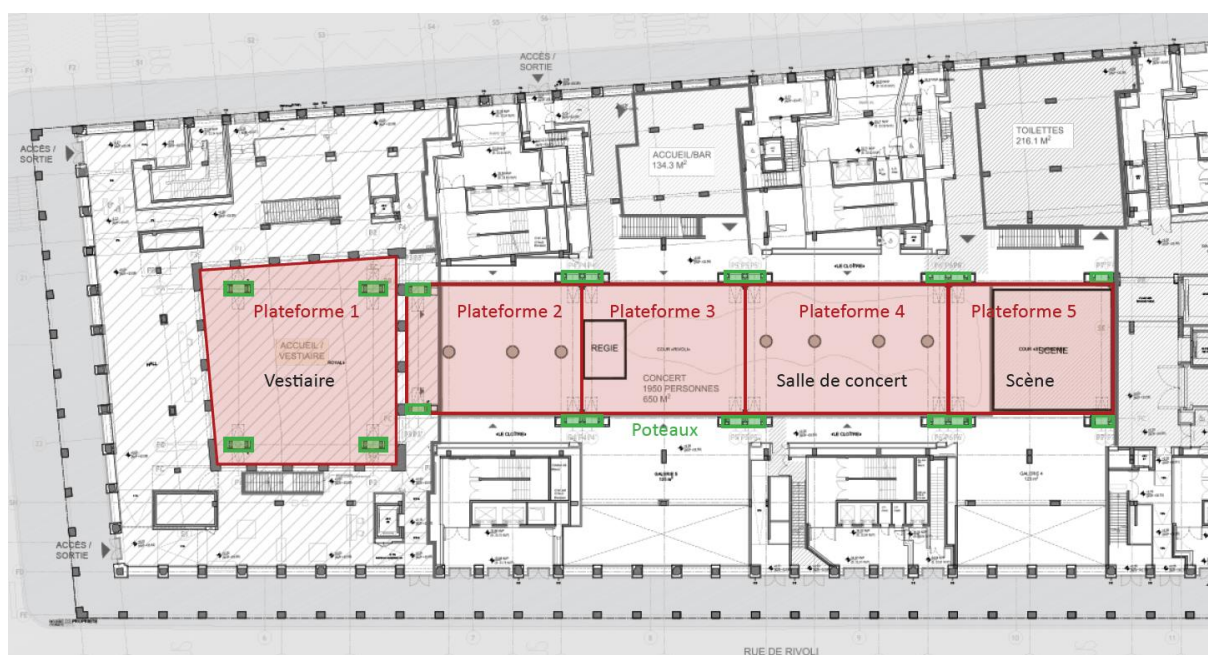


Figure 35 : Configuration du mode concert avec plateformes alignées au RDC (© AJN)

3.2.2 Caractéristiques du plancher type

3.2.2.1 Principes constructifs et modélisation

3.2.2.1.1 Principes constructifs

Les mécanismes et systèmes de levage (treuils, poulies, palonniers d'équilibrage, armoires) sont incorporés dans les plateformes (Figure 36), ce qui a comme conséquence de leur conférer une surcharge permanente.

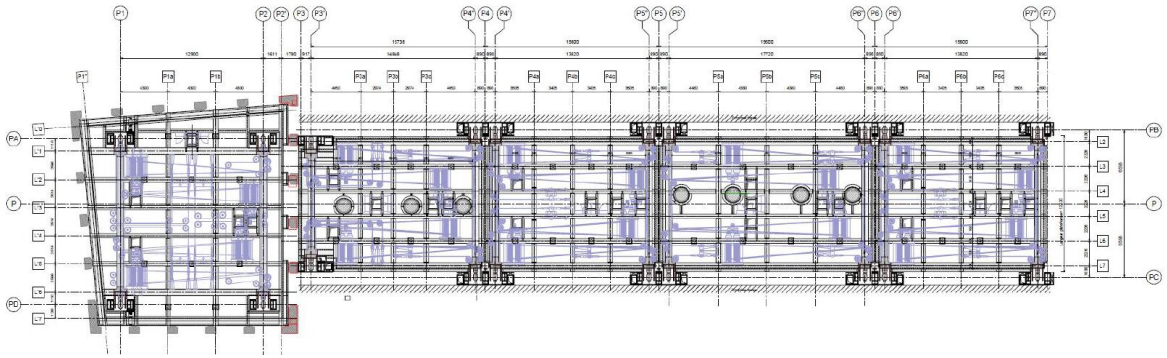


Figure 36 : Plan de synthèse des plateformes avec mécanismes intégrés en bleu (© setec)

Les plateformes, numérotées de 1 à 5 de gauche à droite (Figure 37), sont constituées de poutres métalliques en I de 75 cm de hauteur connectées à un plancher collaborant de 12 cm recouvert d'une chape de 6 cm. Les plateformes 2 à 5 présentent des portées variables entre 15,6 m et 19,5 m dans le sens longitudinal et de 12,2 m dans le sens transversal. La plateforme 1 présente une géométrie particulière par son insertion dans une cour à arcades existantes. Par la suite, on réalisera les analyses uniquement sur la plateforme 4 qui présente la portée entre appuis la plus grande (19,5 m de long pour 12,2 m de large). Celle-ci présente la particularité d'être traversée par 4 poteaux existants soutenant le bâtiment en superstructure sans pour autant qu'il y ait de contact (Figure 38).

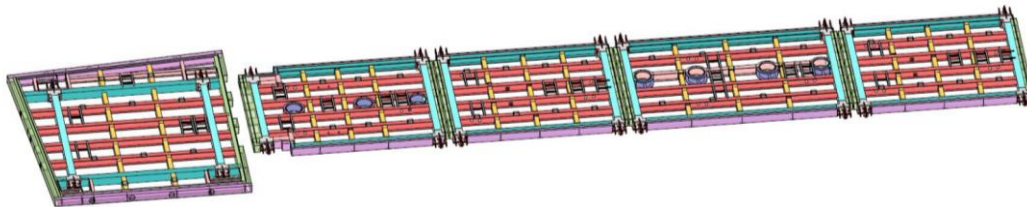


Figure 37 : Axonométrie de la charpente de l'ensemble des plateformes (© setec)

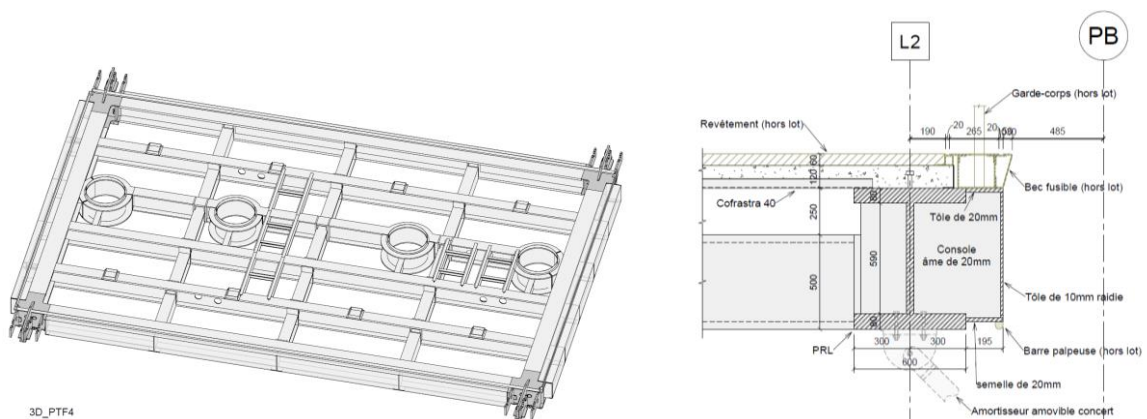


Figure 38 : Axonométrie de la charpente acier de la plateforme 4 et détail de rive (© setec)

3.2.2.1.2 Poids propre du plancher équipé / Masse participante

On donne dans le Tableau 19 une décomposition du poids propre de la plateforme 4 afin d'identifier la part de surcharges permanentes en plus de la charge permanente de structure.

DESCENTE DE CHARGES PLATEFORME		Plateforme 4
	Longueur (m)	19,48
	Largeur (m)	12,22
	Aire (trémies déduites) (m ²)	227,8

G - Charges Permanentes			Plateforme 4		
			DDC		
N°	Cas	Descriptif	P _{tot} (kN)	p (daN/m ²)	p (daN/m ²)
1	G _{acier,str}	Poids propre charpente acier	1 128	495	819
2	G _{acier,mec}	Poids propre des pièces d'angles	112	49	
3 _a	G _{dalle}	Poids propre du platelage	625	274	
3 _b	G _{dalle,+}	Surplus de béton à prévoir selon phasage	143	63	63
4	G' _{mot,tr}	Treuil et châssis de fixation	227	99	204
5	G' _{mot,pov}	Bloc poulies, verrouillages, guidages	149	65	
6	G' _{mot,por}	Poulies et palonniers de répartition	90	39	
7	G' _{éq,fp}	Faux-plafond & scénographie fixe	114	50	210
8	G' _{éq,gc}	Garde-corps	45	20	
9 _a	G' _{éq,rev}	Chape de revêtement	320	140	
9 _b	G' _{éq,rev,+}	Chape de revêtement - Surplus	25	11	11
1 à 10	G_{tot}	Poids propre total	2 978	1 307	

Tableau 19 : Décomposition du poids propre de la plateforme 4

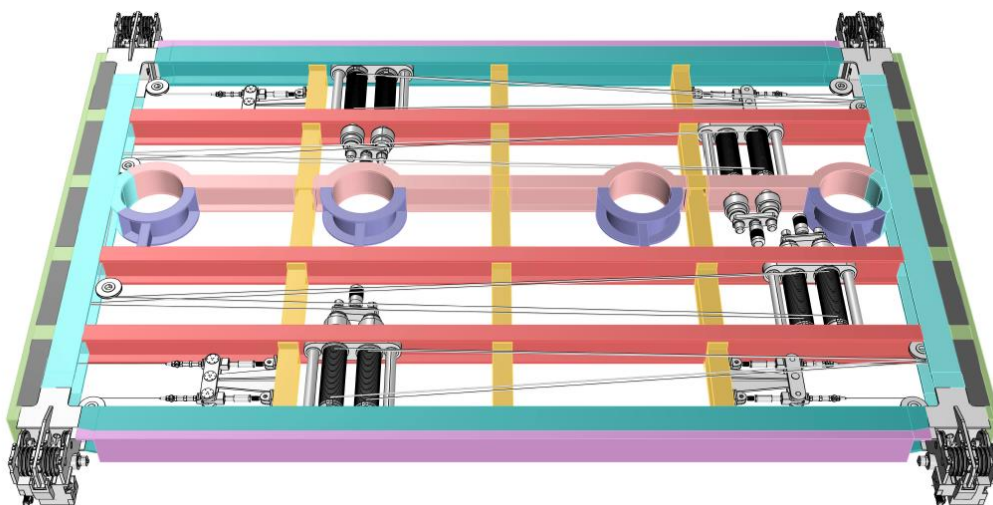


Figure 39 : Vue de la charpente métallique avec le système de levage embarqué

3.2.2.1.3 Modélisation de l'ouvrage / Rigidité

La plateforme 4 est un plancher rectangulaire appuyé verticalement sur 4 appuis élastomères autorisant les déplacements dans les deux directions du plan. La plateforme est tenue par deux guides (un point fixe et un point glissant guidé) sur deux poteaux distincts dans l'axe longitudinal (Figure 40).

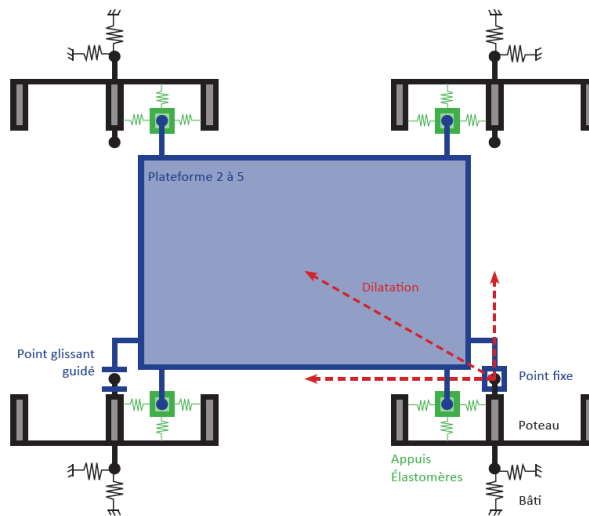


Figure 40 : Schéma statique général des plateformes

La problématique des planchers mixtes consiste à bien définir la modélisation de la connexion de la charpente métallique avec la dalle. Différents modèles sont réalisés selon les besoins des vérifications pour cerner le comportement réel de l'ouvrage avec ses imperfections (glissement, ductilité des connecteurs, fissuration, effet Vierendeel avec les profilés transversaux décollés du platelage...).

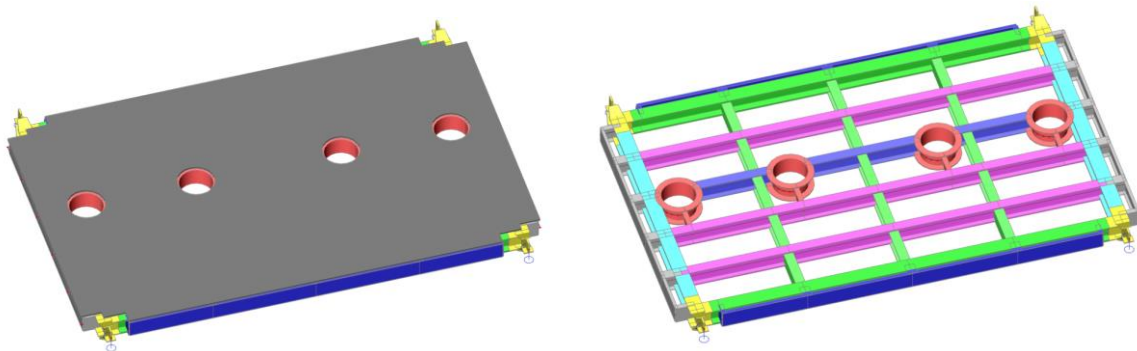


Figure 41 : Modèle type 1 mixte avec dalle 2D modélisée en plaques et poutres filaires

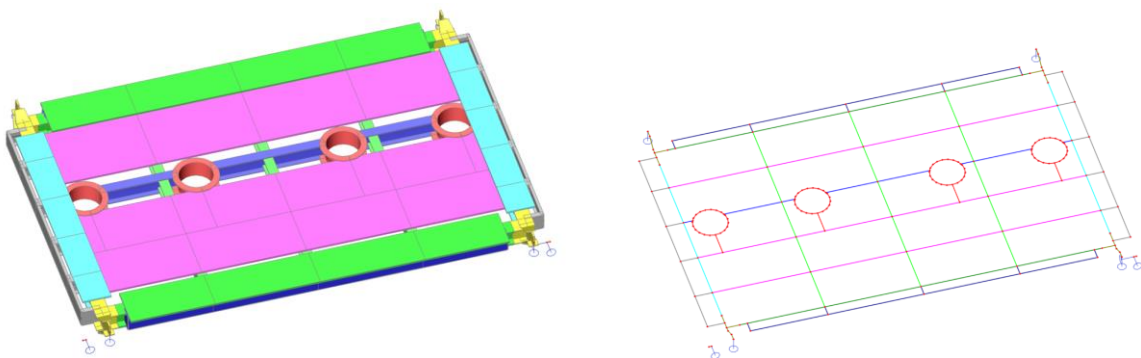


Figure 42 : Modèle type 2 filaire avec section mixte et effet Vierendeel transversal

3.2.2.2 Caractéristiques modales

3.2.2.2.1 Modes propres

Les trois premiers modes propres sont données ci-dessous pour le modèle type 1 qui borne la rigidité réelle par le haut tandis que le modèle type 2 borne par le bas en tenant compte d'un ouvrage équipé à vide avec une simple surcharge additionnelle de scénographie de 100 kg/m^2 . La fréquence propre fondamentale réelle est probablement plus proche du modèle type 1, soit autour de 4 Hz.

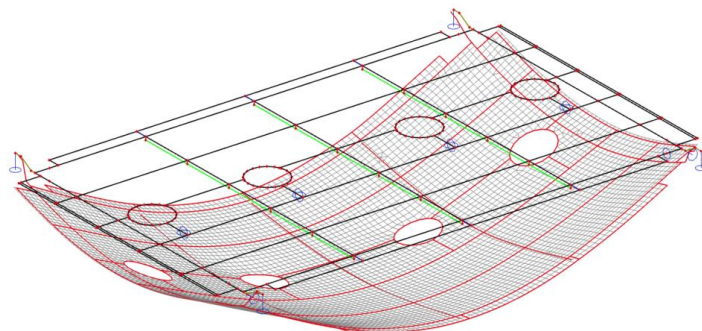


Figure 43 : Mode 1 : Flexion à un ventre (4,06 Hz / Modèle Type 1 - 3,70 Hz / Modèle type 2)

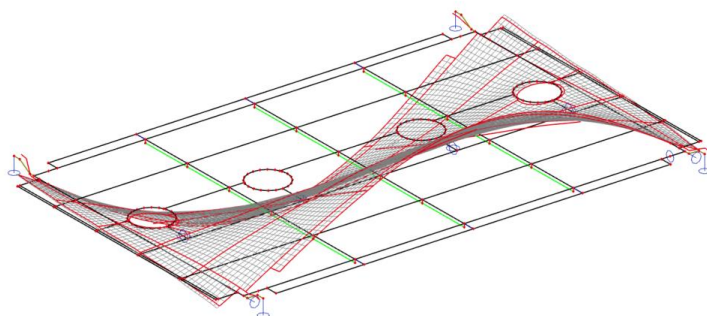


Figure 44 : Mode 2 : Flexion asymétrique des rives longitudinales (5,39 Hz / Modèle type 1)

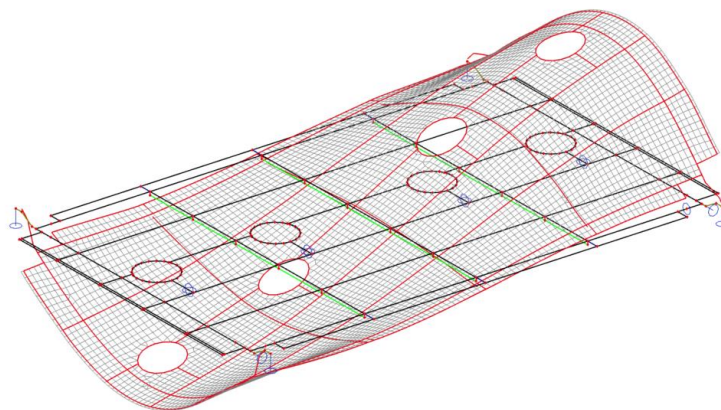


Figure 45 : Mode 3 : Flexion asymétrique des rives transversales (7,44 Hz / Modèle type 1)

3.2.2.2.2 Amortissement

L'amortissement dépend de plusieurs paramètres, notamment :

- Du matériau d'un point de vue intrinsèque (dans notre cas principalement l'acier et le béton).
- Des assemblages (l'amortissement est meilleur si on boulonne au lieu de souder).
- Des éléments secondaires rapportés (garde-corps, faux-plafond, seconde œuvre).
- De la présence de la foule ou non comme on a pu l'aborder précédemment mais en notant que l'on peut être amené à négliger cet effet dans le cas du saut.
- De la fréquence de vibration (ISO 10137 [7] avec la note du tableau B.2 p29).
- De l'amplitude de vibration (ISO 10137 [7], guide du SETRA [33] et guide HIVOSS [37]).

L'amortissement étant un paramètre difficilement maîtrisable en amont de tests de la structure étudiée, il s'agit de raisonner avec des valeurs prudentes basées sur les retours d'expérience.

Amortissement structurel

On effectue une étude bibliographique (Tableau 20 et Tableau 21) se concentrant uniquement sur les retours d'expérience concernant l'acier et les poutres mixtes acier-béton. On trouvera des données complémentaires pour d'autres matériaux dans les références citées.

Matériau	Source	Ouvrage	Caractéristiques	Min.	Moy.	Max.
Acier	ISO 10137 [7]	Plancher	Dalle béton non connectée	0,6%	1,3%	7,4%
	HIVOSS [37] / SETRA [33]	Passerelle	Acier	0,2%	0,4%	/
	ISO 10137 [7]	Passerelle	Acier avec revêtement	/	0,5%	/
Mixte	ISO 10137 [7]	Plancher	Poutre mixte acier-béton	0,5%	1,8%	8,0%
	HIVOSS [37] / SETRA [33]	Passerelle	Mixte Acier-béton	0,3%	0,6%	/
	ISO 10137 [7]	Passerelle	Mixte Acier-béton	/	0,6%	/

Tableau 20 : Plages d'amortissement structurel usuelles à faible amplitude

Matériau	Source	Ouvrage	Caractéristiques	Min.	Moy.	Max.
Acier	HIVOSS [37] / SETRA [33]	Passerelle	Assemblages soudés	/	2,0%	/
	HIVOSS [37] / SETRA [33]	Passerelle	Assemblages boulonnés	/	4,0%	/
Béton	HIVOSS [37] / SETRA [33]	Passerelle	Béton armé (non précontraint)	/	5,0%	/

Tableau 21 : Plages d'amortissement structurel à forte amplitude

Sur des planchers mixtes de grande portée de l'ordre de 20 m, on peut estimer l'amortissement à faible amplitude comme étant compris entre 0,3% (approche sécuritaire : plancher à vide sans surcharges additionnelles) et 0,6% (approche courante). A forte amplitude, on ne dispose pas de valeurs très précises pour les sections mixtes et on peut simplement supposer que pour des assemblages boulonnés avec dalle connectée, l'amortissement est compris entre 4% et 5%. Ces valeurs importantes restent néanmoins à confirmer par essais et on verra sur le prototype qu'elles ne sont pas atteintes.

Amortissement dû au mobilier et aux finitions

La documentation du CTICM [38] donne des ordres de grandeur de l'amortissement dû au mobilier et aux finitions cumulables avec l'amortissement structurel. Un faux-plafond peut représenter jusqu'à 0,5% d'amortissement complémentaire à l'amortissement structurel.

Amortissement dû à la foule

De manière complémentaire à la modélisation de l'interaction évoquée au §2.2.2, on trouve dans la littérature de rares retours d'expérience. Ellis et Ji précisent dans le BRE Digest 2004 [8] (sans donner de référence) qu'un amortissement jusqu'à 16% a pu être déduit de mesures en raison de l'interaction entre la foule en contact et la structure. Reynolds et Pavic [42] ont effectué des mesures sur une tribune de stade dont la partie en console présente un mode propre fondamental à un ventre à 4,6 Hz à vide. D'après les mesures en exploitation pour différents moments d'un match de football, l'amortissement du mode 1 est évalué en tenant compte de l'interaction foule-structure dont on donne les valeurs dans le Tableau 22. Le surplus d'amortissement induit par la présence d'une foule debout et en mouvement est de 2,8% en moyenne par rapport à la structure à vide.

N°	Phase	Moy.- σ	Moy.	Moy.+ σ
1	Tribune vide de spectateurs	2,0%	2,3%	2,5%
2	Arrivée des spectateurs	2,4%	3,6%	4,9%
3	Départ des spectateurs	3,0%	3,3%	3,5%
4	Mi-temps (spectateurs en mouvement)	4,1%	5,1%	> 6
5	Spectateurs assis durant le match	2,9%	4,0%	5,1%
6	Spectateurs debouts suite à un but	/	4,8%	/

Tableau 22 : Ordre de grandeur des amortissements par Reynolds et Pavic [42] lors d'un match

La NBC 2005 [9] précise que pour des planchers béton ou mixte acier-béton un amortissement de 6% peut être obtenu avec une grande densité de personnes. On précise ensuite de retenir 3% avec une moindre densité sans pour autant donner la source bibliographique ni les densités associées.

Amortissements équivalents spécifiques aux salles de danse et de spectacles

Bachmann [6] donne des ordres de grandeur d'amortissement équivalent pour des salles de danse dans lesquelles l'amortissement structural peut être augmenté de manière non négligeable par les contacts des éléments non structurels (Tableau 23). Pour les galeries avec spectateurs ne comprenant pas de mobilier fixe, ce qui peut être le cas pour des planchers similaires aux plateformes, Bachmann recommande de retenir les valeurs du tableau réduites d'un facteur 2/3 sans plus de précisions.

Amortissement usuel de salle de danse	Min.	Moy.	Max.
Acier	0,6%	1,2%	2,0%
Mixte	0,8%	1,6%	2,5%
Béton armé	1,4%	2,5%	3,5%

Tableau 23 : Amortissement usuel des salles de danse selon Bachmann [6]

Hypothèses des amortissements selon les usages en s'appuyant sur la bibliographie

Par suite de l'analyse bibliographique et pour la suite de l'étude de sensibilité on retient en première approche les valeurs d'amortissement du Tableau 24 pour les différentes configurations d'usage.

Activité	Amplitude de vibration	ξ_{min}	Contexte de ξ_{min}	ξ_{max}	Contexte de ξ_{max}
Exposition	Faible	0,3%	Sans œuvres	0,6%	Avec œuvres
Concert danse	Moyenne	1,8%	0,8 personnes/m ²	3,6%	3 personnes/m ²
Concert saut	Forte	4,0%	Acier boulonné	5,0%	Mixité / Faux-plafond

Tableau 24 : Synthèse des amortissements retenus pour le projet de référence

3.2.3 Vérifications de confort et de résistance aux états limites

3.2.3.1 Enjeux et contexte normatif actuel

Vérifications de confort

Les méthodologies de vérification du confort vibratoire ont considérablement été améliorées en France et plus généralement en Europe au début des années 2000 avec la multiplication d'ouvrages élancés de type passerelles mais aussi des planchers présentant des problématiques de vibrations indésirables. Parmi ces guides on compte notamment :

- Le guide du SETRA pour les passerelles de 2006 [33]
- L'ISO 10137 pour les ouvrages de franchissement et les bâtiments de 2007 [7]
- Le guide HIVOSS pour les planchers de 2008 [20]
- Le guide HIVOSS pour les passerelles de 2008 [37]
- La SCI P354 pour les planchers de 2009 [13]

Ces guides permettent d'articuler les diverses recherches effectuées sur les problématiques spécifiques de confort vibratoire.

Vérification en résistance

La procédure de vérification de la résistance structurelle des ouvrages sous sollicitation vibratoire intense est en revanche très peu définie dans les normes actuelles et en particulier les normes françaises. L'Eurocode 1 [39] au paragraphe 2.2 souligne l'importance de la prise en compte des chocs mais aussi des phénomènes de mise en résonance dans la détermination des charges appliquées aux ouvrages. L'annexe nationale de l'EC1 [40] ne donne cependant pas d'indications précises sur la méthodologie à adopter.

Le guide du SETRA [33] consacre un paragraphe liminaire à la problématique de vérification en résistance dans des situations événementielles mais en ne développant pas le spectre de sollicitations possibles. La norme internationale ISO 10137 [7] aborde les actions événementielles de manière plus générale (saut, marche, balancement, etc.) mais limite son champ d'application à des vérifications de service, c'est-à-dire de confort et à la limite de la panique. C'est dans le guide HIVOSS [20] que l'on trouve un renvoi au guide SCI P354 anglo-saxon [13] qui donne plus de détails sur l'approche théorique et pratique de la résistance aux sollicitations dynamiques. Ce guide renvoie lui-même à l'annexe nationale britannique de l'EC1 [19] citant le BRE Digest 426 de 2004 [8] comme guide de référence pour mener d'éventuelles vérifications détaillées si le plancher n'était pas dimensionné pour présenter une fréquence propre fondamentale verticale minimum à vide de 8,4 Hz.

Si l'annexe nationale britannique de l'EC1 [19] demande une fréquence minimale de 8,4 Hz pour échapper à la troisième harmonique et éviter des vérifications plus détaillées, le référentiel de calcul canadien [9] recommande une fréquence minimale de 6 Hz. Il en est de même pour le guide anglo-saxon pour les tribunes [27] qui demande de respecter un minimum de 6 Hz pour échapper uniquement à la résonance jusqu'à la deuxième harmonique en raison d'un risque réduit de synchronisation. L'annexe nationale française de l'EC3 [41] (7.2.3(1)B) est donc moins sévère que les deux référentiels anglo-saxons en demandant une fréquence propre minimum de 5 Hz pour les salles de concert avec 20% de la charge d'exploitation comme masse participante.

A la lumière de ce contexte normatif encore assez peu homogène, une étude de sensibilité basée sur le cas de référence permet d'orienter et d'illustrer les pistes de recherche dans le cadre d'un prototype réalisé en laboratoire.

3.2.3.2 Etats limites de service / Estimation du confort

Afin de se donner une référence usuelle par rapport aux calculs moins courants que sont les vérifications en situation accidentelle, on procède à des vérifications de confort de l'ouvrage en service. Il s'agit de vérifications d'ordre de grandeur reposant sur l'estimation de l'accélération modale maximale à la résonance pour l'harmonique de l'excitation la plus faible possible dans l'esprit du guide du SETRA [33]. L'accélération verticale maximale pic pour la configuration étudiée est calculée selon l'équation suivante :

$$a_{n,h,max} = \max\left(\frac{1}{2\zeta_n} \delta_{n,h} (2\pi f_n)^2\right) ; 1 \leq n \leq 4 \quad (69)$$

ζ_n : Taux d'amortissement critique du mode n

f_n : Fréquence propre du mode n

$\delta_{n,h}$: Déformation verticale statique maximale sous l'amplitude maximale de l'harmonique h de la sollicitation dynamique considérée appliquée selon la forme du mode n

$$\delta_{n,h} = C_h(N) \alpha_h M d \frac{\delta_n}{100} \quad (70)$$

$C_h(N)$: Coefficient de coordination selon l'harmonique h considérée (pour mémoire : $N = dS$)

α_h : Coefficient de Fourier de l'harmonique la plus basse capable d'exciter le mode n à la résonance

M : Masse moyenne d'un individu retenue forfaitairement à 70 kg

d : Densité de la foule dans la configuration considérée

δ_n : Déformation verticale max sous une charge de 100 kg/m² appliquée selon la forme du mode n

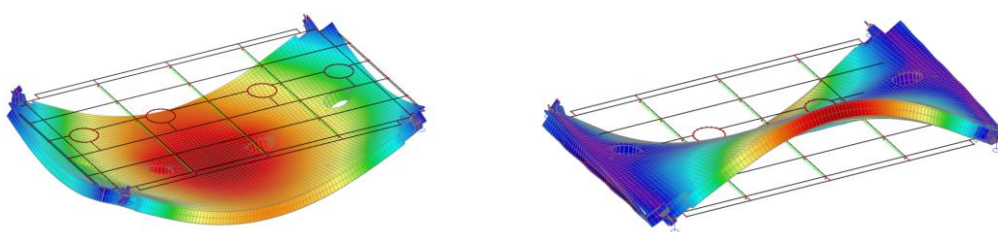


Figure 46 : Allure du mode 1 (gauche) et mode 2 (droite) de la plateforme 4

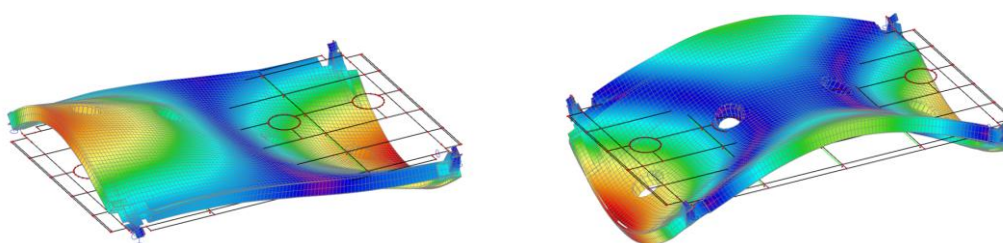


Figure 47 : Allure du mode 3 (gauche) et mode 4 (droite) de la plateforme 4

Outre les vérifications concernant les différentes configurations usuelles type exposition ou défilé, il est intéressant d'étudier les configurations de concert : une première configuration usuelle de concert type bal dit « normal » et une deuxième configuration usuelle type concert rock dite « extrême ». Les coefficients de calcul retenus sont basés sur l'étude bibliographique préalable.

Cas du concert de service dit « normal »



Figure 48 : Configuration type de service en concert dit « normal » (© Tanguendo)

Outre la masse propre de la plateforme, on considère la surcharge participante liée à la présence de la foule mais aussi d'une éventuelle surcharge de scénographie de 100 kg/m^2 . Les hypothèses définissant la nature de l'excitation ainsi que les propriétés des planchers sont données dans le Tableau 25. La référence sur laquelle est basée la valeur de calcul est systématiquement associée.

Fréquence propre minimale exigée	f_{min}	3 Hz	Bachmann [6]
Pourcentage d'amortissement critique	ξ	1,8%	ISO 10137 [7]
Densité réelle de piétons	d	$0,8 \text{ p/m}^2$	ISO 10137 [7]
Nombre équivalent de piétons	N_{eq}	$0,4N$ ou $0,3N$	ISO 10137 [7]
Coefficients de Fourier de la danse	α_1	0,50	Bachmann [6]
	α_2	0,15	Bachmann [6]
	α_3	0,10	Bachmann [6]
Plages d'excitabilité par la danse (h : harmoniques)	h_1	< 3 Hz	Bachmann [6]
	h_2	< 5,6 Hz	SCI P354 [13]
	h_3	< 8,4 Hz	SCI P354 [13]

Tableau 25 : Paramètres de calcul retenus pour le concert normal

Mode	f_n	h	f_p	α_h	ζ_n	M d	$\delta_{n,h}$	$C_h(N)$	$a_{n,max}$	a_{max}	a_{seuil}
n	[Hz]	/	[Hz]	/	/	[kg/m ²]	[mm]	/	[m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]
1	3,97	2	2,0	0,15	0,018	56	1,65	40%	0,96	1,12	1,5
2	5,28	2	2,6	0,15	0,018	56	1,09	40%	1,12	f_0	f_{min}
3	7,29	3	2,4	0,10	0,018	56	0,53	30%	0,52	[Hz]	[Hz]
4	10,32	4	2,6	0,00	0,018	56	/	/	0,00	3,97	3

Tableau 26 : Estimation de l'accélération maximale en mode concert normal

Avec une coordination retenue à 40% pour la deuxième harmonique et 30% pour la troisième, le confort est considéré comme minimum avec une accélération pic maximale de $1,12 \text{ m/s}^2$. On se situe juste en dessous du critère d'inconfort moyen du Tableau 15.

Cas du concert de service dit « extrême »

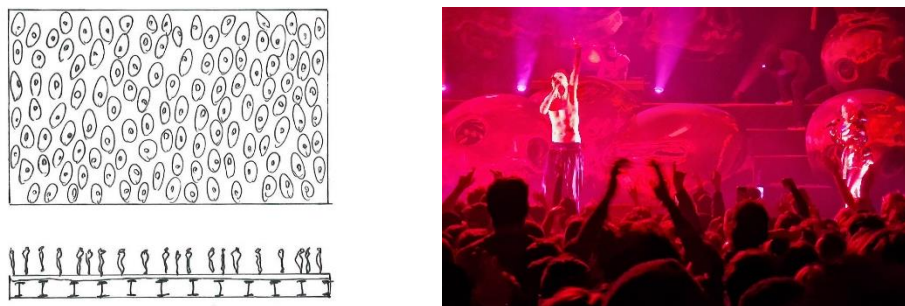


Figure 49 : Configuration type de service en concert dit « extrême » (© V.Baumann)

De la même manière, outre la masse propre de la plateforme, on considère la surcharge participante liée à la présence de la foule mais aussi d'une éventuelle surcharge de scénographie de 100 kg/m². Les hypothèses définissant la nature de l'excitation ainsi que les propriétés des plateformes sont données dans le Tableau 27.

Fréquence propre minimale exigée	f_{min}	3 Hz	Bachmann [6]
Pourcentage d'amortissement critique (amplitude forte)	ξ	3,6%	Tableau 24
Densité réelle de piétons	d	3 p/m ²	PC [12]
Nombre équivalent de piétons (seuil de panique)	N_{eq}	0,5N	ISO 10137 [7]
Coefficients de Fourier de la danse	α_1	0,50	Bachmann [6]
	α_2	0,15	Bachmann [6]
	α_3	0,10	Bachmann [6]
Plages d'excitabilité par la danse (h : harmoniques)	h_1	< 3 Hz	Bachmann [6]
	h_2	< 5,6 Hz	SCI P354 [13]
	h_3	< 8,4 Hz	SCI P354 [13]

Tableau 27 : Paramètres de calcul retenus pour le concert extrême

Mode	f_n	h	f_p	α_h	ζ_n	M d	$\delta_{n,h}$	$C_h(N)$	$a_{n,max}$	a_{max}	a_{seuil}
n	[Hz]	/	[Hz]	/	/	[kg/m ²]	[mm]	/	[m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]
1	3,74	2	1,9	0,15	0,036	210	1,65	50%	1,99	2,36	3
2	5,01	2	2,5	0,15	0,036	210	1,09	50%	2,36	f_0	f_{min}
3	6,92	3	2,3	0,10	0,036	210	0,53	50%	1,46	[Hz]	[Hz]
4	9,81	4	2,5	0,00	0,036	210	/	/	0,00	3,74	3

Tableau 28 : Estimation de l'accélération maximale en mode concert extrême

L'accélération maximale est obtenue pour la mise en résonance du mode 2. Dans le cas d'un concert à densité moyenne réglementaire de 3 p/m² et en faisant l'hypothèse d'une coordination de 50% du public dans l'esprit de l'ISO 10137, le niveau d'accélération se rapproche du critère de panique de 3 m/s² du Tableau 15. Les facteurs très sensibles pour la vérification sont l'amortissement, la coordination et de manière plus globale les coefficients de Fourier équivalents à l'action de la foule ramenés à un individu. Il s'agit donc de vérifier par l'expérience la validité de ces paramètres pour des situations de danse ou de balancement.

3.2.3.3 Etats limites accidentels / Vérification de la résistance

On distingue deux niveaux de vérification pour la résistance. Une première vérification dite d'impact qui considère simplement la vérification du plancher (locale ou globale) sous l'action maximale d'impact au saut. On pourra ainsi se référer au §2.1.1.3.

Une deuxième vérification en résistance doit tenir compte de la capacité de la foule à exciter l'ouvrage et à le mettre en résonance comme identifié au §2.2.2 en particulier dans le cas extrême du saut généralisé.

Le fait de placer ces typologies d'excitation en situation accidentelle est basé sur le paragraphe 9.2.2 du BS 6399 [18] qui précise qu'un facteur partiel pour les actions de 1 peut-être retenu par cohérence avec le fait que les charges participantes réelles doivent être prises en compte pour la détermination du chargement. Il est admis dans la littérature (BRE Digest 426 [8] et BS 6399 Annexe A [18]) que l'on puisse se limiter aux 3 premières harmoniques de l'excitation pour des vérifications structurelles. Ceci n'est pas forcément suffisant pour les vérifications de service étant donné que l'on étudie la sensibilité.

Vérification d'impact

Cette vérification est proposée ici pour les éléments de plancher comme les planchers collaborants de courte portée entre solives qui présentent souvent des fréquences propres importantes (donc potentiellement non soumis à résonance ou alors pour des harmoniques très élevées).

Dans notre cas de référence, on considère pour l'exemple un plancher collaborant cofrastra 40 de 120 mm d'épaisseur et de 1,926 m de portée compris largeur d'appui de 50 mm sur les poutres support. Celui-ci est chargé de manière permanente par une chape béton de 6 cm (150 daN/m²) et une sous-charge d'accrochage usuelle en sous-face de l'ordre de 50 daN/m². Il présente donc une fréquence propre supérieure à 21 Hz, donc au-delà de la 6^{ème} harmonique de l'excitation dans l'hypothèse d'un saut potentiel jusqu'à 3,5 Hz. L'hypothèse d'une mise en résonance étant écartée, il s'agit de déterminer la charge maximale d'impact instantanée qui peut être induite sur le plancher.

On retient une densité de personnes de 6 p/m² de manière locale devant la scène. Etant donné la taille réduite du plancher (1,926m x 1m, soit 2 m²), le groupe considéré est d'environ 12 personnes par bande de 1 m² et on retient une coordination au saut parfaite par sécurité ($C_h(N) = 1$). Cela conduit à l'expression suivante de la force exercée par unité de surface par le groupe :

$$f_{moy}(t) = dG_{moy} \left(1 + \sum_{h=1}^H \alpha_h \sin(2\pi h f_p t + \varphi_h) \right) \quad (71)$$

d : Densité de personnes soit ici la densité maximale de 6 p/m² selon le Tableau 4

G_{moy} : Poids moyen des individus pris ici à 70 daN selon le guide du SETRA [33]

f_p : Fréquence de saut des personnes considérée dans ce cas égale à 2 Hz

Activité	Source	h	1	2	3	4	5	6
Saut normal	BRE Digest 426 [8]	α_h	1,80	1,29	0,67	0,16	0,10	0,13
		φ_h	0,52	-0,52	-1,57	-2,62	-0,52	-1,57

Tableau 29 : Paramètres de calcul au saut normal dans le cas d'un individu

On obtient Figure 50 la charge surfacique au saut normal synchronisé localement sur le platelage.

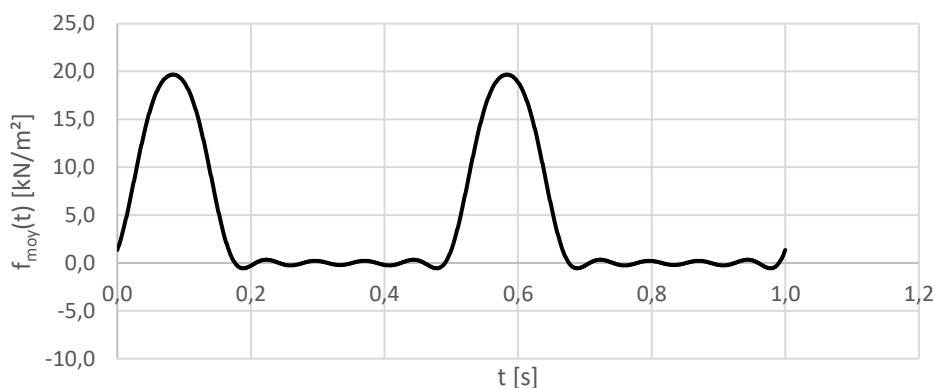


Figure 50 : Charge surfacique d'impact au saut normal pour un groupe synchronisé

La force maximale exercée sur le platelage est donc de 19,7 kN/m², ce qui est nettement supérieur au poids statique équivalent d'une foule dense statique de 6 p/m² représentant 4,2 kN/m².

Il est également intéressant de constater que la charge d'impact accidentelle au saut peut être nettement supérieure à la charge statique ELU du plancher. En effet, considérons la charge statique usuellement utilisée pour les planchers de salle de concert selon l'Eurocode 1 Annexe Nationale Française [40] en catégorie C5, soit 5 kN/m². On obtient au Tableau 30 une charge de dimensionnement ELU d'environ 10 kN/m² sur le platelage (hors poids propre de la dalle).

Charge permanente de la chape	g'_{chape} [kN/m ²]	1,50
Charge permanente de faux plafond	$g'_{faux-plaf}$ [kN/m ²]	0,50
Charge d'exploitation réglementaire (catégorie C5)	q [kN/m ²]	5,0
Charge statique ELU (pour comparaison)	$1,35g'_{tot} + 1,5q$ [kN/m ²]	10,2

Tableau 30 : Charge de dimensionnement statique réglementaire usuelle

Si on calcule ensuite la charge de dimensionnement accidentelle équivalente à l'impact, on obtient une charge globale deux fois supérieure à la charge de dimensionnement réglementaire, ce qui démontre le caractère dimensionnant de la vérification (Tableau 31).

Charge permanente de la chape	g'_{chape} [kN/m ²]	1,50
Charge permanente de faux plafond	$g'_{faux-plaf}$ [kN/m ²]	0,50
Charge maximale locale d'impact de la foule	$f_{moy,max}$ [kN/m ²]	19,7
Charge ELA à supporter par le plancher collaborant	$g'_{tot} + f_{moy,max}$ [kN/m ²]	21,7

Tableau 31 : Charge de dimensionnement dynamique accidentelle

Pour que la vérification ELU couvre le cas accidentel, il faudrait soit considérer une synchronisation au saut normal de 40% soit une densité de foule réduite à 2 p/m², ce qui paraît plus courant mais contredit par les observations locales dans certains cas exceptionnels comme spécifié précédemment au §2.1.2.1. La charge réglementaire de 5 kN/m² prescrite pour le dimensionnement des salles de concert couvre par exemple l'action d'impact liée à un saut (ratio de contact $\alpha = 2/3$) pour une foule de densité moyenne à 3 p/m² selon les données du §2.1.1.3.2.

Vérification en résonance

Pour cette vérification, on cherche à déterminer l'action de la foule sur la structure globale de plancher. La fréquence propre fondamentale du plancher avec une surcharge de scénographie de 100 kg/m² est de 4 Hz environ, ce qui le rend excitable par la seconde harmonique de l'action de la foule. On peut en effet exiger une fréquence fondamentale supérieure à 3,5 Hz par sécurité mais envisager qu'un groupe important ne puisse pas solliciter la structure au-delà de 2,8 Hz. Le domaine d'excitation par la deuxième harmonique serait donc entre 2,8 Hz et 5,6 Hz. On considère une densité moyenne de 3 personnes de 70 kg par m² (cf. ERP type L [12]) excitant la structure à 2 Hz. Cela permet d'obtenir la réponse maximale en résonance à la seconde harmonique.

On retient les coefficients de Fourier du Tableau 10 pour décrire l'action moyenne d'un individu tenant compte de la coordination (Tableau 32).

h	1	2	3	4	5	6
Coeff. de groupe $C_h(N)\alpha_h$	1,40	0,469	0,072	0,0070	0,0024	0,0018
Phase φ_h (pour $\alpha = 0,4$)	0,31	-0,94	-2,20	-0,31	-1,57	-2,83

Tableau 32 : Coefficients de Fourier de l'action de saut avec plus de 400 personnes

On peut ainsi déterminer l'action surfacique de la foule sur la structure (Figure 51) :

$$f_{moy}(t) = dG_{moy} \left(1 + \sum_{h=1}^H C_h(N) \alpha_h \sin(h\omega_p t + \varphi_h) \right) \quad (72)$$

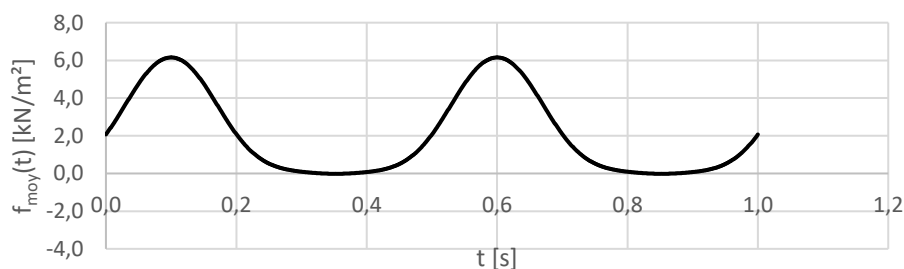


Figure 51 : Action surfacique de la foule sur le plancher

Et l'on peut déduire d'après le §2.2.2.1, l'action surfacique équivalente sur le plancher en vibration en tenant compte de l'interaction foule-structure et avec un amortissement global de 4% (Figure 52) :

$$f_{eq}(t) = dG_{moy} \left(1 + \sum_{h=1}^H C_h(N) \alpha_h A_h^* \sin(2\pi h f_p t + \varphi_h + \theta_h^*) \right) \quad (73)$$

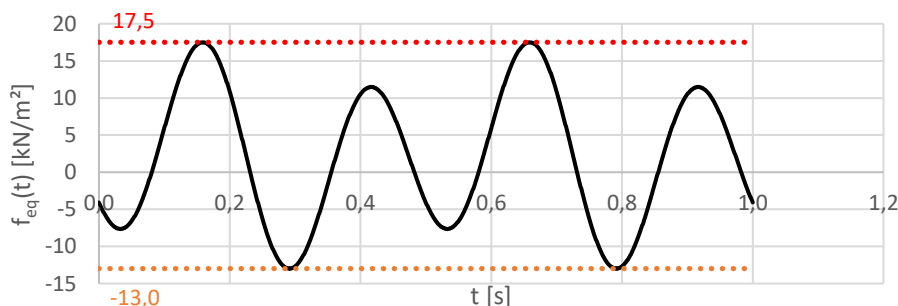


Figure 52 : Charge surfacique équivalente au rappel élastique du plancher en résonance

Selon ces hypothèses, la charge surfacique qui permet de dimensionner la structure en l'appliquant uniformément de manière statique est de 17,5 kN/m² vers le bas et de 13 kN/m² vers le haut. Il faut donc être vigilant à la fois à la charge limite de résistance qui sera définie par l'action vers le bas mais aussi au soulèvement d'appui si le plancher est simplement posé.

Dans notre cas particulier, le plancher est exceptionnellement dimensionné pour supporter une charge d'exploitation statique q de 10 kN/m² en raison de son usage principal d'exposition d'art contemporain. Son poids propre g_{tot} est obtenu par estimation du poids des éléments structurels et des équipements permanents selon le Tableau 19.

Poids propre de la plateforme	g_{tot} [kN/m ²]	13,07
Charges d'exploitation	q [kN/m ²]	10,0
Charge statique ELU	$1,35g_{tot} + 1,5q$ [kN/m ²]	32,6

Tableau 33 : Charge surfacique de dimensionnement statique de la structure de plancher

Sous réserve que les hypothèses de calcul dynamique soient confirmées et notamment l'amortissement, la charge de dimensionnement accidentelle (Tableau 34) est légèrement inférieure à la charge de dimensionnement statique (Tableau 33). Pour ce qui concerne le soulèvement, on constate que l'on est à la limite de la décompression d'appui.

Charge maximale d'impact pour comparaison	$f_{moy,max}$ [kN/m ²]	6,2
Force de rappel élastique maximale vers le haut	$f_{eq,max}$ [kN/m ²]	17,5
Charge d'exploitation de scénographie en mode concert	$q_{scéno}$ [kN/m ²]	1,0
Charge statique équivalente ELA vers le bas (pression)	$g_{tot} + q_{scéno} + f_{eq,max}$	31,6
Force de rappel élastique maximale vers le bas	$f_{eq,min}$ [kN/m ²]	-13,0
Charge statique équivalente ELA vers le haut (soulèvement)	$g_{tot} + f_{eq,min}$	0,08

Tableau 34 : Charges de dimensionnement dynamique de la structure de plancher

On notera également que la valeur de la force d'impact de 6,2 kN/m² est équivalente à 2,95 fois le poids surfacique de 2,1 kN/m² de la foule. La force équivalente liée à la résonance de la structure étant quant à elle 2,82 fois supérieure à la charge d'impact. Ces deux effets réunis, la charge surfacique statique de la foule est multipliée par 8,3 et ceci pour une valeur d'hypothèse d'amortissement non négligeable.

Connaissant la raideur du plancher (16,5 mm au centre de la plateforme pour 10 kN/m² uniformément répartie), on peut estimer les déplacements et les accélérations au ventre du mode 1 (Tableau 35).

Déplacement haut maximal en résonance	$u_{dyn,max+}$ [mm]	21,4
Déplacement bas maximal en résonance	$u_{dyn,max-}$ [mm]	-28,9
Amplitude de vibration	Δu_{dyn} [mm]	50,3
Accélération vers le haut maximale	$a_{dyn,max+}$ [m/s ²]	13,81
Accélération vers le bas maximale	$a_{dyn,max-}$ [m/s ²]	-13,73

Tableau 35 : Déformations et accélérations maximales à la résonance

L'amplitude de vibration est importante en regard de la portée en diagonale du plancher (23 m). L'accélération serait supérieure à l'accélération de la gravité, ce qui rendrait impossible la marche.

3.2.3.4 Conclusions sur le dimensionnement en résistance

La charge d'exploitation de 5 kN/m^2 donnée dans l'EC1 [40] pour les salles de concert ne permet pas de couvrir une situation de mise en résonance globale ni même de simple impact au saut comme rappelé à l'attention du lecteur en préambule de l'EC1 au paragraphe 2.2 [39] : « Il convient de considérer les charges d'exploitation comme des actions quasi-statiques. [...] Les modèles de chargement peuvent inclure des effets dynamiques s'il n'y a pas de risque de résonance ou d'autre réponse dynamique significative de la structure. [...] Si l'on peut s'attendre à des mouvements rythmés et synchronisés de personnes, à des mouvements de danse ou à des sauts, il convient de déterminer le modèle de chargement pour une analyse dynamique particulière. ». On a pu effectivement constater que cette charge peut simplement couvrir des configurations de sautilllements avec une densité moyenne de personnes de 3 p/m^2 .

Aussi, on pourrait penser que les modèles présentés ici sont peut-être sécuritaires par rapport à la réalité. Cela dépend en effet des hypothèses qui sont faites sur l'amortissement, souvent relativement indéterminé sans essais. De plus, cela dépendra toujours aussi de l'intensité réelle de l'excitation et du niveau de coordination que la foule est en mesure d'atteindre. Il demeure donc un caractère aléatoire. Par ailleurs, le caractère rare de structures sujettes à problèmes de confort, voir à des ruines, ne pousse pas forcément certains ingénieurs à développer des réflexes sur ces sujets. C'est le cas en France où les codes sont relativement flous sur cet aspect dans la mesure où la plupart des ouvrages de stade sont des tribunes en béton plus raides et dissipatives que certaines tribunes en acier de grande portée libre que l'on trouvera très souvent au Royaume-Uni.

Hormis les stades, on pourra se référer à certains accidents souvent relégués à la rubrique des faits divers et au cours desquels des planchers ont subi des ruines brutales à la suite de sollicitations événementielles : soirées dans des universités [43], soirées de mariage [44] ou encore discothèques [45]. Dans ces exemples, il est possible que ces planchers n'aient pas été dimensionnés à l'origine de leur construction selon les charges réglementaires quasi-statiques associée aux usages événementiels tels que les 5 kN/m^2 de l'EC1. Les informations sur ces événements sont trop peu documentées par la presse pour identifier la ou les causes précises de la ruine. Mais le calcul d'ordre grandeur précédent permet de montrer que rien que l'impact du saut peut être une cause de la ruine puisque non prise en compte dans les codes actuels à l'exception peut-être des Britanniques via les codes référencés.

La prolifération des réseaux sociaux donne aujourd'hui plus de visibilité et de preuves de l'existence de ces phénomènes souvent mal identifiés y compris par des ingénieurs. C'est le cas de la ruine de la tribune du stade de Nîmègue en 2021 [46] qui n'a fait heureusement aucune victime (Figure 53).



Figure 53 : Effondrement de la tribune du stade de Nîmègue par résonance au saut en 2021 [46]

Pays	Ville	Année	Événement	Incident	Victimes	Réf
Israël	Jérusalem	24/05/2001	Mariage	Effondrement de la piste de danse sur une très grande surface.	23 morts et 309 blessés	[44]
Canada	Abbotsford	26/04/2008	Concert	Effondrement du plancher devant la scène.	40 blessés	[47]
Nouvelle-Zélande	Canterbury	13/07/2012	Concert	Affaissement devant la scène d'un plancher en bois suite au saut d'étudiants lors d'un concert	Pas de blessés	[48]
Etats-Unis	Saint-Louis	15/08/2015	Concert	Effondrement de la fosse pendant un concert dans un bar.	Inconnu	[49]
Espagne	Adeje	26/11/2017	Discothèque	Effondrement de plancher d'une surface d'environ 4m ² .	22 blessés	[45]
Espagne	Vigo	13/08/2018	Concert	Rupture d'une jetée en bois au bord de la mer sous les spectateurs. La mise en résonance n'est pas confirmée.	300 blessés	[50]
Etats-Unis	Clemson	21/10/2018	Soirée	Effondrement de plancher suite à un POGO des étudiants.	30 blessés	[43]
Etats-Unis	Sanford	27/10/2018	Concert	Concert du groupe Upchurch dans un bar de Floride sur un plancher en bois. Le plancher a cassé sous l'action du saut des spectateurs.	Inconnu	[51]
Colombie	Bogota	01/09/2019	Discothèque	Effondrement d'un plancher suite à un POGO dans un bar accueillant 300 personnes pour la soirée.	30 blessés	[52]
Pays-Bas	Nimègue	17/10/2021	Match	Effondrement de tribune suite à POGO des supporters de foot. La mise en résonance est visible avant effondrement.	Pas de blessés	[46]
Australie	Sydney	03/03/2022	Concert	Le plancher s'est affaissé sur une grande surface pendant un concert de Genesis Owusu.	Pas de blessés	[53]
Etats-Unis	Détroit	09/03/2022	Concert	Mise en résonance du plancher pendant un concert de Baby Keem's au Saint Andrew's Hall. Le concert a été interrompu par mesure de sécurité.	Pas de blessés	[54]
France	Paris	21/01/2023	Concert	Effondrement d'un faux-plancher sur fosse de 1m suite à un concert du rappeur NeS dans l'espace de Agora de Radio France.	12 blessés	[55]
Italie	Rome	07/08/2023	Concert	Tremblement de terre au Circus Maximus pour le concert de Travis Scott. Suite à l'événement les concerts sont interdits dans le site archéologique.	Pas de blessés	[56]

Tableau 36 : Inventaire d'incidents liés à des activités événementielles



Figure 54 : Effondrement de la piste de danse d'un mariage, Jérusalem, 2001 [44]

3.2.4 Comportement à la fatigue

3.2.4.1 Enjeu et originalité de l'approche

Le sujet de la résistance sans et avec résonance étant déjà peu traité dans les normes, le sujet de la résistance à la fatigue sous usage événementiel l'est encore moins.

Une mention de cette problématique figure dans le document de référence HIVOSS consacré aux planchers [20] : « Toutefois, lorsqu'un groupe de personnes se livre à une activité rythmique combinée [...] la charge additionnelle provoquée par l'activité peut être supérieure aux charges prises en compte pour le dimensionnement, et elle doit être prise en compte explicitement. Dans les cas extrêmes, elle peut également entraîner des problèmes de fatigue dans la structure ». On ne donne néanmoins aucune méthodologie pratique dans ce document. Une autre mention du sujet peut être trouvée dans les recommandations britanniques pour le dimensionnement des tribunes [27] : « For stadia with frequent use for Scenario 3 and 4 events, the possibility of fatigue damage may need to be considered. The precise use of a stand over time can seldom be anticipated but an initial approximate indication of the potential for fatigue can be based on 20 minutes exposure per concert to Scenario 3 loading. This estimate should be revised as the pattern of use develops over time or in response to observed behaviour. » Une dernière référence à la fatigue peut être trouvée dans la norme canadienne [9] à travers un petit paragraphe illustré par l'usage de salle de sport avec cours d'aérobic.

En conséquence, ce paragraphe propose une définition pratique complète du chargement de fatigue et l'approche pourra être adaptée selon les contextes. Afin d'illustrer la construction du chargement et la procédure de vérification, on s'appuiera sur l'exemple de plancher particulier. Cette application permettra d'estimer le caractère dimensionnant de la fatigue.

3.2.4.2 Cadre normatif de la vérification

Dans le cadre du présent exemple, l'ouvrage étudié est une structure de plancher mixte acier-béton dépendant de l'EC4 [57]. L'EC4 article 6.8.4 renvoie à l'EC1 [39] pour la détermination du chargement de fatigue. Etant donné qu'aucun chargement de fatigue n'est spécifié pour le concert, l'annexe A de l'EC3 partie 1-9 [58] peut être utilisée d'après l'article 2(2) [58].

Conformément au paragraphe A.1 [58] : « Il convient de déterminer, en se basant sur des cas antérieurs similaires, des séquences de chargement types qui puissent être considérées comme enveloppes de tous les événements de charges de service attendus au cours de la durée de vie à la fatigue ».

On note pour mémoire la clause 2(6) de l'EC3 partie 1-9 [58] stipulant :

« Les actions de fatigue sont déterminées conformément aux exigences de la vérification à la fatigue. Elles sont différentes des actions pour les justifications à l'état limite ultime ou à l'état limite de service. » « L'apparition d'une fissure de fatigue au cours de la durée de vie de service ne signifie pas nécessairement la fin de la durée de vie de service. Il convient d'effectuer la réparation d'une fissure avec un soin particulier pour éviter d'introduire des conditions d'entaille plus nocives. »

Etant donné la taille de l'ouvrage et la présence de public en exploitation, les conséquences de la ruine sont considérées comme importantes au sens de l'EC3 partie 1-9 [58]. En fonction du caractère inspectable des détails, on pourra retenir la méthode de la tolérance à l'endommagement (facteur partiel de résistance à la fatigue $\gamma_{Mf} = 1,15$) ou la méthode de la durée de vie sûre ($\gamma_{Mf} = 1,35$). A défaut de l'inspection des détails, on retiendra la méthode de la durée de vie sûre, plus sécuritaire.

3.2.4.3 Définition du chargement cyclique

On définit ici les paramètres nécessaires à la définition d'un chargement cyclique représentant des événements de type concerts énergétiques dans la vie de l'ouvrage.

Durée d'utilisation du projet et fréquence des concerts

On retient une durée d'utilisation de 50 ans pour le calcul conformément à la catégorie 4 du tableau 2.1 de l'ECO [59] pour les structures de bâtiments.

Nombre de concerts par an

Le projet particulier prévoit des concerts occasionnels. Le besoin du maître d'ouvrage pourrait être de savoir combien de concerts il est possible d'organiser sans rupture de fatigue. On considère pour l'exemple et en première approche de réaliser un concert tous les trois mois pendant la durée d'utilisation du projet, soit 4 concerts par an, ce qui est a priori enveloppe de la réalité.

Durée d'un concert et comportement du public

La durée standard d'un concert de type rock est fixée à 3h sur la base des événements courants recensés. On peut décomposer le concert en deux temps :

- Une première partie d'environ 1h pendant laquelle les spectateurs dansent normalement
- Une deuxième partie avec la tête d'affiche d'une durée de 2h

Sur la durée du concert, on retient l'hypothèse d'un comportement de type danse sans saut d'une durée cumulée de 2h. Le public est supposé sauter sur place pendant 1h au total. Cela représente environ 50% du temps de prestation de la tête d'affiche.

Densité moyenne de la foule

On peut imaginer que la densité moyenne d sera proche de 2 p/m² selon la littérature [13] avec des exceptions conduisant à la capacité d'admission, soit 3 p/m² dans le cas particulier [12]. On pourra retenir en première approche la valeur moyenne de 3 p/m² [8].

Distribution des fréquences d'excitation

On tient compte du caractère dispersé des tempos guides de l'excitation selon la Figure 23. Cela permet de représenter une certaine diversité de genre musicaux et d'éviter d'accorder systématiquement l'excitation à la fréquence propre de vibration de l'ouvrage.

Amortissement global

On retient par hypothèse un amortissement de 3,6% en danse et de 4% au saut conformément aux paramètres de synthèse du Tableau 24. Ces amortissements tiennent compte pour la danse de la présence de public en contact avec l'ouvrage jouant le rôle d'amortisseurs, et pour le saut de la forte amplitude de vibrations qui peuvent être engendrées à la résonance. Ce sont bien sûr des valeurs à vérifier par essais.

Détail de la sollicitation liée au saut

On retient le signal de saut avec imperfections de coordination en application du BRE digest 426 de 2004 [8] (Figure 55 et Tableau 37).

h	1	2	3	4	5	6
Coeff. de Fourier pondérés $C_h(N)\alpha_h$	1,40	0,469	0,072	0,0070	0,0024	0,0018
Phases φ_h (ratio de contact $\alpha = 0,4$)	0,31	-0,94	-2,20	-0,31	-1,57	-2,83

Tableau 37 : Coefficients moyens par individu pour le saut en groupe de plus de 400 personnes

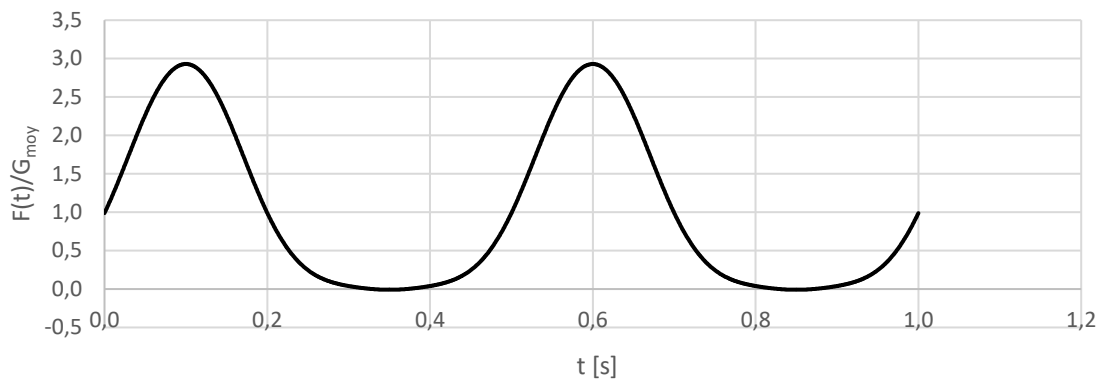


Figure 55 : Sollicitation de saut normalisée moyenne pour un individu de poids G_{moy} à 2 Hz

Détail de la sollicitation liée à la danse

Pour la danse, on retient un ratio de contact avec le sol $\alpha = 1$ [8]. Cela approche les coefficients de Fourier donnés pour la danse par Bachmann [6]. On retient par hypothèse un coefficient de coordination de 80% dans l'esprit de l'ISO 10137 [7] (Tableau 38 et Figure 56).

h	1	2	3	4	5	6
Coeff. de Fourier pondérés $C_h(N)\alpha_h$	0,53	0,11	0,05	0,03	0,02	0,01
Phases φ_h (ratio de contact $\alpha = 1$)	-1,57	-1,57	-1,57	-1,57	-1,57	-1,57

Tableau 38 : Coefficients moyens par individu pour l'action de la danse en groupe

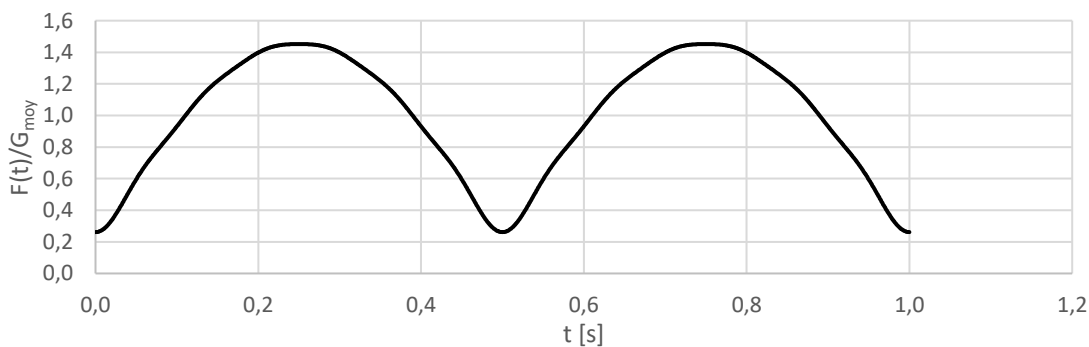


Figure 56 : Sollicitation de danse normalisée moyenne pour un individu dansant à 2 Hz

3.2.4.4 Repérage des détails à étudier

Préalablement à la vérification, il s'agit d'identifier les détails susceptibles d'être particulièrement sollicités. On se réfère pour cela au principe général de vérification à la fatigue sous amplitude constante :

$$D = \frac{n}{N} \quad (74)$$

Avec :

D : L'endommagement à la fatigue du détail

n : Nombre de cycles subits par le détail

N : Durée de vie ou nombre de cycles que le détail est capable de subir avant rupture

On peut montrer (cf. EC3 partie 1-9 [58]) que la durée de vie d'un détail est d'autant plus faible que l'étendue de contrainte $\Delta\sigma$ calculée au droit du détail est importante et que la résistance de référence $\Delta\sigma_c$ à la fatigue du détail donnée dans l'EC3 [58] est faible en tenant compte des effets de dimension k_s :

$$N \propto \left(\frac{\Delta\sigma_c k_s}{\Delta\sigma} \right)^i \quad (75)$$

Les détails conduisant à la durée de vie la plus faible avec ces trois paramètres peuvent être identifiés. La première étape consiste à afficher le niveau de sollicitation général des éléments de l'ouvrage, ici sous une charge arbitraire uniformément répartie de 10 kN/m² (Figure 57). On suppose a priori que les détails ne sont pas inspectables, ce qui induit l'utilisation de la méthode de la durée de vie sûre.

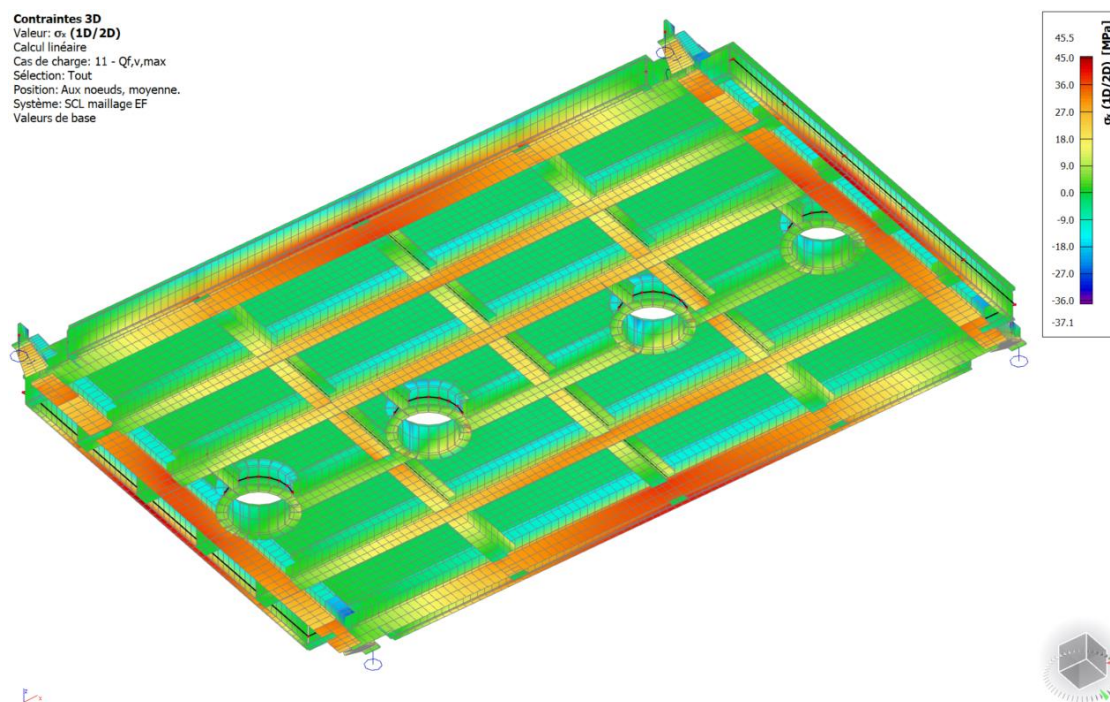


Figure 57 : Contraintes normales dans le modèle type 1 sous charge uniforme de 10 kN/m²

D'après cette cartographie de contraintes, on repère deux zones de forte sollicitation et les détails qui y sont associés : le centre des profilés de rive (détail 1) et les raboutables de pièces d'angle (détail 2).

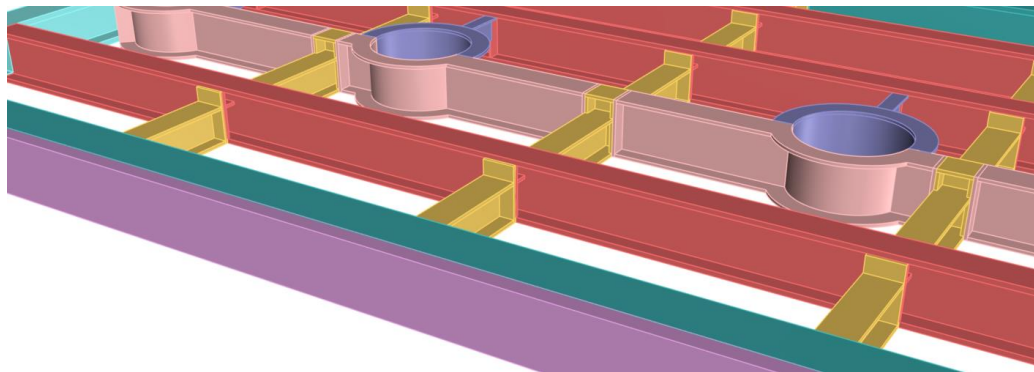


Figure 58 : Détail 1 : Soudure du profilé reconstitué de rive longitudinale (bleu turquoise)

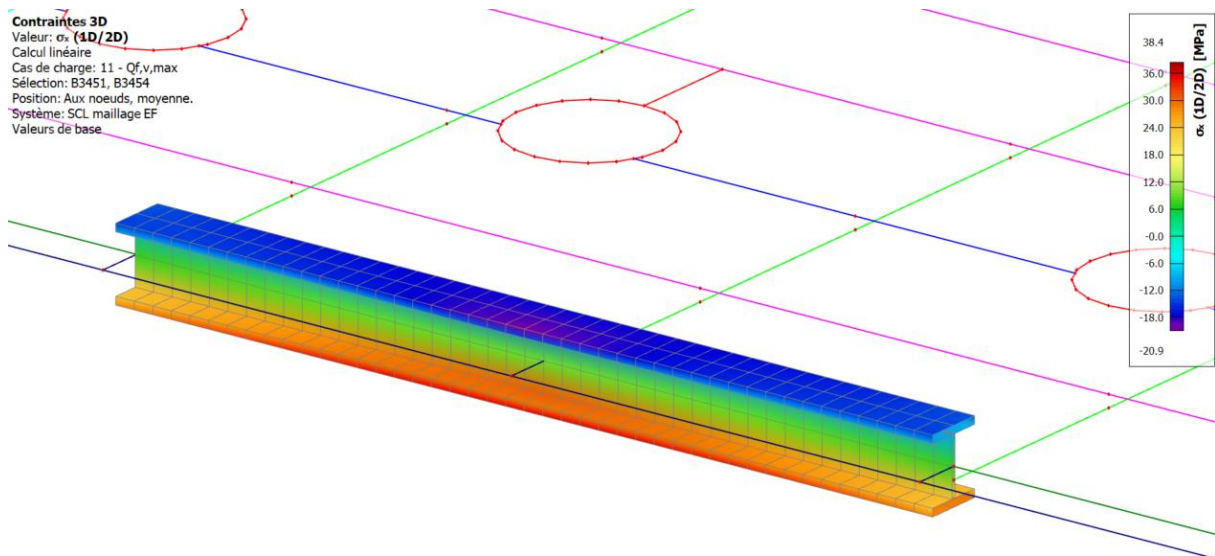


Figure 59 : Contraintes normales dans le profil de rive sous charge uniforme de 10 kN/m²

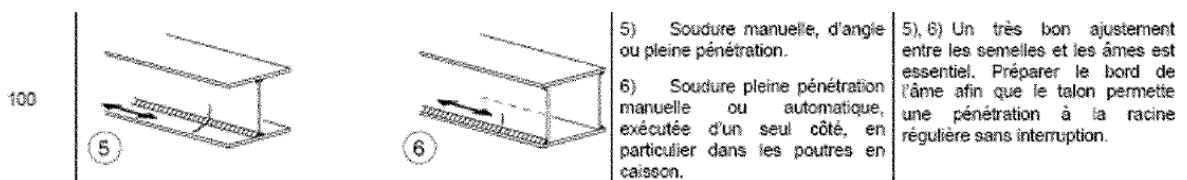


Figure 60 : Catégorie de détail selon l'EC3 partie 1-9 retenue pour la vérification

Le détail de la soudure longitudinale de l'âme et des semelles du profilé reconstitué conduit à l'indicateur de sollicitation à la fatigue suivant :

$$\frac{\Delta\sigma_c k_s}{\Delta\sigma} = \frac{100}{38,4} = 2,6 \quad (76)$$

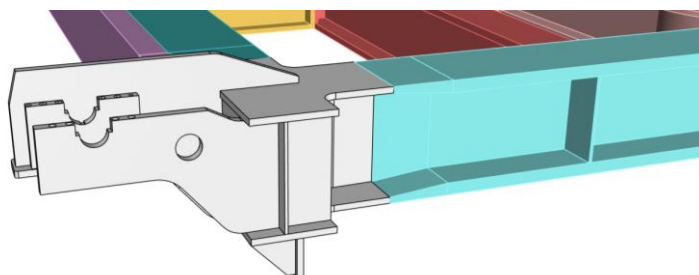


Figure 61 : Détail 2 : Soudure de la pièce d'angle avec la poutre de rive

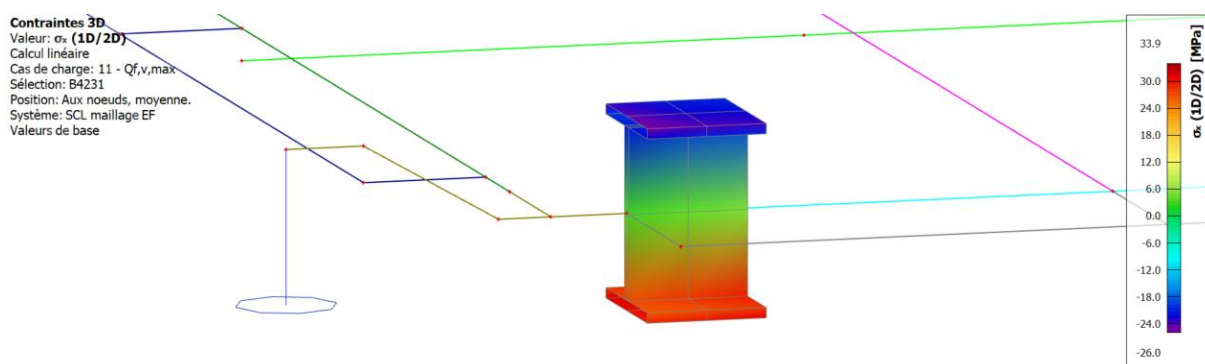


Figure 62 : Contraintes normales au droit de la soudure de la pièce d'angle avec la poutre de rive

<p>80</p> <p>Effet de dimension pour $r > 25\text{mm}$:</p> <p>$k_s = (25/r)^{0.2}$</p>	<p>9</p> <p>10</p>	<p>11</p> <p>$\leq 0.2b$</p>	<p>9) Rabouages transversaux de poutres reconstituées soudées sans trou de souris.</p> <p>10) Rabouages avec pleine pénétration et découpe en trou de souris de sections laminées.</p> <p>11) Rabouages transversaux de plats, larges plats, profils laminés ou poutres reconstituées.</p>	<p>Le bombé ne doit pas excéder 20 % de la largeur du cordon, avec transition douce vers la surface du plat.</p> <p>Soudure non arasée par meulage.</p> <p>Appendices enlevés après soudage, bords arasés par meulage parallèlement à la contrainte.</p> <p>Soudure des deux côtés, à contrôler par CND.</p> <p><u>Détail 10:</u></p> <p>La hauteur du bombé ne doit pas dépasser 10 % de la largeur du cordon, avec une transition douce vers la surface du plat.</p>
---	--------------------	---	--	--

Figure 63 : Catégorie de détail selon l'EC3 partie 1-9 retenue pour la vérification

On obtient l'indicateur de sollicitation suivant :

$$\frac{\Delta\sigma_c k_s}{\Delta\sigma} = \frac{80 \cdot 0,91}{33,9} = 2,15 \tag{77}$$

Le détail de structure primaire le plus sensible à la fatigue est la soudure de rabouage de la pièce d'angle sur le profilé de rive. On ne fera pas de liste de détails plus exhaustive pour l'exemple traité ici et il est à noter que la procédure d'exécution ou le détail lui-même pourront toujours être modifiés en études d'exécution pour améliorer la résistance à la fatigue sans incidence globale sur l'ouvrage.

3.2.4.5 Vérification d'un détail type

On se propose d'étudier la résistance à la fatigue de la soudure de raboutage entre la pièce d'angle et la poutre reconstituée soudée dont on résume ci-après l'ensemble des paramètres de calcul en première approche. Le ratio contrainte/ charge donné ci-dessous permet d'exprimer le rapport entre le chargement surfacique uniforme du plancher et la contrainte induite dans le détail considéré. On notera par ailleurs que la fréquence propre fondamentale de référence est identique pour la danse et le saut. En réalité, la fréquence propre du système vibrant au saut est légèrement plus élevée que celle du système soumis à l'action de la danse. En effet, lors du saut, la foule n'est pas considérée dans la masse participante. Cela est sans grande incidence pour la suite des vérifications mais peut-être implémenté pour des cas particuliers le nécessitant.

Poids propre d'un individu	Guide SETRA [33]	G_{moy} [kN]	0,70
Ratio contrainte/charge	Modèle de calcul	σ/q [MPa/kN/m ²]	3,39
Fréquence propre du mode 1	Modèle de calcul	f_1 [Hz]	4,0
Durée de vie	EC0 [59]	D_A [An]	50
Concerts rock par an	Donnée MOA	$N_{c/an}$ [U]	4
Durée totale de concert	Hypothèse	D_T [h]	3,0
Durée de danse	Hypothèse	D_D [h]	2,0
Durée de saut	Hypothèse	D_S [h]	1,0
Facteur partiel des charges	SCI P354 [13]	γ_{Ff}	1
Facteur partiel de résistance	EC3 Partie 1-9 [58]	γ_{Mf}	1,35
Catégorie de détail	EC3 Partie 1-9 [58]	$\Delta\sigma_c$ [MPa]	80,0
Coefficient de dimension	EC3 Partie 1-9 [58]	k_s	0,91
Catégorie de détail réduite	EC3 Partie 1-9 [58]	$\Delta\sigma_{cred}$ [MPa]	72,8
Limite à amplitude constante	EC3 Partie 1-9 [58]	$\Delta\sigma_D$ [MPa]	53,7
Limite de troncation	EC3 Partie 1-9 [58]	$\Delta\sigma_L$ [MPa]	29,5

Tableau 39 : Paramètres généraux de calcul à la fatigue avec l'Eurocode 3 partie 1-9

		Danse	Saut
Densité de la foule	d [p/m ²]	3,0	3,0
Amortissement	ζ [-]	0,036	0,040
Coefficients de Fourier pondérés	$C_1(N_p) \alpha_1$	0,530	1,400
	$C_2(N_p) \alpha_2$	0,110	0,470
	$C_3(N_p) \alpha_3$	0,050	0,072
	$C_4(N_p) \alpha_4$	0,030	0,007
	$C_5(N_p) \alpha_5$	0,020	0,002
	$C_6(N_p) \alpha_6$	0,010	0,002
Déphasages	φ_1	-1,57	0,31
	φ_2	-1,57	-0,94
	φ_3	-1,57	-2,20
	φ_4	-1,57	-0,31
	φ_5	-1,57	-1,57
	φ_6	-1,57	-2,83

Tableau 40 : Paramètres de la sollicitation de calcul

On se base sur la distribution musicale tous genres confondus tirée de Ginty et al [21]. Etant donné que la foule n'est pas capable de suivre des fréquences trop basses ou trop hautes [21], on retient les fréquences d'excitation de la foule bornées entre 1,2Hz et 2,8Hz.

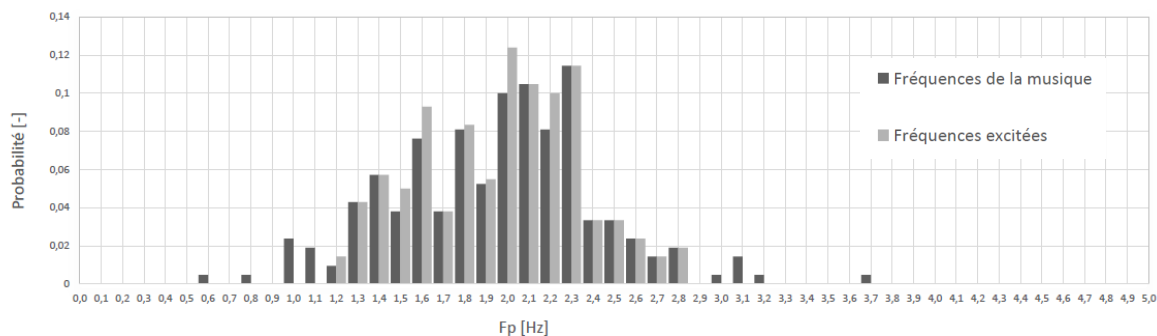


Figure 64 : Distribution de probabilité des fréquences d'excitation (gris clair)

On peut ainsi déduire le temps passé par la foule à sauter ou danser à une certaine fréquence. La probabilité est par exemple de 0,124 de voir une foule exciter l'ouvrage à 2 Hz. A cette fréquence, on en déduit que les personnes sautent pendant environ 7 min 30 et dansent pendant 15 min. Il s'agit également de déterminer la charge surfacique équivalente correspondant à la sollicitation de rappel élastique $f_{eq}(f_p, t)$ de l'ouvrage pour le saut et la danse à partir de la sollicitation $f_{moy}(f_p, t)$:

$$f_{moy}(f_p, t) = dG_{moy} \left(1 + \sum_{h=1}^H C_h(N_p) \alpha_h \sin(2\pi h f_p t + \varphi_h) \right) \quad (78)$$

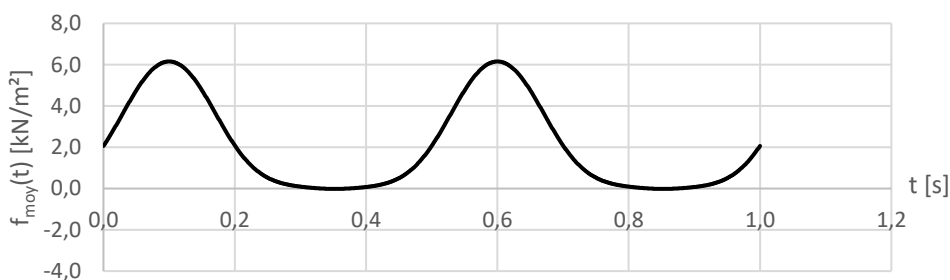


Figure 65 : Sollicitation de la foule pour des sauts à 2 Hz

$$f_{eq}(f_p, t) = dG_{moy} \left(1 + \sum_{h=1}^H C_h(N_p) \alpha_h A_h \sin(2\pi h f_p t + \varphi_h + \theta_h) \right) \quad (79)$$

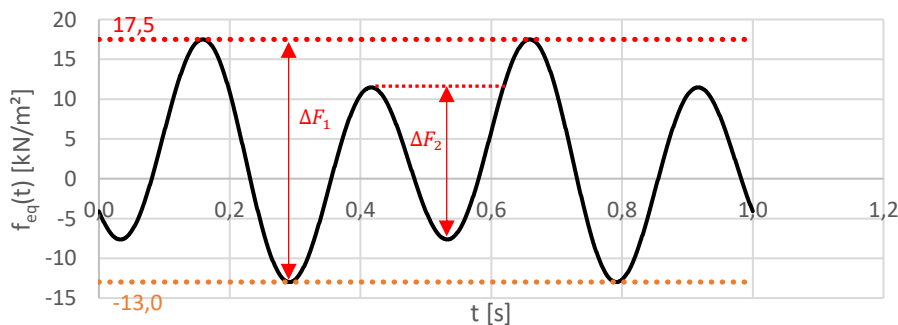


Figure 66 : Charge surfacique équivalente au rappel élastique du plancher pour le saut à 2 Hz

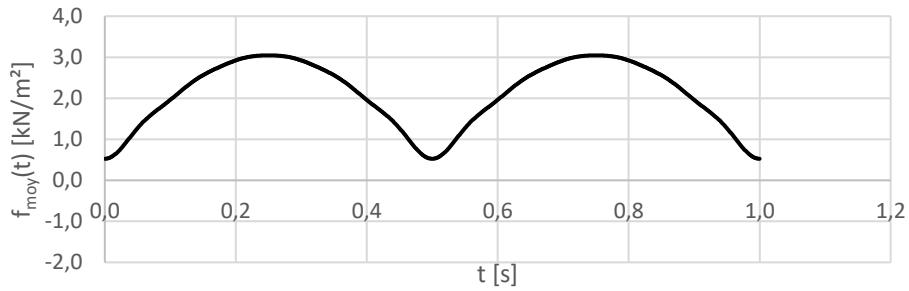


Figure 67 : Sollicitation de la foule pour la danse à 2 Hz

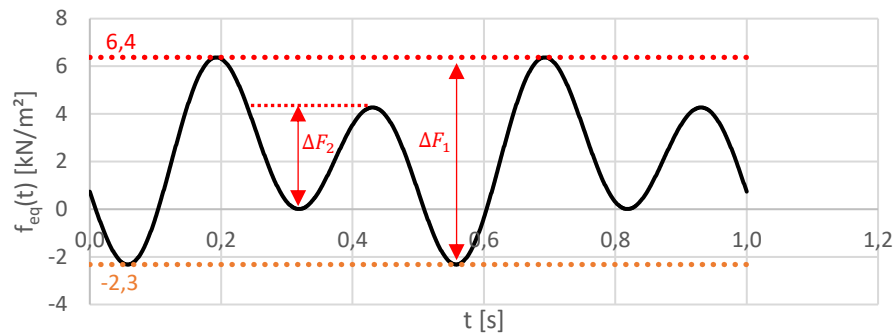


Figure 68 : Charge surfacique équivalente au rappel élastique du plancher pour la danse à 2 Hz

La structure vibrant à 4 Hz pour une sollicitation à 2 Hz, on identifie deux étendues de contraintes par impact au saut avec la méthode du réservoir. La première étendue de contrainte de 103 MPa ($\Delta F_1 = 30,5 \text{ kN/m}^2$), dite primaire, est obtenue par multiplication avec le ratio charge-contrainte (Tableau 39). La deuxième étendue de contrainte, dite secondaire, est de 65 MPa ($\Delta F_2 = 19,1 \text{ kN/m}^2$). On réalise le même exercice pour la danse qui donne une étendue de contrainte primaire de 30 MPa ($\Delta F_1 = 8,7 \text{ kN/m}^2$) et une étendue de contrainte secondaire de 14 MPa ($\Delta F_2 = 4 \text{ kN/m}^2$). Si on réalise ce travail pour l'ensemble des fréquences d'excitation f_p , on obtient le spectre d'étendues de contraintes primaires de la Figure 69.

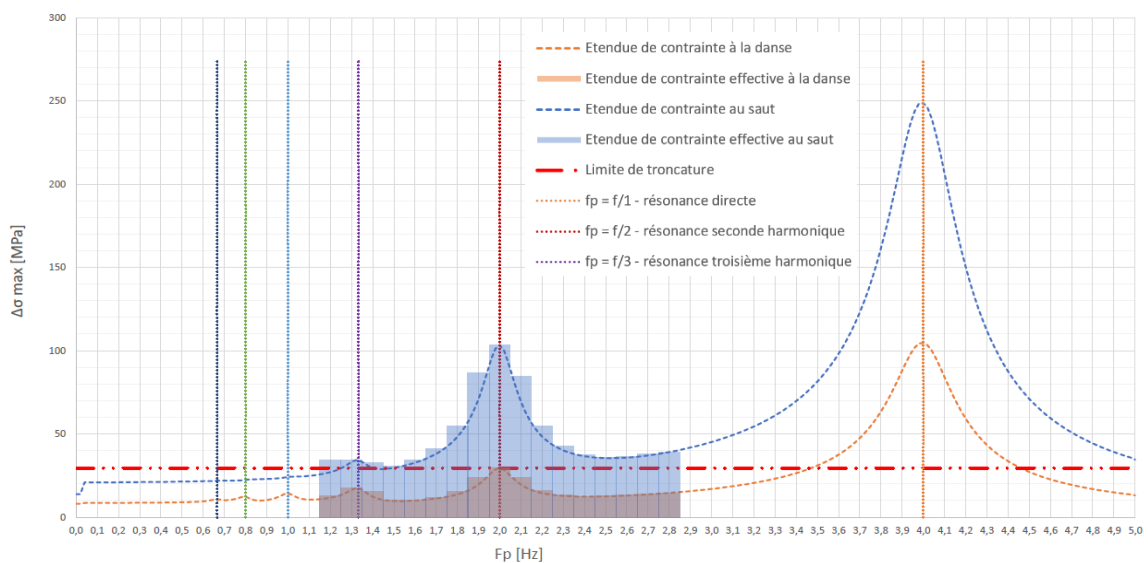


Figure 69 : Etendues de contraintes primaires en fonction de la fréquence d'excitation par la foule

A partir des courbes d'étendues de contraintes se prolongeant hors plage d'excitation pour repérer les pics de résonances, on filtre selon la plage de fréquences d'excitation comprise entre 1,2 Hz et 2,8 Hz. La distribution de fréquences étant discrète, on retient la valeur maximale de l'étendue de contrainte par pas de 0,1 Hz. On obtient ainsi les histogrammes d'étendues de contraintes sur la figure précédente (bleu pour le saut et orange pour la danse).

Connaissant les étendues de contraintes enveloppes par pas de 0,1 Hz, on peut en déduire l'endurance du détail pour chaque fréquence d'excitation en se basant sur la courbe pondérée $\Delta\sigma_c k_s/\gamma_{Mf}$ de l'EC3 partie 1-9 [58] (Figure 70).

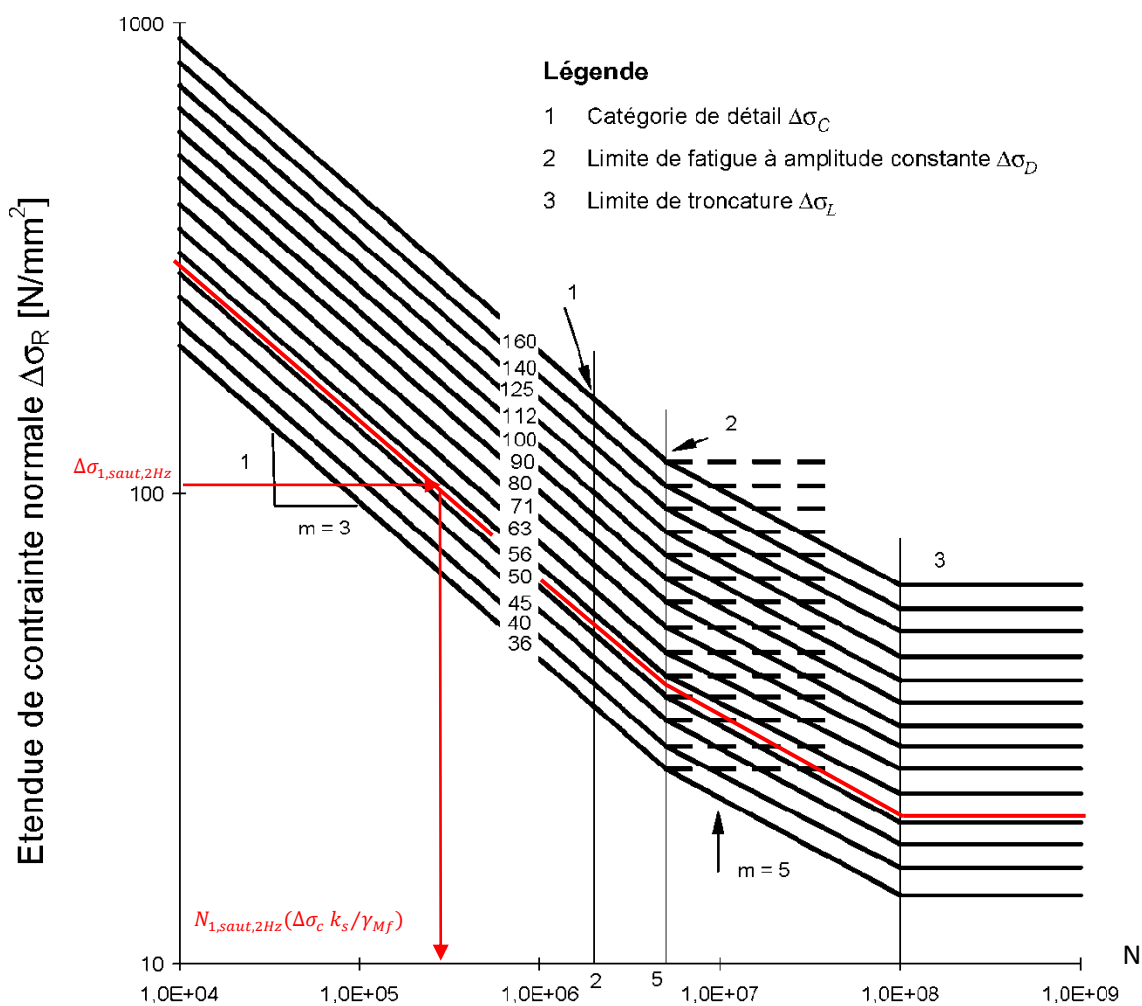


Figure 70 : Courbe EC3 de résistance à la fatigue pour des étendues de contraintes normales

Par exemple, pour l'étendue de contrainte primaire au saut à 2 Hz soit $\Delta\sigma_{1,saut,2Hz} = 103 \text{ Mpa}$, on obtient une endurance de :

$$N_{1,saut,2Hz}(\Delta\sigma_c k_s/\gamma_{Mf}) = 284\,705 \text{ cycles} \quad (80)$$

Revenant à la distribution de fréquences d'excitation et aux hypothèses de 4 concerts par an pendant 50 ans, le nombre de cycles primaires subis par l'ouvrage pour une excitation au saut à 2 Hz durant environ 7 min 30 par concert est de :

$$n_{1,saut,2Hz} = 178\,286 \text{ cycles} \quad (81)$$

Cela revient donc à un endommagement partiel pour le saut de :

$$D_{1,saut,2Hz}(\Delta\sigma_c k_s/\gamma_{Mf}) = \frac{n_{1,saut,2Hz}}{N_{1,saut,2Hz}(\Delta\sigma_c k_s/\gamma_{Mf})} = 0,63 \quad (82)$$

L'endommagement à la résonance par la seconde harmonique est significatif mais il diminue rapidement avec les écarts de fréquence de 0,1 Hz. Si on somme l'ensemble des endommagements partiels par pas de fréquence de 0,1 Hz entre 1,2 Hz et 2,8 Hz, on obtient l'endommagement au saut :

$$D_{1,saut,TOT}(\Delta\sigma_c k_s/\gamma_{Mf}) = \sum \frac{n_{1,saut}}{N_{1,saut}(\Delta\sigma_c k_s/\gamma_{Mf})} = 1,34 \quad (83)$$

Le même exercice avec la danse à 2 Hz conduit à l'endommagement partiel suivant :

$$D_{1,danse,2Hz}(\Delta\sigma_c k_s/\gamma_{Mf}) = \frac{n_{1,danse,2Hz}}{N_{1,danse,2Hz}(\Delta\sigma_c k_s/\gamma_{Mf})} = 0,016 \quad (84)$$

On constate que l'endommagement à la résonance par la danse est négligeable. En calculant l'endommagement total par la danse sur le spectre de fréquence d'excitation, on obtient :

$$D_{1,danse,TOT}(\Delta\sigma_c k_s/\gamma_{Mf}) = \sum \frac{n_{1,danse}}{N_{1,danse}(\Delta\sigma_c k_s/\gamma_{Mf})} = 0,02 \quad (85)$$

L'endommagement total primaire lié aux étendues de contraintes primaires de la danse et du saut pour le détail considéré est donc :

$$D_{1,TOT}(\Delta\sigma_c k_s/\gamma_{Mf}) = 1,36 \quad (86)$$

Il s'agit d'y ajouter l'endommagement lié aux étendues de contraintes secondaires. Pour la danse, ces cycles secondaires sont sans impact dans ce cas car en dessous de la limite de troncature pondérée. Pour le saut, cela génère un endommagement complémentaire à 2 Hz :

$$D_{2,saut,2Hz}(\Delta\sigma_c k_s/\gamma_{Mf}) = \frac{n_{2,saut,2Hz}}{N_{2,saut,2Hz}(\Delta\sigma_c k_s/\gamma_{Mf})} = 0,156 \quad (87)$$

Soit un endommagement secondaire total :

$$D_{2,TOT}(\Delta\sigma_c k_s/\gamma_{Mf}) = 0,18 \quad (88)$$

Finalement, on obtient l'estimation de l'endommagement total avec la méthode de la durée de vie sûre :

$$D_{TOT}(\Delta\sigma_c k_s/\gamma_{Mf}) = D_{1,TOT} + D_{2,TOT} = 1,54 > 1 \quad (89)$$

Le nombre de concerts annuels retenu est donc trop élevé par rapport aux hypothèses de sollicitation.

En effet, la vérification a été réalisée pour des paramètres de concert sécuritaires :

- La méthode de vérification à la durée de vie sûre est plus sécuritaire que la méthode de la tolérance à l'endommagement. Même si l'ouvrage est prévu pour être inspecté annuellement du point de vue des mécanismes, il n'est pas évident que tous les détails de structure soient facilement inspectables une fois l'ouvrage équipé et habillé du second œuvre. Avec la tolérance à l'endommagement, l'endommagement total primaire serait néanmoins de 0,82 (au lieu de 1,36).
- La durée du saut d'une heure est supérieure à la durée recommandée de 20min dans le guide anglo-saxon pour les tribunes [27]. Sous cette hypothèse, l'endommagement total primaire serait de 0,48. Néanmoins on peut postuler que l'excitation de la foule sur un plancher dédié à une activité de danse est peut-être plus longue que sur une tribune.
- La densité de la foule de 3 p/m² est à la limite de la capacité d'admission. Même si des densités locales fortes peuvent être relevées, la littérature [13] suggère une valeur moyenne de 2 p/m². C'est en revanche un paramètre de sensibilité important pour la sollicitation. En effet, avec 2 p/m², l'endommagement primaire se réduirait à une valeur de 0,37. Etant donné la variation induite, il est recommandé de procéder à un suivi des événements au moyen d'un carnet d'exploitation retraçant les concerts et les effectifs admis.
- L'amortissement au saut a été pris en compte avec sa valeur basse de 4% trouvée dans la littérature pour des vibrations de fortes amplitudes [33]. Cette valeur reste néanmoins à confirmer en pratique et à assurer par des mesures conservatoires de correction. Sur la base d'un amortissement de 5%, l'endommagement total primaire serait de 0,96.

On peut résumer la sensibilité de la vérification dans le Tableau 41 en conservant une marge de minimum 10% pour tenir compte de l'endommagement additionnel des cycles secondaires. L'objectif de pouvoir organiser 4 concerts par an est atteignable pour une densité de foule de 2 p/m² ou une durée de saut réduite à confirmer par l'expérience lors de manifestations.

Durée de concert avec risque de saut : 3h (2h30 de danse / 30min de saut généralisé de la foule)						
Contrôles visuels	Usage	ζ	d = 2 p/m ²		d = 3 p/m ²	
		Danse - Saut	$N_{c/an}$	D_1	$N_{c/an}$	D_1
Oui Tolérance à l'endommagement (γ_{Mf} : 1,15)	50 ans	3,6% - 5%	48	0,87	11	0,80
		3,6% - 4%	30	0,82	8	0,83
Non Durée de vie sûre (γ_{Mf} : 1,35)	50 ans	3,6% - 5%	26	0,82	6	0,75
		3,6% - 4%	17	0,79	4	0,70

Durée de concert avec risque de saut : 3h (2h de danse / 1h de saut généralisé de la foule)						
Contrôles visuels	Usage	ζ	d = 2 p/m ²		d = 3 p/m ²	
		Danse - Saut	$N_{c/an}$	D_1	$N_{c/an}$	D_1
Oui Tolérance à l'endommagement (γ_{Mf} : 1,15)	50 ans	3,6% - 5%	22	0,84	5	0,71
		3,6% - 4%	15	0,82	4	0,82
Non Durée de vie sûre (γ_{Mf} : 1,35)	50 ans	3,6% - 5%	12	0,76	3	0,72
		3,6% - 4%	8	0,74	2	0,68

Tableau 41 : Nombre de concerts admissibles par an $N_{c/an}$ et endommagement primaire associé D_1

3.2.4.6 Conclusions sur le dimensionnement à la fatigue

Ce paragraphe permet de préciser la méthode de construction d'un chargement cyclique correspondant au cas type d'un concert susceptible de susciter un comportement énergétique de la foule (rock, pop, dance, rap...) se traduisant par des sauts synchronisés. Les hypothèses de modélisation ont été construites sur des valeurs moyennes tirées de la littérature et fondées sur l'expérience.

La vérification est basée sur l'Eurocode 3 partie 1-9 [58] traitant du comportement à la fatigue des structures métalliques. Des détails tirés de la conception de la plateforme 4 du projet de référence destinée à recevoir des concerts occasionnels servent d'illustration à l'étude de sensibilité.

On observe avec un détail représentatif que la notion de fatigue n'est pas anodine pour des ouvrages pouvant être mis en résonance par le saut à la seconde harmonique de l'excitation. Le saut apporte la majeure partie de l'endommagement, une action de type danse n'apporte en comparaison qu'une contribution minimale mais cela peut dépendre du type de danse considéré.

Pour transposer l'approche à d'autres projets, il faut tenir compte de la spécificité de chaque usage car un concert peut en réalité recouvrir des définitions très variables. L'endommagement étant en relation non linéaire avec l'étendue de la contrainte, une densité de personne plus élevée que la moyenne ou des comportements de foule plus énergétiques qu'à l'habitude peuvent augmenter significativement l'endommagement et donc réduire la durée de vie de l'ouvrage. Aussi, si l'approche est généralisable, il faut toujours adapter les paramètres de calcul retenus et se référer à des situations et tendances d'usages comparables.

3.2.5 Mesures conservatoires de correction du comportement dynamique

Une incertitude demeure toujours en conception sur certains paramètres dynamiques fondamentaux comme l'amortissement. Les planchers aux fréquences propres relativement basses doivent être conçus avec des mesures conservatoires de correction dynamique de sorte à réduire le risque de mise en résonance une fois l'ouvrage réalisé. La spécificité de notre cas d'étude est qu'il s'agit de planchers à usage événementiel occasionnel à l'intérieur d'un bâtiment. Les solutions de correction dynamique ont donc des degrés de pertinence différents dans le contexte d'une salle de concert par rapport à des solutions utilisées usuellement sur des passerelles.

On part de l'hypothèse qu'il soit programmatiquement et/ou économiquement impossible d'augmenter l'épaisseur des ouvrages pour relever les fréquences propres verticales au-delà d'une limite acceptable pour la résistance (8,4 Hz selon le BRE Digest 426 [8]). Il reste néanmoins des solutions alternatives qui permettent de modifier le comportement dynamique de l'ouvrage.

3.2.5.1 Béquilles

La mise en œuvre de béquilles est probablement la mesure conservatoire la plus simple à calculer mais cela suppose qu'il soit possible de les fonder en sous-œuvre. La raideur de l'ouvrage peut être grandement modifiée et sortir de la plage de fréquences excitables. Il s'agit d'une solution pertinente dans le cas de la restructuration d'anciens bâtiments comme cela a pu être envisagé pour une salle d'exposition reconvertie en salle de concert citée par Bachmann dans des études de cas [2]. Cela suppose bien sûr que l'architecte accepte un dédoublement de la trame de porteur verticaux, ce qui n'est pas toujours acquis du point de vue du programme. L'activité étant occasionnelle, on pourrait envisager des béquilles amovibles. Cependant la descente de charge peut donner lieu à des poteaux de grandes dimensions qui ne sont pas faciles à démonter et manœuvrer en raison de leur poids.

3.2.5.2 Amortisseurs dynamiques accordés

Les amortisseurs dynamiques accordés (ADA) sont des dispositifs souvent utilisés pour les passerelles. Néanmoins, cette solution ne présente pas des prédispositions techniques très favorables pour des planchers événementiels.

- On a pu voir précédemment que plusieurs modes de vibrations peuvent être amenés à être corrigés avec des ventres situés à divers endroits. Cela peut nécessiter un nombre important d'ADA disposés pour amortir l'ensemble des modes excitables.
- L'amortisseur est accordé sur une fréquence propre de l'ouvrage. Or celle-ci peut varier avec la masse du public qui de plus est variable spatialement suivant les événements. Dans certains cas, cela peut réduire grandement l'efficacité de la solution.
- Ce sont des dispositifs qui doivent pouvoir être intégrés en sous-face du plancher sans remise en question des gabarits architecturaux (sans mentionner le poids des ADA entre 3% et 5%).
- Le calcul dynamique de ces planchers équipés de plusieurs ADA peut devenir relativement complexe et difficile à maîtriser avant réalisation.
- Enfin, il est souvent oublié que ces dispositifs nécessitent une certaine maintenance.

Bachmann [6] précise d'ailleurs qu'il n'est connu aucun exemple satisfaisant de plancher événementiel avec l'intégration de cette solution au moins jusqu'à la fin des années 1990.

3.2.5.3 Amortisseurs viscoélastiques et visqueux

Les vérifications dynamiques précédentes montrent qu'il est souhaitable d'obtenir un amortissement supérieur à 5% pour limiter la résonance en situation accidentelle, améliorer la résistance à la fatigue mais aussi améliorer le confort vibratoire pour des situations d'usage courant.

La mise en œuvre d'amortisseurs viscoélastiques ou visqueux peut être un moyen très efficace de dissipation de l'énergie étant attendu que l'on puisse les intercaler entre deux points au déplacement relatif suffisamment important de sorte à bénéficier de cette dissipation de manière optimale.

Dans un plancher situé à l'intérieur d'un bâtiment, la solution est envisageable en revenant à l'idée de pouvoir avoir recours à des béquilles amovibles. En effet, si on considère un amortisseur visqueux positionné à mi-portée du plancher et appuyé sur le sol, celui-ci ne transmettra d'effort qu'en cas de mouvement de l'ouvrage puisque la force développée sera proportionnelle à la vitesse. Dans certains cas la vitesse est portée à une certaine puissance comprise entre 0,3 et 1 mais on se limitera ici aux amortisseurs dits linéaires [60]. Cela devient particulièrement intéressant par rapport à l'idée initiale des béquilles rigides amovibles puisque :

- L'intensité des efforts développés peut être limitée par la valeur de l'amortissement et la béquille incorporant l'amortisseur peut potentiellement devenir plus légère et donc amovible.
- La fréquence propre de l'ouvrage est indépendante de la présence de la béquille si elle constitue purement un amortissement additionnel (cela reste à vérifier en pratique).
- L'intensité de la force exercée étant proportionnelle à la vitesse, la force de l'amortisseur est en décalage de phase par rapport aux efforts de rappel élastiques proportionnels à la déformation de l'ouvrage. On évite donc la superposition entre les efforts pics développés.

Par conséquent, suivant le nombre de modes de vibration à amortir, on peut imaginer intégrer des amortisseurs en différents points correspondant aux ventres modaux (ou proches de ces ventres).

C'est ce qui est envisagé dans le cadre du projet de référence de l'étude moyennant l'adaptation aux possibilités d'appui dans le bâtiment existant restructuré (Figure 71).

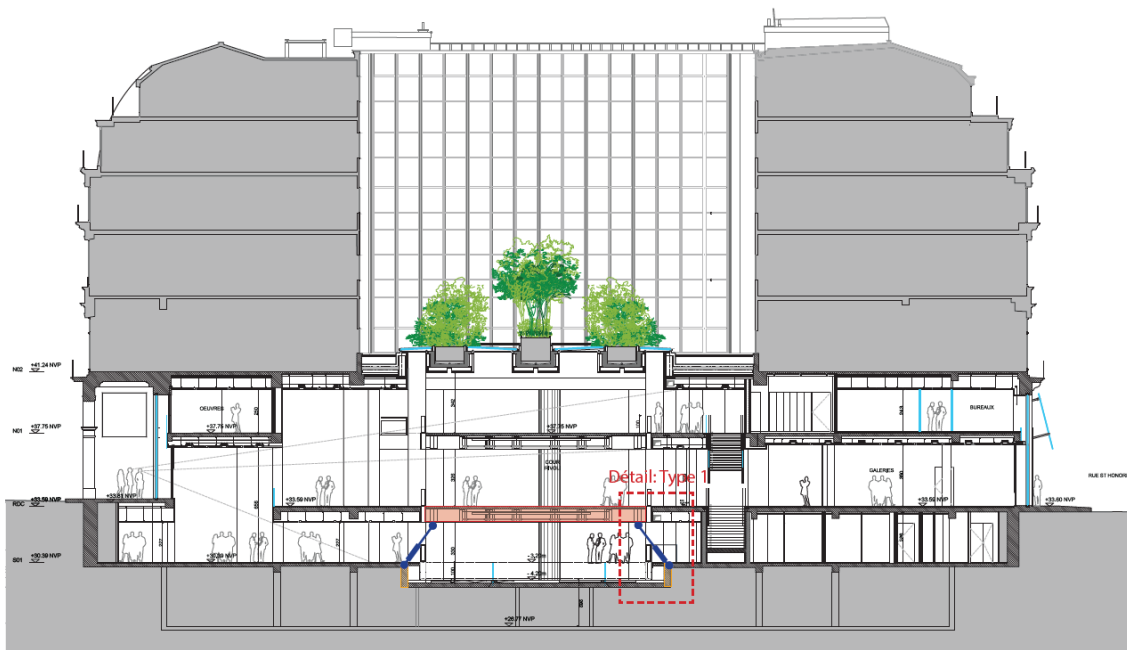


Figure 71 : Amortisseurs visqueux amovibles positionnés sous la plateforme

Sur la plateforme 4 (Figure 72), on prévoit de manière conservatoire deux amortisseurs (orange) permettant d'amortir le mode 1 et le mode 2. Deux amortisseurs complémentaires (vert) permettent d'amortir le mode 3 si cela s'avérait nécessaire.

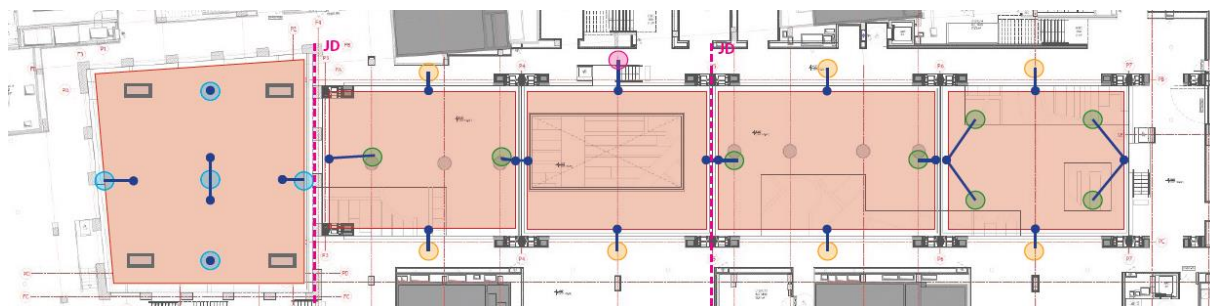


Figure 72 : Implantation conservatoire d'amortisseurs visqueux

Le nombre d'amortisseurs prévisionnels est a priori conséquent mais est sécuritaire. Cela permet de tester sereinement l'ouvrage une fois construit et de valider l'implantation pratique des amortisseurs réellement nécessaires. L'essentiel est de prévoir en conception suffisamment de dispositifs d'appui et de fixation sur l'ouvrage pour limiter les coûts éventuels de renforcement et l'indisponibilité de l'ouvrage. Les amortisseurs peuvent ainsi être fabriqués en usine selon le nombre nécessaire une fois les tests effectués.

DÉTAIL TYPE 1

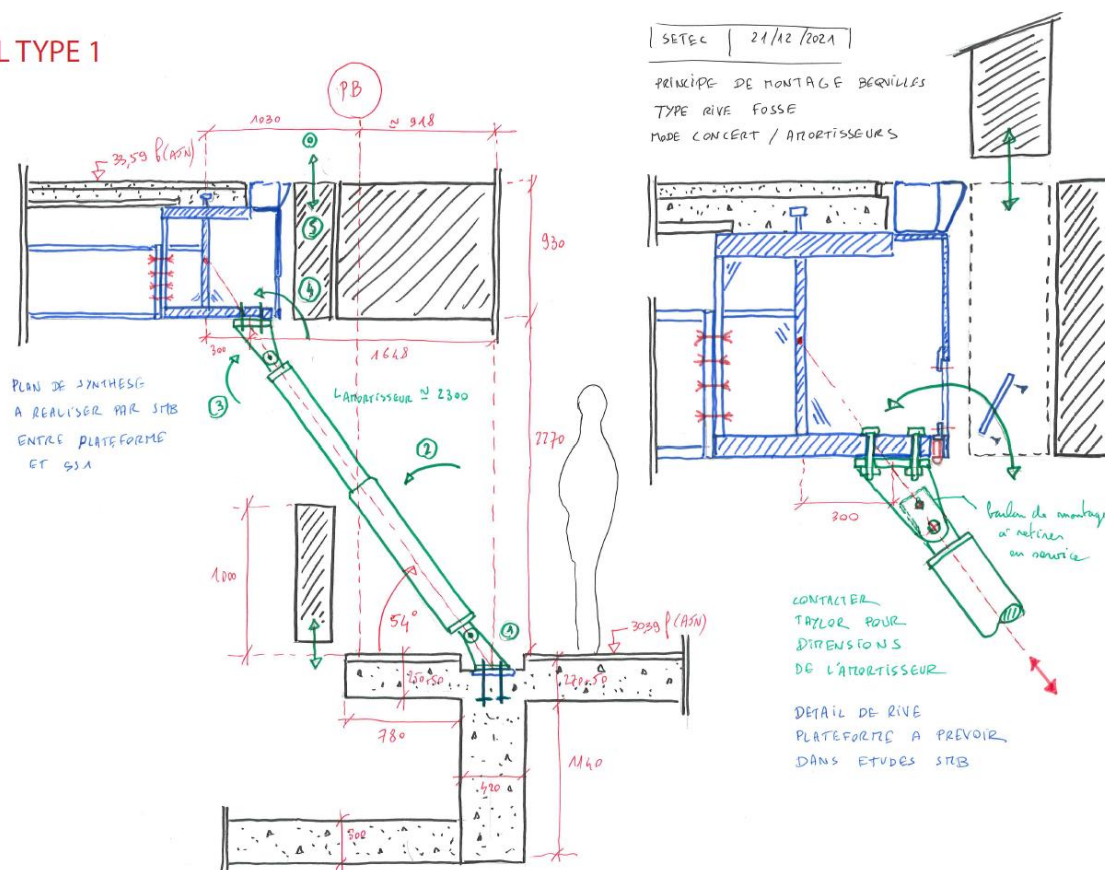


Figure 73 : Principe de détail d'intégration et de fixation d'un amortisseur amovible

Finalement, il est probable de n'avoir qu'à amortir les deux premiers modes de vibration ; le mode 3 étant plus difficile à exciter en pratique et la plateforme 1 n'étant normalement que destinée à accueillir le vestiaire de la salle (Figure 74).

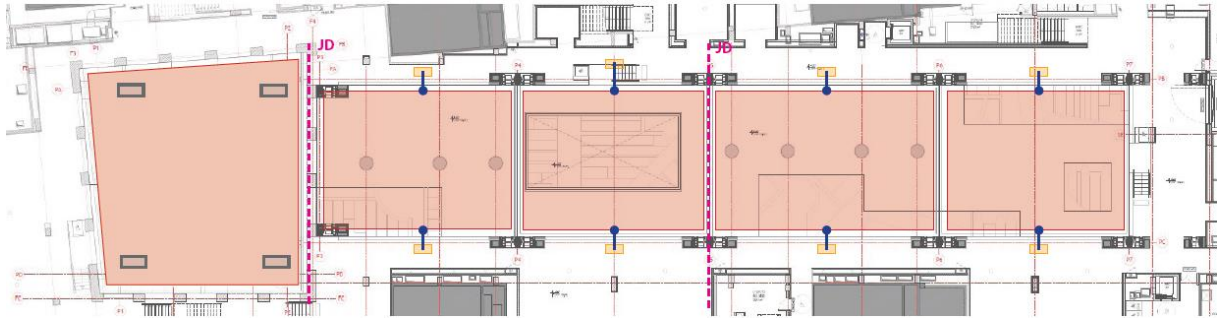


Figure 74 : Implantation pratique probable des amortisseurs si nécessaires

On envisage par exemple d'avoir recours à des amortisseurs dotés d'un amortissement c de 630 000 kg/s en limitant la descente de charge sur l'infrastructure du projet. En prédimensionnement, et suivant la configuration d'installation réduite présentée sur la figure précédente, on peut estimer la contribution des amortisseurs à l'amortissement global mode par mode.

On résume d'abord les caractéristiques dynamiques de base nécessaire à la vérification (Tableau 42). Une donnée complémentaire essentielle pour la vérification est la détermination de la masse généralisée du plancher pour chaque mode. Enfin, on fait l'hypothèse pessimiste que l'amortissement propre aux plateformes est assez faible, de l'ordre de 1% quel que soit l'amplitude de vibration. On suppose donc de manière prudente que l'amplitude de vibration ne conduit pas à un amortissement proche de celui évoqué dans le guide du SETRA [33].

PLATEFORME 4		Mode 1	Mode 2	Mode 3
Fréquence propre mode saut avec scénographie	f [Hz]	4,06	5,39	7,44
Harmonique excitatrice la plus faible	h	2	2	3
Pulsation propre	ω [rad/s]	26	34	47
Surface de la plateforme	S [m ²]	238	238	238
Poids propre total de la plateforme	G_{tot} [kN]	2978	2978	2978
Charge d'exploitation participante	$q_{scéno}$ [kN/m ²]	1	1	1
Masse totale de la plateforme	M [kg]	327 819	327 819	327 819
Masse généralisée du mode	m^* [kg]	141 880	56 713	65 236
Part vibrante de la masse totale	%M	43%	17%	20%
Amortissement propre aux plateformes (hypothèse)	ζ_p [-]	1,0%	1,0%	1,0%

Tableau 42 : Caractéristiques dynamiques de base de l'ouvrage non amorti

Pour chaque mode, il s'agit de définir l'amortissement apporté par l'amortisseur qui dans notre cas est incliné et pas toujours situé au point de déplacement modal maximum, notamment le mode 1. Il faut donc définir le ratio d'efficacité du vérin lié à l'inclinaison et à la position en sous-face du plancher.

Efficacité de l'amortisseur suivant son inclinaison

On cherche à déterminer l'amortissement vertical c_v apporté par l'amortisseur d'amortissement c incliné d'un angle α par rapport à l'horizontale. Pour cela il faut établir la relation entre la vitesse verticale de la structure au point de fixation v_v et la vitesse de déplacement axial v du piston incliné. On peut établir géométriquement que pour de petits déplacements la variation de longueur de l'amortisseur est liée simplement au déplacement vertical du point de fixation en fonction de α :

$$dl \approx \sin(\alpha) dz \quad (90)$$

En se ramenant à la vitesse instantanée :

$$v \approx \sin(\alpha) v_v \quad (91)$$

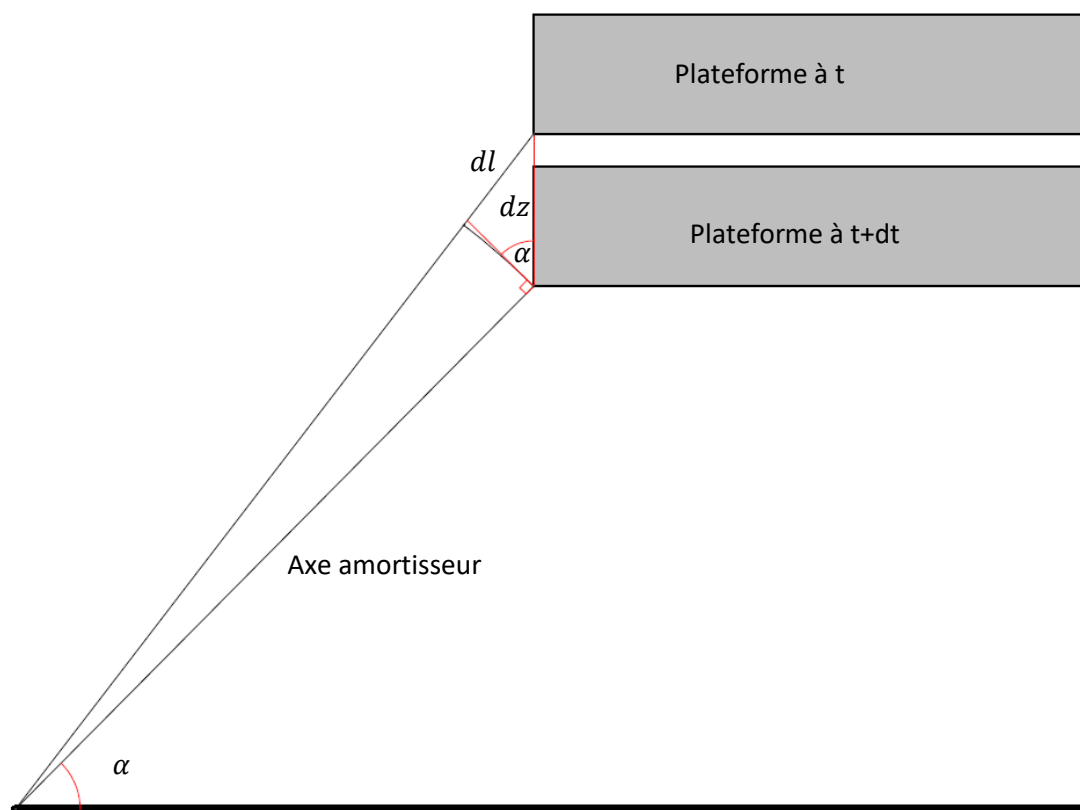


Figure 75 : Variation de la longueur de l'amortisseur suivant le déplacement vertical

Notant F_c la force axiale exercée par l'amortisseur sur la plateforme et F_{cv} sa composante verticale :

$$F_{cv} = F_c \sin(\alpha) \quad (92)$$

Par définition, on peut écrire :

$$F_c = c v ; F_{cv} = c_v v_v \quad (93)$$

On en déduit la relation recherchée pour l'amortissement vertical c_v en fonction de l'inclinaison :

$$c_v \approx c \sin(\alpha)^2 \quad (94)$$

Efficacité de l'amortisseur suivant sa position

On raisonne de sorte à se ramener pour chaque mode à un oscillateur simple généralisé en vibration verticale dont la coordonnée généralisée correspond au ventre maximal du mode considéré. Pour le mode 1, cette coordonnée généralisée est prise au centre de la plateforme, pour le mode 2 elle est considérée au milieu de la rive longitudinale et pour le mode 3 au milieu de la rive transversale.

Le principe des puissances virtuelles permet de caractériser l'efficacité de l'amortisseur ramené à la coordonnée généralisée en multipliant l'amortissement vertical obtenu précédemment par le carré de la déformée modale normalisée ψ au point d'application de l'amortisseur. On obtient ainsi l'amortissement généralisé c^* (ou amortissement modal) de l'amortisseur :

$$c^* = \psi^2 c_v \quad (95)$$

A partir de l'amortissement modal vertical obtenu pour un amortisseur, on peut revenir à la détermination du pourcentage d'amortissement critique additionnel ζ_a dû aux N amortisseurs :

$$\zeta_a = \frac{Nc^*}{2m^*\omega} \quad (96)$$

PLATEFORME 4		Mode 1	Mode 2	Mode 3
Longueur de la béquille supposée verticale	L [m]	2,27	2,27	2,27
Excentrement appui de la béquille / verticale	B [m]	1,648	1,648	1,648
Longueur réelle de la béquille	L_r [m]	2,8	2,8	2,8
Inclinaison des béquilles / horizontale	α_{min} [°]	54	54	54
Amortissement cible du vérin	c [kg/s]	630 000	630 000	630 000
Composante d'amortissement vertical	c_v [kg/s]	412 557	412 557	412 557
Nombre d'amortisseurs participants pour le mode	N	2	2	2
Coefficient d'efficacité	ψ	0,84	1	0
Amortissement généralisé d'amortisseurs verticaux	c_{tot}^* [kg/s]	580 684	825 113	0
Pourcentage d'amortissement critique des amortisseurs	ζ_a [-]	8,0%	21,5%	0,0%
Taux d'amortissement critique global de calcul	ζ [-]	9,0%	22,5%	1,0%

Tableau 43 : Détermination de l'amortissement de l'ouvrage corrigé avec les amortisseurs

A partir des équations d'équilibre dynamique pour le saut généralisé développées au §2.2.2.1, on peut en déduire l'amplitude de vibration verticale ainsi que la vitesse au ventre modal. Connaissant la forme modale on peut en déduire les mêmes grandeurs au point support de l'amortisseur et retrouver la course et la vitesse du piston. Finalement on peut déduire la force maximale développée par le vérin pour vérifier l'infrastructure support (Tableau 44). Celle-ci est inférieure à 150 kN.

PLATEFORME 4		Mode 1	Mode 2	Mode 3
Amplitude maximale de vibration verticale au ventre	Δu_{dyn} [mm]	28	11	11
Course axiale du piston	ΔL_{dyn} [mm]	19	9	0
Vitesse verticale maximale au point support	v_{max} [m/s]	0,27	0,15	0,00
Vitesse maximale du piston incliné	v_{pist} [m/s]	0,22	0,12	0,00
Force max dans l'axe de l'amortisseur incliné	F_{max} [kN]	136	78	0

Tableau 44 : Détermination de l'effort maximal développé par les amortisseurs

Si on revient en comparaison avec le §3.2.3 traitant de la vérification dynamique sans amortisseurs, on constate que même avec un taux d'amortissement intrinsèque de l'ouvrage réduit de 4% à 1%, les amortisseurs suffisent largement à assurer le non dépassement de la sollicitation de dimensionnement statique (ELU) à la résonance (ELA). Pour le mode 1, la charge globale équivalente à la résonance au saut est de 76% de la charge de dimensionnement statique combinée (Tableau 45). Les amortisseurs permettent également de prévenir le soulèvement d'appui.

CONCERT SAUT / ELA		Mode 1	Mode 2	Mode 3
Fréquence propre mode saut avec scéno	f [Hz]	4,06	5,39	7,44
Harmonique excitatrice	h	2	2	3
Amortissement plateforme seule	ζ_p [-]	1,0%	1,0%	1,0%
Amortissement amortisseurs	ζ_a [-]	8,0%	21,5%	0,0%
Amortissement total de calcul	ζ [-]	9,0%	22,5%	1,0%
Force maximale dans l'amortisseur	F_{max} [kN]	136	78	0
Taux de sollicitation ELA / ELU	CU	76%	67%	85%
Pression sur appui au rappel élastique	Soulèvement	NON	NON	NON

Tableau 45 : Résultats en configuration accidentelle ELA de type saut généralisé

Le confort est nettement amélioré pour les deux premiers modes de sorte à assurer une bonne adaptation de l'ouvrage à l'usage. En concert normal (Tableau 46), c'est-à-dire avec une densité de 0,8 p/m², on assure un confort maximal. Pour la configuration concert extrême à 3 p/m² (Tableau 47), on s'éloigne fortement du niveau d'accélération pouvant engendrer des mouvements de foule pour l'excitation des deux premiers modes. Seul le mode 3 reste à un niveau d'accélération élevé mais il faut garder en mémoire que la capacité d'excitation pratique par la foule de ce mode de fréquence relativement élevée reste à vérifier : d'une part car il est censé être excitable uniquement par la troisième harmonique et d'autre part car c'est un mode antisymétrique qui suppose une configuration d'excitation spéciale et peu probable [8]. Néanmoins, l'expérience sur des tribunes montre que les modes antisymétriques sont excitables pour diverses raisons à étudier (répartition non-uniforme du public, stimulation sonore avec retard et manque de coordination spatiale...) [61].

CONCERT DANSE NORMALE / ELS		Mode 1	Mode 2	Mode 3
Fréquence propre	f [Hz]	3,97	5,28	7,29
Harmonique excitatrice	h	2	2	3
Accélération concert normal sans amortisseurs	a_{max} [m/s ²]	0,96	1,12	0,52
Confort	CU	MOY	MIN	MOY
Accélération concert normal avec amortisseurs	a_{max} [m/s ²]	0,17	0,08	0,52
Confort	CU	MAX	MAX	MOY

Tableau 46 : Evolution du confort pour la danse normale avec amortisseurs

CONCERT DANSE EXTREME / ELS		Mode 1	Mode 2	Mode 3
Fréquence propre	f [Hz]	3,74	5,01	6,92
Harmonique excitatrice	h	2	2	3
Accélération concert extrême sans amortisseurs	a_{max} [m/s ²]	1,99	2,36	1,46
Confort	CU	MIN	MIN	MIN
Accélération concert extrême avec amortisseurs	a_{max} [m/s ²]	0,58	0,32	1,46
Confort	CU	MOY	MAX	MIN

Tableau 47 : Evolution du confort pour la danse extrême avec amortisseurs

3.3 Synthèse des enjeux scientifiques et techniques

La revue bibliographique réalisée montre que le sujet a été abordé par les différents pays à des niveaux de maturité ou de sensibilité différents selon la culture constructive et donc les retours d'expérience. Les pays anglo-saxons, construisant beaucoup en acier ou en bois, sont plus sensibles à la problématique. Ils ont donc développé beaucoup de programmes de recherche notamment à partir des années 90. Ces premières recherches ont donné naissance à des corpus normatifs que l'on a détaillé au chapitre 2. On notera que certains de ces corpus nationaux comme les anglo-saxons font des renvois entre eux par références interposées, tandis que certains pays comme la France restent relativement succincts et isolés.

Malgré le développement de ce corpus normatif, on constate encore l'apparition d'incidents partout dans le monde si on observe les incidents survenus au cours des vingt dernières années en annexe 1. Il semble que ce soit principalement lié à une méconnaissance du phénomène de résonance et à la sous-estimation de la capacité d'une foule à exercer des efforts considérables sur les structures existantes ou neuves. La foule peut en effet dépasser la capacité de résistance statique pour des activités de type saut sans même forcément induire une mise en résonance.

Mais la méconnaissance de la problématique par les exploitants n'est pas l'unique raison. Ces phénomènes sont parfois très peu enseignés en école d'ingénieur dans les cours de dynamique des structures au profit essentiel du calcul sismique en raison des conséquences humaines et économiques qu'un séisme peut engendrer. Le dimensionnement dynamique lié à l'activité humaine est souvent simplement abordé du point de vue du confort vibratoire pour des ouvrages de type passerelles légères car certaines ont occasionné des surcoûts importants pour leur correction dynamique.

Aussi, les ingénieurs ou architectes peuvent être relativement sceptiques face à un phénomène observé relativement rarement et d'une complexité mathématique pouvant donner l'impression d'une notion abstraite. En effet, si la modélisation du phénomène dynamique de mise en résonance est relativement bien maîtrisée en considérant la structure de manière isolée, elle se complexifie sensiblement lorsque l'on doit tenir compte de la présence du public qui par définition a des caractéristiques physiques, un comportement et une position aléatoire. De là découle une forme d'a priori consistant à penser que le phénomène est peu probable et aux conséquences peut-être moins dimensionnantes qu'attendues avec des modèles calculatoires simplifiés.

Sur la base de valeurs tirées de la bibliographie, l'état de l'art montre que le sujet doit être approfondi, notamment en le confrontant à des essais. Les principaux enjeux identifiés qui méritent analyse et retours d'expérience sont les suivants :

- La caractérisation de l'amortissement intrinsèque d'une structure en fonction de l'amplitude de vibration.
- L'identification d'une mesure conservatoire efficace pour l'augmentation de l'amortissement dans le cas spécifique des configurations événementielles.
- L'évaluation expérimentale de la sollicitation de la foule pour un nombre d'individus avoisinant les 100 personnes pour pouvoir disposer de valeurs expérimentales de coordination sur des planchers de l'ordre de 30 à 50 m².
- L'estimation de l'amortissement apporté par la foule dans des configurations proches de la réalité du point de vue du comportement et donc de la nature des actions.

On se base ainsi sur le projet de référence pour développer un prototype de plancher dans l'objectif d'apporter des éléments de réponse aux problématiques exposées. Il s'agit d'enrichir le corpus de références actuel tout en confrontant les résultats à des modèles simples de représentation.

Chapitre 4

Le prototype sur lequel les résultats expérimentaux s'appuient est décrit dans ce chapitre. On présente le prédimensionnement du prototype en regard des essais prévus afin de vérifier les ordres de grandeurs de sollicitations et de déformation avant la réalisation des essais. Le phasage de construction de l'ouvrage est ensuite présenté. Les moyens humains, l'instrumentation et les grandes phases d'essai sont enfin précisées.

4 Prototype et protocole expérimental

4.1 Description du prototype

4.1.1 Référence

Le plancher d'intérêt est le plancher de plus grande portée du projet de référence : la plateforme 4 (Figure 76). Celle-ci faisant plus de 12 m de largeur, il a été envisagé de ne réaliser qu'un tronçon correspondant à un bi-poutre dont les semelles sont deux fois moins épaisses afin de retrouver une raideur similaire pour la surface de platelage développée. L'intérêt est également de pouvoir s'affranchir des spécificités du projet et de tendre vers une structure plus générique qui engloberait les passerelles pour lesquelles les recherches peuvent aussi avoir des applications. Ce prototype présente au passage des dimensions similaires à la plateforme d'essai de Pernica qui a aidé à initier les études de coordination entre personnes selon le type d'activité en 1990 [62].

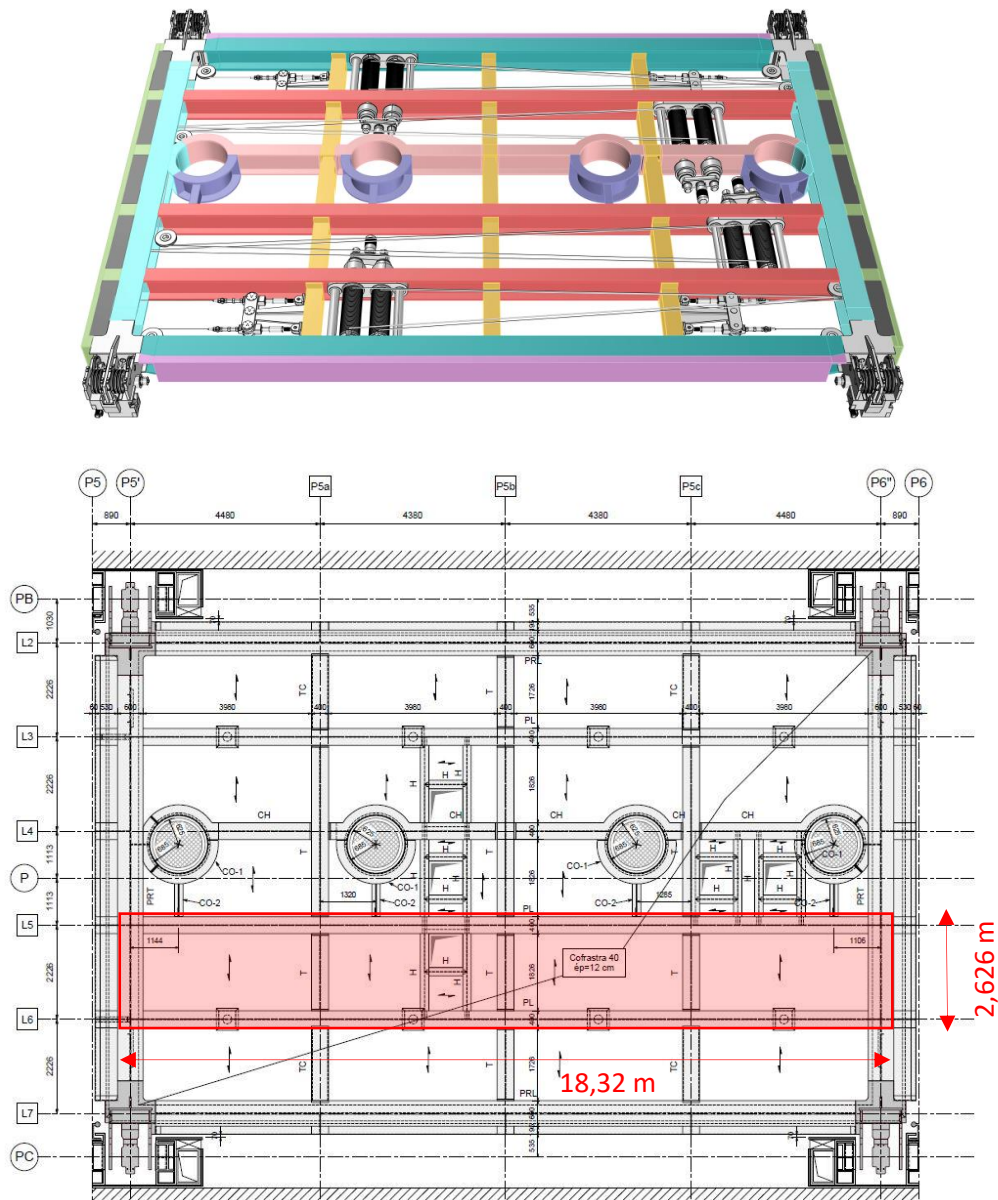


Figure 76 : Représentativité du prototype par rapport à la plateforme 4

4.1.2 Description générale

4.1.2.1 Dimensions

Le prototype se compose d'un plancher mixte de 48,1 m² avec des poutres métalliques de 750 mm de hauteur connectées à un plancher collaborant cofrastra 40 de 12 cm d'épaisseur. Ce plancher s'appuie sur deux culées en charpente métallique ancrées dans la dalle d'essai. Des dalles béton préfabriquées surchargent le prototype sans participer au fonctionnement structurel grâce à des joints creux tous les 1,5 m. Elles permettent de retrouver une masse participante similaire au projet de référence (faux-plafond, réseaux, équipements, revêtement de sol...). Des amortisseurs amovibles en V sont disposés à mi-portée en s'appuyant en pied sur une traverse de reprise.

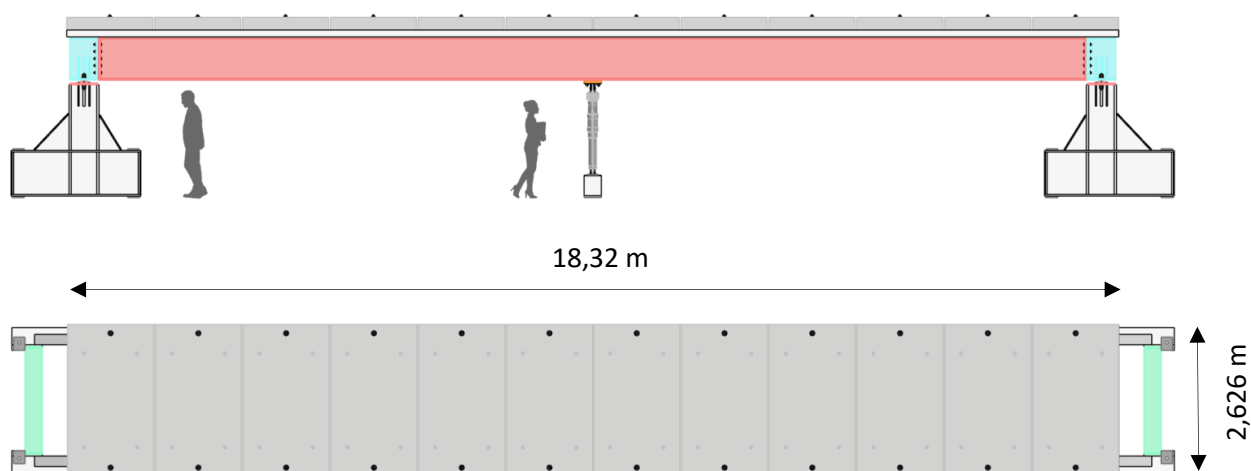


Figure 77 : Vue en élévation et de dessus du prototype (3D de conception)

La charpente métallique du plancher est constituée de deux poutres longitudinales reconstituées soudées en I (Nommées PL en rouge, section H: 750 mm B: 400 mm Tw: 12 mm Tf: 30 mm) entretoisées par des traverses en I (Nommées T en jaune, section H: 500 mm B: 400 mm Tw: 20 mm Tf: 40 mm) et connectées aux poutres de rive transversales en C (PRT : bleu, section H: 750 mm B: 500 mm Tw: 40 mm Tf: 30 mm) sur lesquelles sont soudés des grains.

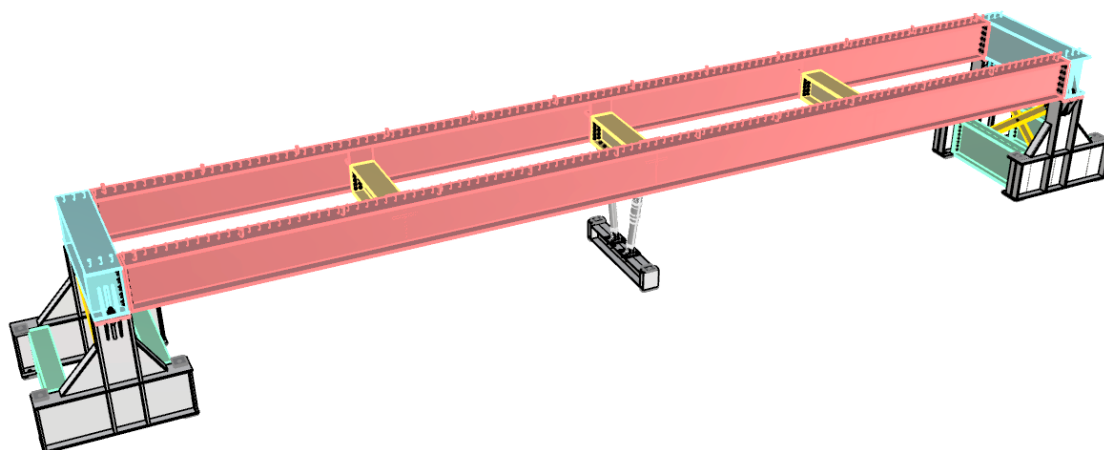


Figure 78 : Vue de la charpente du prototype

4.1.2.2 Conditions d'appui et liaison internes

Le plancher du prototype repose sur des appuis à grain en tête de culée distants de 17,72 m dans le sens longitudinal et 2,226 m dans le sens transversal. Des taquets métalliques latéraux brident les grains dans le sens transversal et longitudinal. Le point fixe est à l'appui sud-ouest, l'appui nord-ouest est bloqué uniquement dans la direction longitudinale, l'appui sud-est est bloqué dans le sens transversal et l'appui nord-est est complètement libre. Des tiges d'ancrage boulonnées ont été prévues au niveau des appuis pour reprendre le soulèvement éventuel suivant l'intensité des tests dynamiques. Elles ne se sont pas avérées nécessaires et elles n'ont donc pas été serrées. La culée est-elle-même ancrée sur la dalle d'essai au moyen de 4 barres de précontrainte avec des boulons de serrage mis en place avec vérin de bridage. Les deux flancs de la culée sont entretoisés et contreventés.

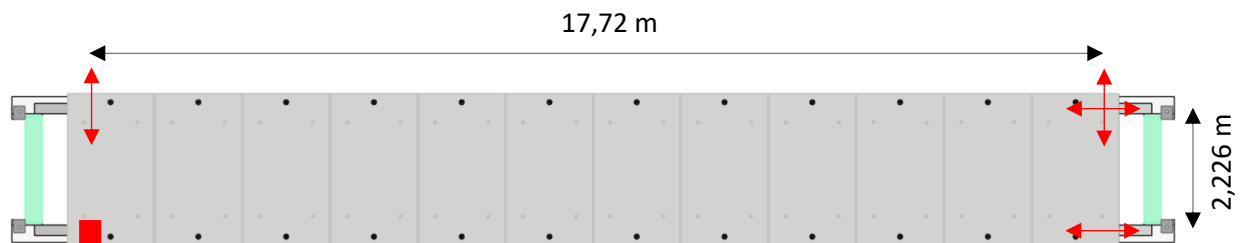


Figure 79 : Degré de liberté horizontaux par appui

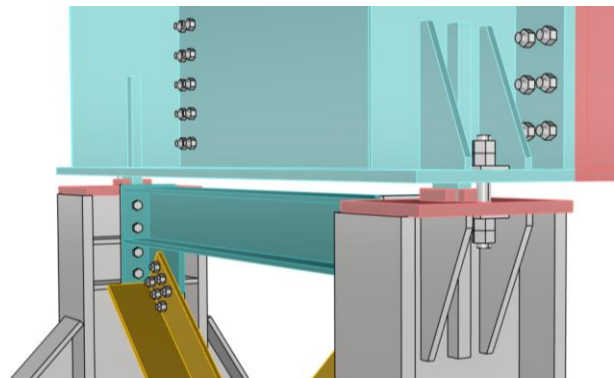
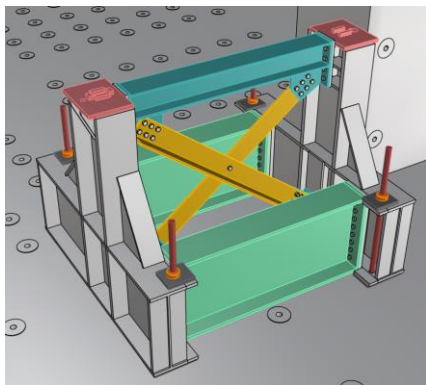


Figure 80 : Conditions d'appui au niveau de la culée Ouest

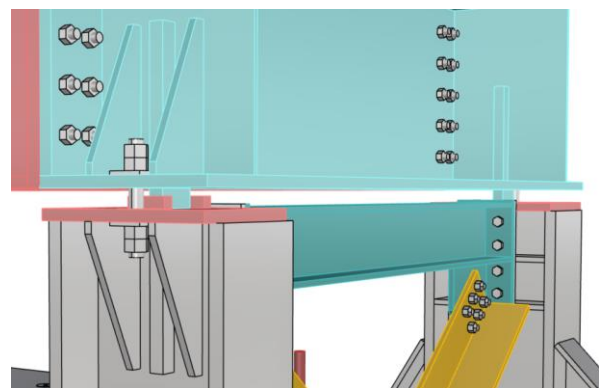
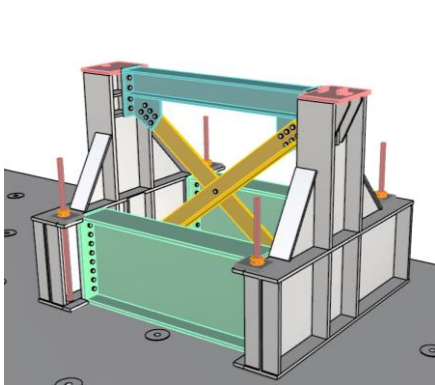


Figure 81 : Conditions d'appui au niveau de la culée Est

4.1.2.3 Environnement d'implantation et accessibilité



Figure 82 : Dalle d'essai du laboratoire EMGCU de l'université Gustave Eiffel

Le prototype a été implanté sur la dalle d'essai du laboratoire (dalle béton armé de 90 cm à 125 cm d'épaisseur sur un niveau d'infrastructure gauffré d'environ 3 m x 3 m). Il est bordé sur sa périphérie par un échafaudage auto-stable de 1,5 m de largeur sur les flancs et doté de deux escaliers situés au sud-ouest et au nord-est. Un joint creux d'environ 6 cm (2 cm au minimum avec les rosaces de connexion) entre l'échafaudage et le platelage est laissé pour éviter tout contact lors des essais. L'échafaudage sert ainsi de garde-corps pour les essais sur le platelage, de zone de travail pour la gestion de l'instrumentation et de zone d'attente pendant les essais. Trois échafaudages mobiles ont été disposés au nord de la dalle pour permettre des observations avec du recul et implanter des caméras.

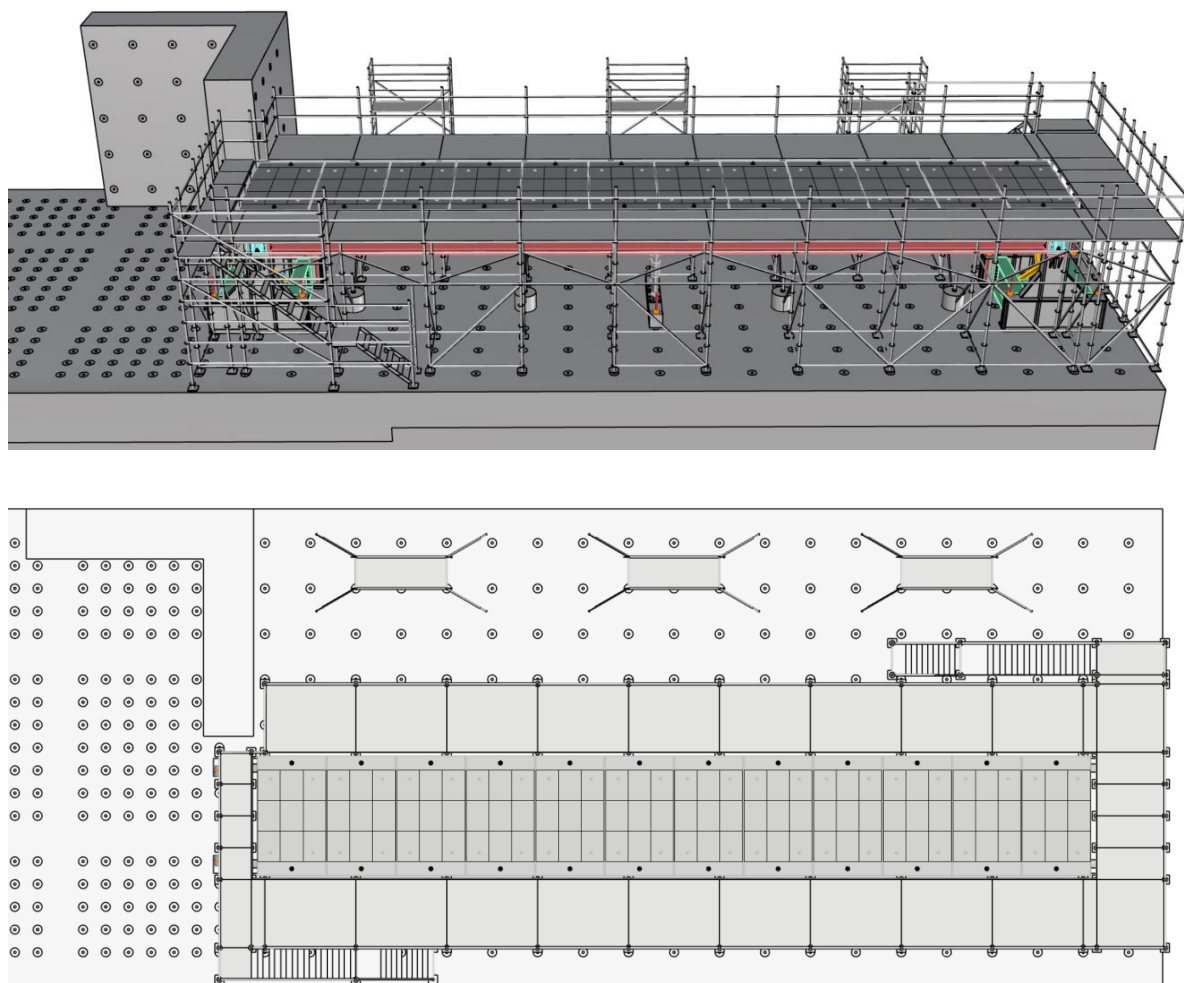


Figure 83 : Implantation du prototype sur la dalle d'essai

4.1.3 Ordres de grandeur des capacités structurelles

Le prototype a été pré-dimensionné sur la base d'hypothèses et par analogie structurelle avec la structure de référence pour s'approcher d'un comportement dynamique théorique similaire. Les principaux ordres de grandeur permettant de qualifier sa résistance statique et dynamique ainsi que sa déformation sous charges sont donnés ci-après. Cela permet d'avoir un référentiel pour comparer le cas d'usage statique courant et le cas de chargement dynamique accidentel moins usuel. Ces vérifications ont été faites avant la construction du prototype dans l'hypothèse d'un étaieement complet du plancher au montage (charpente acier et dalle).

4.1.3.1 Chargements

4.1.3.1.1 Charges permanentes

Charpente acier du plancher		[kN]	[daN/m ²]
Poids des profilés de rive transversaux PRT	P _{PRT}	25	53
Poids des profilés longitudinaux PRL	P _{PRL}	98	203
Poids des profilés transversaux T	P _T	19	39
Boulons / soudures / peinture	5,0%	7	15
Poids total de charpente	P _{char}	149	310

Plancher collaborant		[kN]	[daN/m ²]
Poids du bac acier (cofrastra 40 e 0,88)	P _{bac}	4,2	9
Poids du ferrailage (Treillis ST25C + HA 12)	P _{fer}	4,9	10
Poids des costières	P _{cost}	1,6	3
Béton dalle	P _{béton}	130	270
Surplus béton du bac acier au coulage (étais)	P _{surplus,béton}	0	0
Poids total du platelage	P _{plat}	141	293

Dallettes		[kN]	[daN/m ²]
Poids des dalles (base plans EXE)	P _{dallete}	253	527
Tiges d'ancrage acier	P _{ancrage}	0,6	1
Poids total des dalles	P _{dal}	254	528

Poids total de la structure de plancher		[kN]	[daN/m ²]
Poids du plancher à vide sans dalle	G _{min}	290	602
Poids du plancher à vide avec dalle	G _{max}	543	1129

Poids des culées		[kN]	[daN/m ²]
Poids charpente culées (cp boulons)	P _{char,culée}	90	187
Soudures / peinture	5,0%	4	9
Poids total des culées (pour deux culées)	P _{culée}	94	196

Tableau 48 : Chargements permanents de la structure

La descente de charges du Tableau 48 est obtenue sur la base d'une modélisation 3D détaillée et tenant compte du processus de construction avec étaieement ce qui induit de ne pas avoir de surplus de béton au coulage. Cela permet de contrôler le modèle de calcul aux éléments finis réalisés sous SCIA Engineer 2020. On peut donc retenir que notre plancher pèse environ 30 t sans les dalles et sans compter les culées et 55 t avec les dalles. Cela représente un poids surfacique moyen de 1129 daN/m² avec dalles.

4.1.3.1.2 Charges d'exploitation

On donne ci-après les chargements statiques et dynamiques ayant servi à dimensionner le prototype.

On définit à titre de repère une charge d'exploitation statique q_{\max} de 10 kN/m² qui correspond à la charge statique d'exploitation normale du plancher de référence. A noter que cette charge est deux fois plus élevée que le minimum réglementaire. Cette charge n'a pas de réalité d'usage dans le cadre du prototype mais il s'agit du minimum pour lequel l'ouvrage de référence doit être dimensionné.

Par la suite, on s'intéresse donc au chargement dynamique. Le programme d'essais prévoit une excitation dynamique d'une foule uniformément répartie de maximum 108 participants. L'amortissement n'ayant pas été identifié au préalable, on fait l'hypothèse confirmée par la suite d'un amortissement minimum de 1%. On fait également le calcul avec une hypothèse de 6% par comparaison.

Le prototype a été conçu pour éviter une mise en résonance à la première harmonique avec une fréquence propre de l'ordre de 5 Hz avec dalles de surcharge et à vide de public.

On envisage donc une mise en résonance par la foule de 108 participants sautant à 2,5 Hz pour engendrer une résonance à la seconde harmonique. Par hypothèse le poids moyen des étudiants est considéré égal à 700 N. Mais on verra que cette hypothèse est largement respectée dans les essais.

Les coefficients de Fourier pris en considération sont ceux donnés par le BRE Digest 426 2004 [8] et rappelés au § 2.1.3.1.

Harmoniques :	h	1	2	3	4	5	6
Fourier :	α_h	1,4	0,47	0,072	0,007	0,0024	0,0018
Phase :	φ_h [rad]	0,52	-0,52	-1,57	-2,62	-0,52	-1,57
Amplification :	A_h	1,33	50,00	0,80	0,33	0,19	0,12
Phase réponse :	θ_h [rad]	-0,01	-1,57	-3,12	-3,13	-3,13	-3,13

Tableau 49 : Paramètres de charge dynamique équivalente pour $\xi = 1\%$ à la résonance pour $h = 2$

On trace le chargement d'impact Figure 84.

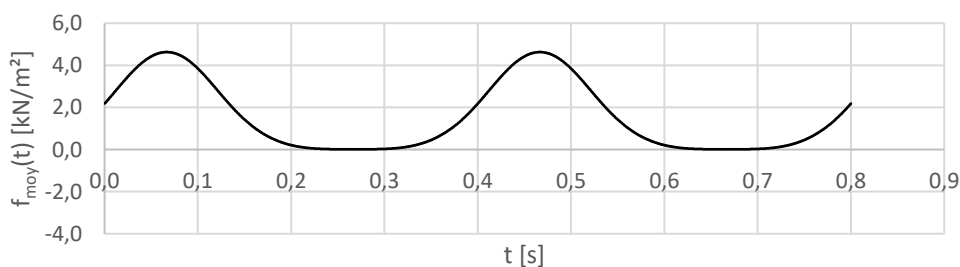


Figure 84 : Chargement d'impact de la foule de 108 étudiants sautant à 2,5 Hz

On obtient le chargement dynamique de la structure tenant compte de sa réponse élastique Figure 85. Une valeur positive sur le graphique ci-dessus correspond à un chargement vertical dirigé vers le bas.

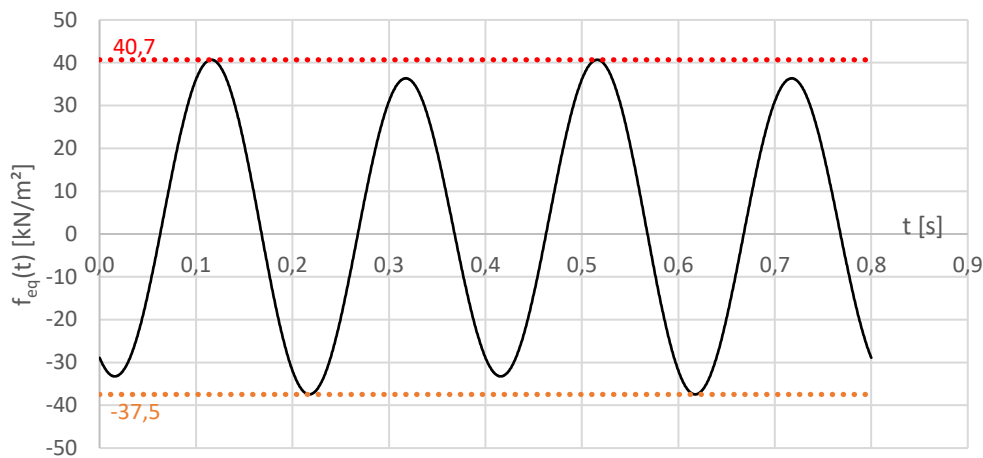


Figure 85 : Chargement statique équivalent à la réponse de la structure amortie à 1%

Ainsi on obtient les extrema à supporter par la structure du plancher dans le cas d'une mise en résonance à la seconde harmonique du saut de la foule. On peut faire exactement le même exercice en retenant une valeur d'amortissement de 6%, ce qui permet d'obtenir les valeurs de chargement de dimensionnement équivalent en statique au Tableau 50.

Chargements de dimensionnement du prototype avec dallettes		[kN]	[daN/m ²]
Charge de dimensionnement statique de référence (10 kN/m ²)	Q_{max}	481	1000
Effort statique équivalent vers le bas ($\xi = 6\%$) au saut de 108p	$F_{eq,max,6\%}$	485	1008
Effort statique équivalent vers le haut ($\xi = 6\%$) au saut de 108p	$F_{eq,min,6\%}$	-318	-660
Effort statique équivalent vers le bas ($\xi = 1\%$) au saut de 108p	$F_{eq,max,1\%}$	1957	4068
Effort statique équivalent vers le haut ($\xi = 1\%$) au saut de 108p	$F_{eq,min,1\%}$	-1803	-3747

Tableau 50 : Synthèse des charges d'exploitation statiques et dynamiques équivalentes

Les observations sont les suivantes :

- Un amortissement de 6% conduirait à la génération d'efforts à la résonance équivalents à ceux générés par une charge statique de 1 t/m² sur toute la surface du platelage. Quand on visualise les étudiants sur l'ouvrage, on n'imagine pas toujours intuitivement une telle capacité de chargement.
- Un amortissement de 1% conduit à des efforts 4 fois supérieurs à ceux générés par la charge statique de référence. On comprend donc bien que ce soit la dynamique qui gouverne le dimensionnement en résistance de telles structures.
- Il est important de garder en mémoire que contrairement à la statique, il existe une force de rappel élastique vers le haut. Ce qui dans le cas des structures mixtes avec table de compression en béton a une importance en raison de la fissuration que cela peut engendrer.

4.1.3.2 Résistance

4.1.3.2.1 Plancher collaborant

Le platelage constitué d'un plancher collaborant de 12 cm d'épaisseur ne pose pas tellement question puisque les dalles en béton armé de 22 cm sont systématiquement placées au-dessus lors des essais avec foule pour avoir une fréquence propre adéquate à l'étude. Par principe, le platelage est dimensionné moyennant la prise en compte de la charge d'impact local au saut coordonné de 6 personnes au m². Cela correspond à une charge surfacique locale de 19,7 kN/m² (voir § 3.2.3).

4.1.3.2.2 Charpente mixte

Il est plus important de s'intéresser au dimensionnement de la charpente mixte. D'une part car cela permet de situer les capacités et d'autre part car on en déduit des critères de surveillance lors des essais pour s'assurer d'être toujours en sécurité.

On envisage deux campagnes d'essai. Une première campagne d'essais avec 12 personnes centrées (solicitation notée Gr comme groupe) et une deuxième campagne avec maximum 108 personnes (solicitation notée Fo comme foule) réparties uniformément et dont l'action la plus pénalisante est le saut coordonné. Il est donc intéressant d'étudier les valeurs de sollicitations pour des valeurs d'amortissement de 1% correspondant à l'absence d'amortisseur et de 6% pour la présence d'amortisseurs (notation +A dans le cas de la présence d'amortisseurs).

On considère ici un chargement dynamique qui engendre une force dynamique de rappel vers le haut. Etant donné que l'on travaille avec des poutres mixtes, il faut donc distinguer le chargement ascendant engendrant une traction dans la dalle du chargement descendant la comprimant. Par ailleurs, étant donné que l'on considère un chargement dynamique, on évite de rentrer dans le domaine plastique. Tous les calculs sont donc réalisés dans le domaine élastique.

Les principaux paramètres de calcul géométriques et mécaniques sont rappelés au Tableau 51:

Aire du platelage	S [m ²]	48,1
Largeur du platelage	B [m]	2,626
Portée de la poutre	L [m]	17,72
Epaisseur de la dalle (compris bac)	h _t [m]	0,12
Hauteur du bac acier	h _p [m]	0,04
Hauteur de la poutre	h [m]	0,75
Inertie de la poutre acier seule	I _a [m ⁴]	0,00344
Limite d'élasticité de l'acier (données charpentier)	f _y [MPa]	355
Résistance caractéristique du béton (cf. éprouvettes Tableau 64)	f _{ck} [Mpa]	29,53
Coefficient de sécurité du béton (selon mesures sur éprouvettes)	γ _c	1,0
Résistance moyenne en traction du béton (Formule EC2 à partir de f _{ck})	f _{ctm} [Mpa]	2,9
Module d'Young statique (formule EC2 à partir de f _{ck})	E _{cm} [Gpa]	33
Module d'Young dynamique (formule de Popovic [63])	E _{cm,d} [Gpa]	43
Coefficient d'équivalence court terme dynamique	n	4,9
Position de l'axe neutre élastique / face supérieure en section mixte	y _{el,sup} [m]	0,314
Inertie dynamique de la poutre mixte	I _m [m ⁴]	0,00611

Tableau 51 : Principaux paramètres géométriques et mécaniques de calcul

On donne Tableau 52 les chargements ascendants et descendants dans les deux cas de sollicitation groupe centré Gr ou foule répartie Fo sans amortisseurs ou avec amortisseurs (+A). Il est aussi intéressant pour ordre de grandeur d'isoler la contribution de la seconde harmonique de l'excitation à la réponse dans un premier temps. On pourra voir que cela explique une très grande part de la sollicitation globale toutes harmoniques confondus, d'autant plus quand l'amortissement est faible.

Chargements		Gr	Gr+A	Fo	Fo+A
Nombre de personnes	N	12	12	108	108
Poids moyen des personnes	G_{moy} [N]	700	700	700	700
Coefficient de Fourier au saut normal pour h2	$\alpha_{2,ind}$	1,037	1,037	1,037	1,037
Coefficient de Fourier de groupe coordonné h2	$\alpha_{2,gr,th}$	0,57	0,57	0,47	0,47
Force harmonique d'excitation résultante h2	F_{h2} [N]	4 788	4 788	35 532	35 532
Amortissement du mode 1	ξ [%]	1,00%	6,00%	1,00%	6,00%
Chargement de poids propre	g_{max} [kN/m ²]	11,3	11,3	11,3	11,3
Chargement équivalent h2 seule (en kN pour Gr)	$F_{eq,h2,+}$ [kN-/m ²]	239	40	37	6
Chargement équivalent vers le bas (h1 à h6)	$F_{eq,tot,+}$ [kN-/m ²]	260	63	40,7	10,1
Chargement équivalent vers le haut (h1 à h6)	$F_{eq,tot,-}$ [kN-/m ²]	-245	-43	-37,5	-6,6

Tableau 52 : Sollicitation de groupe (Gr) et de foule (Fo) avec et sans amortisseurs (A)

On peut tout d'abord calculer la contrainte de compression (contrainte positive en compression) en flexion positive en combinaison accidentelle ($g_{max} + F_{eq,tot,+}$) au Tableau 53:

Contrainte dans le béton	$\sigma_{b,sup}$ [MPa]	12	8	28	12
Contrainte admissible	$\sigma_{b,lim}$ [MPa]	30	30	30	30
Endommagement du béton en flexion positive	CU+	41%	26%	95%	39%

Tableau 53 : Taux de sollicitation de la dalle en flexion positive

On constate que pour une foule de 108 personnes non amortis, la dalle béton n'est pas loin d'un début de plastification. On en est très loin dans les autres cas. On peut également donner Tableau 54 le taux de sollicitation correspondant de la fibre inférieure de l'acier la plus sollicitées de la section.

Contrainte dans l'acier en fibre inférieure	$\sigma_{a,inf}$ [MPa]	-105	-66	-244	-100
Contrainte admissible	$\sigma_{a,lim}$ [MPa]	355	355	355	355
Vérification de l'acier en flexion positive	CU+NF	30%	18%	69%	28%

Tableau 54 : Taux de sollicitation de la fibre inférieure de la poutre acier en flexion positive

En flexion positive, la marge est importante vis-à-vis de la plastification de la semelle. Cependant sous chargement ascendant, il faut vérifier l'état de fissuration de la dalle en flexion négative (Tableau 55). La vérification se base sur le non-dépassement de deux fois la résistance moyenne de traction [57].

Contrainte dans le béton	$\sigma_{b,sup}$ [MPa]	0,4	5,1	-14	3
Contrainte admissible	$\sigma_{b,lim}$ [MPa]	-6	-6	-6	-6
Endommagement du béton en flexion négative	CU	0%	0%	246%	0%
Fissuration du béton selon EC4 §5.4.2.3 (F / NF)	Etat	NF	NF	F	NF

Tableau 55 : Etat de fissuration de la dalle en flexion négative (F : fissuré)

On observe que la section doit être considérée comme fissurée dans le cas de la foule sans amortisseur. Dans l'hypothèse d'une fissuration de la dalle et/ou d'une éventuelle plastification, on peut calculer la sollicitation de la charpente en supposant l'absence de la contribution de la dalle (Tableau 56). La charge descendante est considérée de manière sécuritaire.

Contrainte dans l'acier en fibre inférieure	$\sigma_{a,inf}$ [MPa]	-126	-79	-292	-120
Contrainte admissible	$\sigma_{a,lim}$ [MPa]	355	355	355	355
Vérification de l'acier en flexion positive	CU+F	36%	22%	82%	34%

Tableau 56 : Taux de sollicitation de la poutre acier seule en flexion positive

Pour les petits groupes il n'y aura donc aucun problème a priori si les hypothèses des coefficients de Fourier retenus sont sécuritaires. Pour la foule avec amortisseur c'est a priori équivalent à un groupe de 12 personnes centrés sans amortisseur. En revanche une foule de 108 personnes sans amortisseurs peut éventuellement solliciter la charpente à hauteur de 82% en occasionnant des dommages irréversibles sur la dalle (fissuration et potentiellement légère plastification du béton). Une fissuration nette de la dalle a en effet été observée après les tests avant démolition du prototype (Annexe 5).

4.1.3.3 Raideur et déformations limites

4.1.3.3.1 Déformations sous charges permanentes

On calcule la flèche statique de manière analytique. On prend en compte les effets du retrait et on calcule la flèche à 30 jours au moment du retrait des étais (Nota : ils n'ont été installés en réalité qu'au coulage de la dalle). Cette valeur permet de déterminer les épaisseurs de calage des amortisseurs afin qu'ils soient montés à mi-course. Les capteurs de déplacement indiquent une flèche de 7 mm à la pose des dalles, ce qui correspond à la flèche estimée (Tableau 57).

Flèche à vide de la dalle en mixte	f_D [mm]	7,9
Flèche due aux dalles	f_{dal} [mm]	6,9
Flèche totale à vide avec dalles	F_{gmax} [mm]	14,8
Flèche de retrait à 30 jrs	w_s [mm]	2,8
Flèche totale sans dalles à 30 jours	$f_{tot(30jr)}$ [mm]	10,7
Flèche totale avec dalles à 30 jours	$f_{tot(30jr)}$ [mm]	17,6

Tableau 57 : Flèches permanentes à 30 jours compris retrait avec et sans dalles

On tient compte de la poursuite du retrait et du fluage à 6 mois pour obtenir la valeur de calage nécessaire en début d'essais qui est d'environ 25 mm dans le pire des cas (Tableau 58).

Coefficient de majoration pour le fluage	C_{fluage}	1,27
Flèche de retrait à 6 mois	w_s [mm]	6,3
Flèche totale sans dalles à 6 mois	$f_{tot(6 mois)}$ [mm]	16,2
Flèche totale avec dalles à 6 mois	$f_{tot(6 mois)}$ [mm]	25,0

Tableau 58 : Flèches permanentes à 6 mois compris retrait et fluage avec et sans dalles

4.1.3.3.2 Déformations sous charges d'exploitation

Il est utile pour les essais de disposer de valeurs de flèches limites permettant de vérifier en temps réel grâce au capteur de déplacement la distance aux endommagements possibles de la structure : fissuration de la dalle, plastification de la dalle, plastification de l'acier et donc ruine.

4.1.3.3.2.1 Vérification de service en section mixte

On reprend les paramètres de calcul géométriques et mécaniques du Tableau 51 utilisés pour le calcul en résistance pour les configurations de calcul en groupe et en foule. En partant sur l'hypothèse d'une section mixte non endommagée au préalable, on peut donc estimer les paramètres caractérisant la raideur du plancher Tableau 59.

Déformation sous poids propre en mixte à mi-portée	δ_G [mm]	14,8
Déformation quasi-statique sous charge uniforme (charge : $10kN/m^2$)	δ_u [mm]	13,1
Fréquence propre fondamentale à vide (estimation : $18 / \sqrt{\delta_G}$)	f [Hz]	4,67
Pulsation à la résonance	ω [rad/s]	29
Masse généralisée mode 1 (obtenue par modélisation EF SCIA Engineer)	M_{gen} [kg]	25 730
Raideur généralisée ($\omega^2 M_{gen}$)	k^* [N/m]	2,2E+07
Raideur sous charge résultante uniformément répartie ($10kN/m^2 A / \delta_u$)	k_{rep} [N/m]	3,7E+07

Tableau 59 : Paramètres de raideur pour le calcul des déformations en section mixte

On peut ainsi déterminer pour chaque cas de charge la déformation dynamique vers le haut (Tableau 60). On calcule également les flèches limites à première fissuration avec une distinction entre flèche admissible sous charge répartie pour la foule de 14 mm et sous charge ponctuelle pour le groupe centré de 11,2 mm. Cela permet de retrouver les taux de vérification en contrainte du Tableau 55. On peut également en déduire pour les essais la flèche admissible sous charge dynamique seule qui est de 23 mm pour les groupes et 29 mm pour la foule en tenant compte de l'état de déformation initial vers le bas de 14,8 mm. A noter que l'on ne tient pas compte à stade des contraintes de retrait ou thermiques éventuelles qui peuvent provoquer une fissuration anticipée par la création d'un état de tension dans la dalle liée au bridage des goujons. On réalise le calcul dans l'hypothèse d'une dalle étayée dès la mise en place de la charpente. Il s'agit donc de valeurs indicatives d'ordre de grandeur au stade du pré-dimensionnement. Une vérification tenant compte du retrait et du phasages et réalisée plus loin au Tableau 84 et permet de montrer que le départ de fissuration se produit plus tôt notamment pour les raisons ignorées ici.

Cas de chargement	Cas	Gr	Gr+A	Fo	Fo+A
Déformation sous poids propre en mixte	δ_G [mm]	14,8	14,8	14,8	14,8
Déformation max dues aux personnes vers le haut	$u_{dyn,max}$ [mm]	-11,1	-2,0	-49,2	-8,7
Accélération max en résonance	a_{max} [m/s ²]	-10	-2	-42	-7
	g	-0,97	-0,2	-4,3	-0,8
Déformation maximale à fissuration avec charge répartie	$\delta_{fis,rep}$ [mm]	-14,0	-14,0	-14,0	-14,0
Déformation maximale à fissuration avec charge centrée	$\delta_{fis,centr}$ [mm]	-11,2	-11,2	-11,2	-11,2
Vérification d'endommagement du béton en fissuration	CU	0%	0%	246%	0%
Flèche dynamique admissible sans fissuration	$\delta_{ult,fis}$ [mm]	-23	-23	-29	-29

Tableau 60 : Déformations dynamiques verticales vers le haut et limites admissibles

La plastification de la dalle apparait pour des flèches plus importantes. Mais on peut également donner la flèche limite à première plastification dans le cas d'un chargement descendant au Tableau 61.

Cas de chargement	Cas	Gr	Gr+A	Fo	Fo+A
Déformation sous poids propre en mixte	δ_G [mm]	14,8	14,8	14,8	14,8
Déformation max dues aux personnes vers le bas	$u_{dyn,max}$ [mm]	11,7	2,8	53,4	13,3
Accélération max en résonance	a_{max} [m/s ²]	10	2	46	11
	g	1,03	0,2	4,7	1,2
Déformation maximale à plastification charge répartie	$\delta_{plas,rep}$ [mm]	72,0	72,0	72,0	72,0
Déformation maximale à plastification charge centrée	$\delta_{plas,centr}$ [mm]	57,6	57,6	57,6	57,6
Vérification d'endommagement du béton	CU	41%	26%	95%	39%
Flèche dynamique limite aux essais sans plastification	$\delta_{ult,plas}$ [mm]	46	46	57	57

Tableau 61 : Déformations dynamiques verticales vers le bas et limites admissibles

4.1.3.3.2.2 Vérification ultime en section acier

En émettant l'hypothèse de la perte de la participation de la dalle, on peut effectuer une vérification en acier seul pour obtenir la flèche admissible ultime avant plastification de la section acier et donc ruine. Cela permet de déterminer la flèche correspondante à la sollicitation maximale admissible pour les essais.

Déformation sous poids propre sans connexion dalle béton	δ_G [mm]	26,4
Déformation sous charge uniforme (10 kN/m ²)	δ_u [mm]	23,3
Fréquence propre fondamentale à vide (estimation analytique)	f [Hz]	3,5
Pulsation à la résonance	ω [rad/s]	22
Masse généralisée mode 1 (obtenue par modélisation EF)	M_{gen} [kg]	25 730
Raideur généralisée	k^* [N/m]	1,2E+07
Raideur sous charge résultante uniformément répartie	k_{rep} [N/m]	2,1E+07

Tableau 62 : Paramètres de raideur pour le calcul des déformations en section acier

Cas de chargement	Cas	Gr	Gr+A	Fo	Fo+A
Déformation sous poids propre en acier seul	δ_G [mm]	26,4	26,4	26,4	26,4
Déformation max dues aux personnes vers le bas	$u_{dyn,max}$ [mm]	20,8	5,0	94,9	23,6
Accélération max en résonance	a_{max} [m/s ²]	10	2	46	11
	g	1,03	0,2	4,7	1,2
Déformation maximale à plastification charge répartie	$\delta_{plas,rep}$ [mm]	147	147	147	147
Déformation maximale à plastification charge centrée	$\delta_{plas,centr}$ [mm]	118	118	118	118
Vérification de sécurité structurelle	CU	36%	22%	82%	34%
Flèche dynamique de sécurité en résistance	$\delta_{ult,res}$ [mm]	97	97	121	121

Tableau 63 : Déformations dynamiques verticales ultimes vers le bas et limites admissibles

La flèche maximale admissible en résistance est de 121 mm pour une foule et de 97 mm pour les essais de groupe.

4.1.4 Phasage de construction

La fabrication de la charpente a commencé à la suite de la validation du plan de charpente [64] moyennant la correction a posteriori de la trame des douilles d'ancrage pour l'implantation symétrique des dalles.



Figure 86 : Fabrication de la charpente acier à Ploufragan le 5/10/2022

La charpente en acier S355 pour le plancher est livrée sur site par convoi exceptionnel. L'enjeu a été de pouvoir rentrer les grandes poutres de 17,22 m. La culée a été livrée en pièces détachées. Le montage a été réalisé à la grue mobile pour une raison d'indisponibilité momentanée des ponts roulants. Le bac acier est posé une fois la charpente montée.



Figure 87 : Livraison de la charpente au laboratoire le 14/11/2022

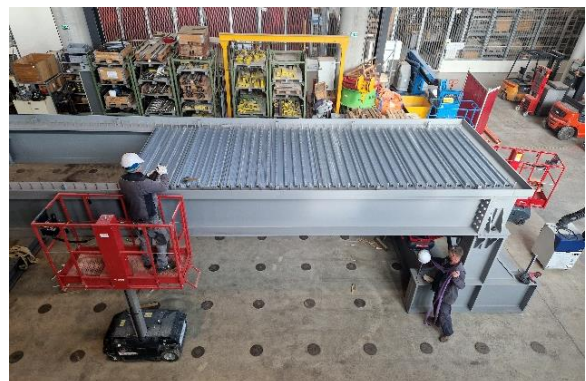


Figure 88 : Montage de la charpente et pose du bac acier entre le 15/11 et le 17/11/2022

L'échafaudage périmétrique auto-stable est ensuite monté. Il est fixé au renversement sur des plots ancrés par précontrainte sur la dalle d'essai. Des points de passage pour l'accès aux amortisseurs sont aménagés. On en profite pour souder les platines ajustées et serrer les barres de précontrainte des culées et de la traverse d'appui de l'amortisseur. A noter que les plots d'ancrage des barres de précontraintes sont surélevés d'environ 5 mm au-dessus du fini béton de la dalle.



Figure 89 : Mise en place des échafaudages du 21/11 au 25/11/2022

Le ferrailage est ensuite mis en œuvre avec des armatures en creux d'onde HA12 toutes les deux ondes de bac, un treillis de répartition inférieur ST25C et un treillis supérieur ST25C avec un enrobage de 20 mm. Le bac et la charpente sont étayés avant coulage. La fibre optique est fixée à l'adhésif sur les armatures. Quatre fibres sont posées : 2 fibres longitudinales, 1 centrale et 1 transversale.



Figure 90 : Ferrailage le 29/11/2022 et étaielement de la dalle et des poutres

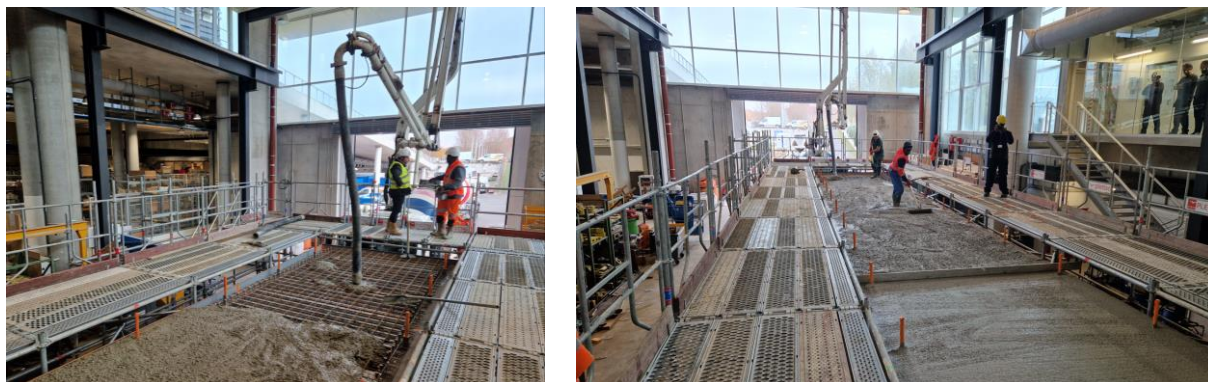


Figure 91 : Coulage de la dalle le 30/11/2022

La dalle est coulée et trois éprouvettes cylindriques du béton C40/50 commandé ont été prélevées. Les fibres optiques les plus protégées sont les fibres longitudinales fixées sous les armatures du treillis supérieur sur l'armature extérieure le long des goujons. La fibre centrale et la fibre transversale traversant des alvéoles ont été sectionnées par inadvertance lors du coulage.

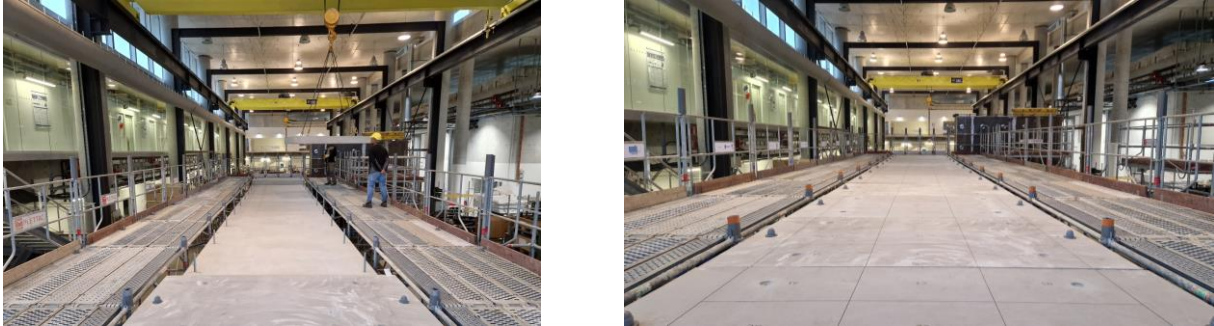


Figure 92 : Pose des dallettes le 5/01/2023 et marquage au sol

Les étais ont été retirés le 3 janvier, soit 5 semaines après coulage, et les dallettes de surcharge de 22 cm ont ensuite été mises en place au moyen de deux douilles filetées vissées dans les douilles d'ancrage soudées sur la charpente. Cela a permis de réaliser les marquages au sol permettant de localiser les participants. Les amortisseurs ont été mis en place avant le début des tests de foule.

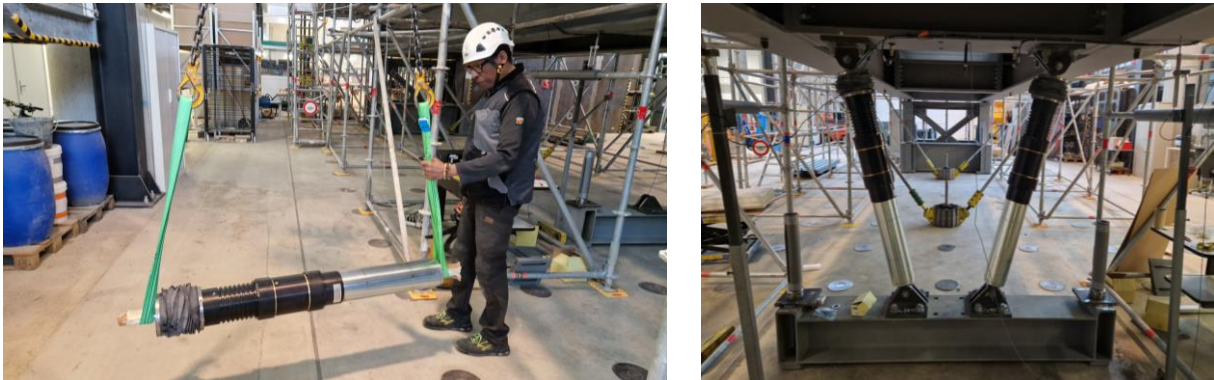


Figure 93 : Mise en place des amortisseurs livrés par TAYLOR le 6/03/2023

Le béton a été testé le 5/01/2023 par écrasement des éprouvettes en béton constituées le 30/11/2022 selon la norme NF EN 12390-3 [65]. Les résultats sont donnés Tableau 64.

Eprouvette	Masse [kg]	Diamètre [mm]	Hauteur [mm]	Force [kN]	Contrainte [MPa]
1	14,36	159,8	314,28	738,47	36,91
2	14,38	159,8	317,08	748,91	37,44
3	14,38	159,8	316,22	765,22	38,25

Tableau 64 : Essais de compression des éprouvettes de béton de la dalle du prototype

On en déduit une valeur de résistance caractéristique sur la base de la résistance moyenne :

$$f_{ck} = \frac{(36,91 + 37,44 + 38,25)}{3} - 8 = 29,53 \text{ MPa} \quad (97)$$

Il s'agit donc au final d'un C30 et non d'un C40 comme prescrit initialement.

4.2 Moyens humains et instrumentation

4.2.1 Inventaire général des moyens à mettre en œuvre

4.2.1.1 *Caractérisation du prototype à vide*

La détermination des caractéristiques dynamiques du prototype demande de pouvoir disposer de moyens pour mesurer simultanément la réponse de l'ouvrage et l'action dynamique sinusoïdale exercée :

- Excitateur mécanique de puissance suffisante pour atteindre à minima $3,5 \text{ m/s}^2$
- Système de mesure de la force exercée par l'excitateur
- Accéléromètres sur la structure pour mesurer la réponse

4.2.1.2 *Caractérisation de l'interaction foule-structure*

4.2.1.2.1 Mise en mouvement des individus

Pour générer le spectre d'excitation de la foule souhaitée dans des conditions réelles ou contrôlées, on a mobilisé les moyens suivants :

- Étudiants en nombre suffisant (jusqu'à 108 individus)
- Fiche de données personnelles + balance pour contrôler les poids
- Playlist / métronome pour constituer la source sonore
- Système d'amplification du son

4.2.1.2.2 Mesure de l'action des individus en balancement vertical et au saut

La mesure de l'action des individus a nécessité de disposer de moyens complémentaires et parfois redondants pour fiabiliser l'acquisition :

- Plaques de force (système d'acquisition direct)
- Accéléromètres portatifs (système d'acquisition indirect)
- Caméras + Fiches de ressenti pour caractériser la composante comportementale

Etant donné le coût encore élevé des dispositifs d'acquisition de l'action d'un individu (plaque de force ou accéléromètre), on a procédé par échantillonnage le long de l'ouvrage pour l'action de la foule. La vidéo vient en complément pour vérifier la coordination des individus non instrumentés avec la personne instrumentée dans le secteur de référence. Il demeure un niveau d'imprécision lié au fait que l'ensemble des participants ne sont pas instrumentés. Mais des travaux sont en cours pour permettre l'acquisition de l'accélération des personnes avec les téléphones portables et de manière synchronisée [66]. On ne dispose pas d'un tel dispositif pour les essais.

4.2.1.2.3 Mesures de la réponse du prototype

La mesure de la réponse du prototype a été réalisée avec les moyens suivants dont certains sont redondants pour sécuriser et fiabiliser l'acquisition :

- Accéléromètres répartis sur la structure + capteurs de position au centre de l'ouvrage
- Vélodimètres et sondes de température pour les amortisseurs
- Fibre optique (système d'acquisition parallèle pour tester cette technologie innovante)

4.2.2 Excitation dynamique

4.2.2.1 Excitateur mécanique

L'excitateur se compose d'une masse de 320 kg contrôlée par un contrôleur digital (Figure 94). L'excitateur est équipé de deux accéléromètres PCB mesurant dans la gamme $\mp 2g$ avec une sensibilité de 1000mV/g. La fréquence d'échantillonnage est fixée à 2048 Hz (Fréquence de Shannon de 1024 Hz). Une décimation à une fréquence de 64 Hz est réalisée pour l'analyse et la représentation des figures.

Le pilotage de l'équipement pour les mesures a été réalisé par le professeur Denoël. L'analyse des données brutes (filtres, ajustement de modèle, premières analyses critiques) a été réalisée conjointement avec l'université de Liège (acronyme ULiège). Les résultats des essais avec excitateur fournis par l'université de Liège sont analysés au paragraphe 5.1.



Figure 94 : Essais avec excitateur mécanique de l'ULiège le 10/03/2023

4.2.2.2 Participants aux essais

4.2.2.2.1 Etudiants

L'excitation dynamique de groupe ou de foule a été réalisée avec des étudiants en architecture de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris Val de Seine.

Des essais de groupe avec et sans excitateur ont été réalisés avec des étudiants de 2^{ème} année en semestre 3 (nommés S3) et de 3^{ème} année en semestre 5 (nommés S5). Au total, cela représente 39 élèves cumulés et un enseignant.

Les essais de foule ont été réalisés avec des étudiants de première année en semestre 2 (nommés S2). Cela représente 131 élèves au total qui se sont portés volontaires pour participer aux essais. Au moment de répartir les étudiants sur la dalle d'essai, il a été demandé de se positionner par affinité en constituant des groupes d'environ 9 personnes. On a ensuite interrogé chaque groupe en leur

demandant qui avait une « âme de meneur » et voulait être le représentant du groupe. C'est ainsi que les 12 premiers leaders ont été nommés et éventuellement remplacés ponctuellement par la suite suivant les aléas de santé ou de présence. Ces étudiants étaient équipés de capteurs et avaient une mission de synthèse.

Il est important de préciser les conditions de la motivation des étudiants au-delà de l'intérêt particulier porté aux essais. Ces étudiants ont donc été autant motivés par la perspective de valoriser cette expérience par les points bonus que par la perspective de visiter un chantier particulier.

Les étudiants ont rempli une fiche de données personnelles dont le contenu est donné en annexe 2. Cette fiche précise des caractéristiques importantes pour l'étude que sont l'âge, le poids, la taille et le sexe. Le poids est déclaratif et sera vérifié par la suite lors des essais avec une balance de sorte à disposer du poids réel le jour J tenant compte de la tenue vestimentaire, chaussures comprises.



Figure 95 : Etudiants volontaires de l'ENSAPVS en S2

En complément de ces données morphologiques, des questions concernant la pratique de la danse ont été posées pour caractériser le niveau global des participants.

Ils ont également été interrogés sur les genres musicaux qui peuvent les intéresser tout particulièrement de même que la fréquence à laquelle ils peuvent assister à des concerts. Cela permet de constituer des statistiques à mettre en regard des résultats pour diverses sollicitations musicales.

Enfin des questions sur leur aptitude sportive ont été posées de sorte à les corrélérer avec l'interprétation des capacités physiques lors des essais.

Une fiche de consentement séparée a également été signée par les participants.

4.2.2.2.2 Playlist

En complément de la fiche de données personnelles, il a été demandé aux étudiants de donner chacun une liste de 10 titres susceptibles de les faire danser peu importe le genre. Cette demande a été particulièrement suivie auprès des 40 premiers étudiants de S3 et S5 participants aux campagnes d'essais de groupe. Seuls deux étudiants ont précisé ne pas pouvoir répondre à cette question car la musique « dansante » n'était pas pour eux d'un attrait particulier. On obtient une playlist de 380 titres figurant avec les années de sortie, les battements par minutes et la fréquence associée en Hz. On peut en déduire deux données particulièrement intéressantes d'un point de vue statistique (Figure 96).

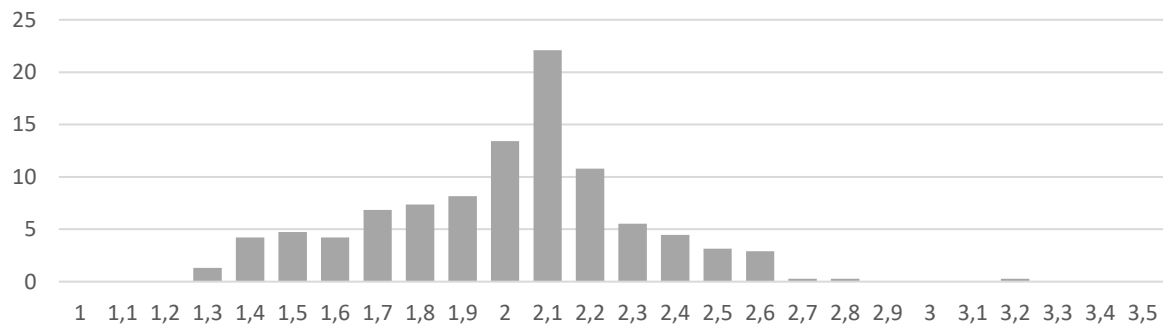


Figure 96 : Distribution [%] des tempos [Hz] des 380 titres musicaux dansants des S3 et S5

On note que la plupart des titres (50%) sont compris entre 1,9Hz et 2,2Hz. Il est également à remarquer que l'on compte plus de titres en dessous de 1,9Hz que de titre au-delà de 2,2Hz qui se raréfient nettement. On ne compte que 2 titres au-dessus de 2,8Hz.

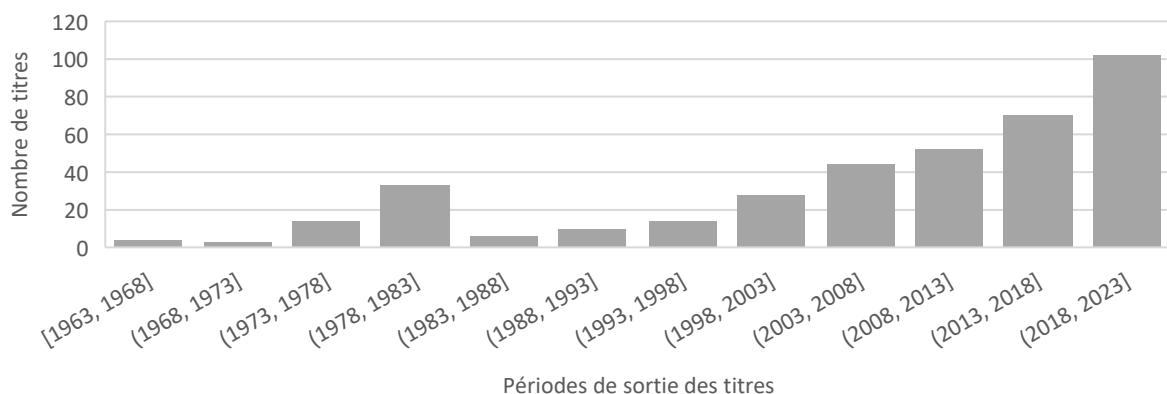


Figure 97 : Distribution des années des titres musicaux dansants

Pour ce qui concerne les années des morceaux, les titres dansants cités sont de plus en plus rares avec leur ancienneté selon une tendance relativement monotone (Figure 97). Plus d'un quart des titres cités datent des 5 dernières années. Néanmoins on constate un sursaut de représentativité de titres datant de la fin des années 70 et du début des années 80. Probablement un effet de mode lié à une résurgence de titres disco-pop.

On donne au Tableau 65 une playlist de synthèse des titres diffusables suivant la fréquence et tenant compte du retour des étudiants et d'ajouts personnels pour diversifier les styles ou étoffer le domaine de fréquences excitables.

Plage [Hz]	Titre	Artiste	Année	BPM	f [Hz]	D [min]
1,3	Survivor	Destiny's Child	2001	81	1,35	4,23
1,4	Boys don't cry	The Cure	1980	85	1,42	2,60
1,5	In da club	50 cent	2003	90	1,50	3,22
1,6	Crazy in love	Beyonce	2003	99	1,65	3,93
	Dancing Queen	ABBA	1976	100	1,67	3,83
1,7	No lie	Sean Paul, Dua Lipa	2017	102	1,70	3,68
	Policeman	Eva Simons, Konshens	2015	105	1,75	3,23
	Long way 2 go	Cassie	2006	106	1,77	3,68
	Jump Around	House Of Pain	1992	107	1,78	3,57
1,8	Miami	Will Smith	1997	108	1,80	3,30
	Whenever whenever	Shakira	2001	108	1,80	3,27
	Upside Down	Diana Ross	1980	108	1,80	4,10
	Wannabe	Spice Girls	1996	110	1,83	2,88
	Give it to me	Timbaland	2007	111	1,85	3,90
	Titi me pregunto	Bad bunny	2022	111	1,85	4,07
1,9	Respect	Aretha Franklin	1967	114	1,90	2,47
	Get lucky	Daft Punk	2013	116	1,93	4,13
	Femme like u	Kamaro	2004	117	1,95	4,15
	Black Betty	Ram Jam	1977	117	1,95	3,95
	Smells Like Teen Spirit	Nirvana	1991	118	1,97	5,03
	American boy	Estelle	2008	118	1,97	4,75
	Gimme! Gimme! Gimme!	ABBA	1979	119	1,98	4,88
2	Alors on danse	Stromae	2010	120	2,00	3,43
	Around the world	Daft Punk	1997	121	2,02	7,17
	One More Time	Daft Punk	2000	123	2,05	5,33
	What is love	Haddaway	1993	124	2,07	4,52
	Temperature	Sean Paul	2005	125	2,08	3,60
	Hung up	Madonna	2005	125	2,08	5,63
2,1	Call on Me	Eric Prydz	2004	126	2,10	7,57
	Lucky star	Superfunk, Ron Carroll	2000	126	2,10	4,93
	The Weekend	Michael Gray	2005	127	2,12	3,20
	Blitzkrieg	Kris Winther	2021	128	2,13	3,08
	Freed from desire	Gala	1997	129	2,15	3,55
	Mala Vida	Mano Negra	1988	128	2,13	2,90
	Memories	David Guetta, Kid Cudi	2009	130	2,17	3,50
2,2	Heads Will Roll	A-trak Remix	2009	132	2,20	6,40
	Jungle	Fred Again	2022	134	2,23	3,32
	La fama	Rosalia	2022	136	2,27	3,13
2,3	Glorious	Macklemore	2017	140	2,33	3,67
	Everytime we touch	Cascada	2006	142	2,37	3,28
	Bande organisée	Jul	2020	143	2,38	5,93
2,4	Miss you	Oliver Tree	2022	145	2,42	3,43
	Tainted love	Soft Cell	1981	145	2,42	2,57
	Can't hold us	Macklemore and Ryan Lewis	2012	146	2,43	4,30
2,5	Du propre	Orelsan	2021	150	2,50	3,78
	Pump It	Black Eyed Peas	2009	153	2,55	3,55
	Somebody told me	Speedogang (The Killers)	2017	155	2,58	3,70
2,6	Partenaire particulier	Partenaire particulier	1985	156	2,60	4,10
	Hey Ya	Outkast	2003	159	2,65	3,92
	Maniac	Michael Sembello	1983	159	2,65	4,07
	I follow Rivers	Darren Styles	2022	160	2,67	3,12
	Happy	Pharrell Williams	2014	160	2,67	3,87
	Phonky Tribu	Funk Tribu	2021	160	2,67	4,77
2,7	Good 4 U	Olivia Rodrigo	2021	166	2,77	2,97
	Lonely Boys	The Black Keys	2011	167	2,78	3,22
2,8	Danza Dell'autunno rosa	Talco	2012	171	2,85	4,53
2,9	J'irai où tu iras	Céline Dion	1995	175	2,92	3,45
3 <	Todos Los dias sale El sol	Bongo Botrako	2010	192	3,20	2,43

Tableau 65 : Playlist de synthèse suivant la fréquence de sollicitation recherchée

Cette liste est bien sûr le reflet d'une tendance à un instant donné des envies musicales d'un groupe appartenant à une certaine tranche d'âge même si elle comporte des titres relativement anciens. En effet, le retour de genres musicaux comme le disco influent sur l'état de motivation des participants.

Elle permet de balayer à la fois les fréquences musicales que l'on peut qualifier de « dansantes » qui reviennent le plus régulièrement autour de 2,1Hz et d'avoir suffisamment de choix pour aller expérimenter des sollicitations à plus haute fréquence pour rechercher une excitation avec l'harmonique la plus basse possible (Figure 98). Ceci dans la limite des capacités physiques des individus et des possibilités de coordinations des groupes qu'il s'agit d'identifier.

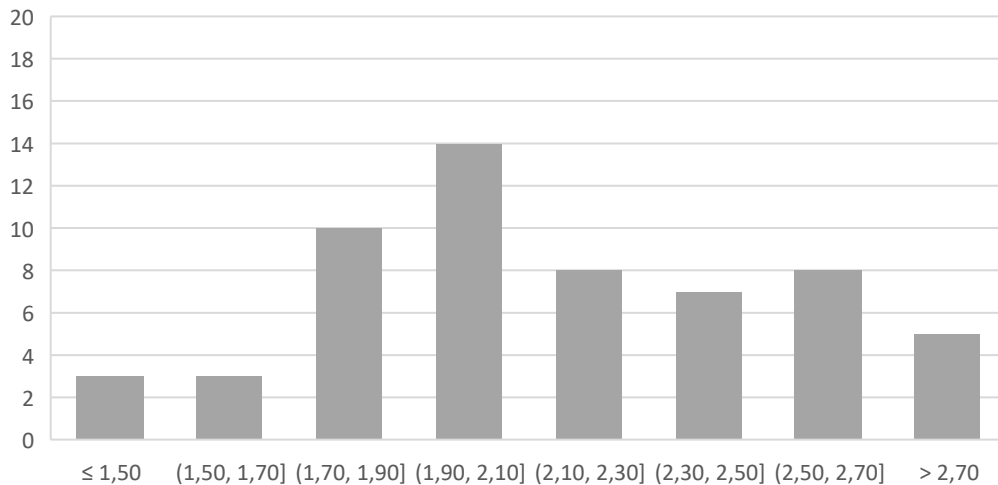


Figure 98 : Distribution des tempos des titres de la playlist de synthèse

Cette liste de synthèse permet de balayer plusieurs décennies et notamment les 5 dernières avec à minima 4 titres par décennie (Figure 99). Sans effet de mode évoqué précédemment, les titres qui sont en général les plus efficaces sont situés aux alentours des années 2000 - 2010. En effet, ils sont susceptibles d'être connus par suffisamment d'individus. Des titres plus récents peuvent être plus clivants du point de vue de l'incitation à la danse pour un groupe aux goûts variés. Il est à noter que les étudiants mobilisés sont certes volontaires mais ne viennent pas assister à un concert d'un groupe ou d'un genre particulier. Aussi, d'autres expériences dans des environnements réels seront utiles à l'avenir pour mesurer l'influence d'un genre ou d'une configuration de concert plus spéciale.

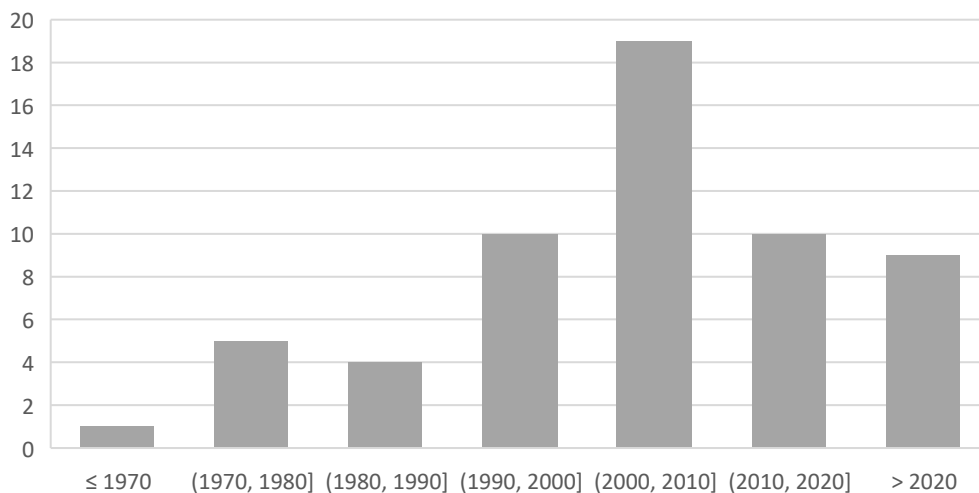


Figure 99 : Distribution des années des titres de la playlist de synthèse

4.2.2.2.3 Métronome

Afin de générer une excitation contrôlée en fréquence sans musique, l'application *metronome beats* (Figure 100) a été utilisée pour les actions de balancement vertical et de saut. Elle permet de fixer simplement et de manière neutre les BPM d'un signal sonore.

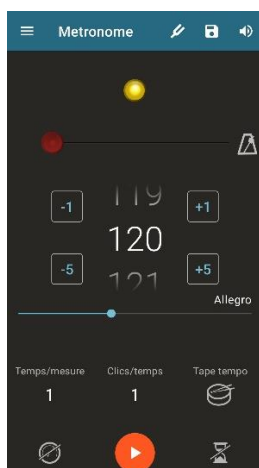


Figure 100 : Application Métronome Beats utilisée comme métronome

4.2.2.2.4 Enceintes et microphone

Il est d'usage d'envisager une puissance de sonorisation de l'ordre de 5 W par personne en intérieur. Les premiers essais de groupe ne dépassant pas 20 personnes et étant prévus des essais jusqu'à 100 personnes, il a été envisagé un minimum de puissance d'environ 500 W. On a donc utilisé deux enceintes JBL Partybox 310 de 240 W jumelables (Figure 101). Elles ont été disposées à deux extrémités du prototype en cas de foule pour répartir le son. Si les essais se sont bien déroulés, il a néanmoins été constaté que l'acoustique du laboratoire nécessitait un peu plus de puissance pour compenser le volume de la salle lorsque les étudiants étaient particulièrement bruyants. Ces enceintes servaient à pouvoir brancher un micro pour donner les consignes et diffusaient par Bluetooth la musique ou la sollicitation du métronome.



Figure 101 : Enceintes JBL Partybox 310 de 240 W

4.2.2.2.5 Positionnement

Des marquages au sol ont été réalisés pour repérer la position des participants. Chaque dalle est numérotée de 1 à 12 d'est en ouest. Les participants étant toujours face à l'est pour les essais.

On distingue trois files de 67 cm de large : la file nord N, la file centrale C et la file sud S. Sur chaque dalle, on distingue ensuite 3 rangées de 50 cm de large, numérotées 1, 2 et 3 d'Est en Ouest.

Cela permet de définir des emplacements de $0,335 \text{ m}^2$. Une bande de dalle est laissée libre en raison de la présence des boulons des tiges d'ancrage et pour éviter d'être trop proche du joint creux. Cette trame permet de définir une densité de 3 p/m^2 sur la grille.

Pendant les essais de foule, les 12 leaders étaient systématiquement en position C2 des dalles.



Figure 102 : Marquage au sol des dalles

Pour décrire les essais on utilisera le système de repérage suivant. On adopte une visualisation en se positionnant face au sud (Est à gauche et Ouest à droite sur la Figure 103).

D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
S												
C												
N												

Figure 103 : Repérage de positionnement d'Est en Ouest

4.2.3 Métrologie

4.2.3.1 Acquisition des données sur prototype

4.2.3.1.1 Implantation des capteurs

On compte les capteurs suivants instrumentant le prototype (Figure 104):

- 6 Accéléromètres sans fil LORD à acquisition indépendante
- 2 Capteurs de déplacement LVDT sur centrale CATMAN
- 2 Vélomètres sur centrale CATMAN
- 3 sondes de température sur centrale CATMAN : 1 air ambiant, 1 sur chaque amortisseur
- 2 fibres optiques raccordées à une centrale d'acquisition indépendante

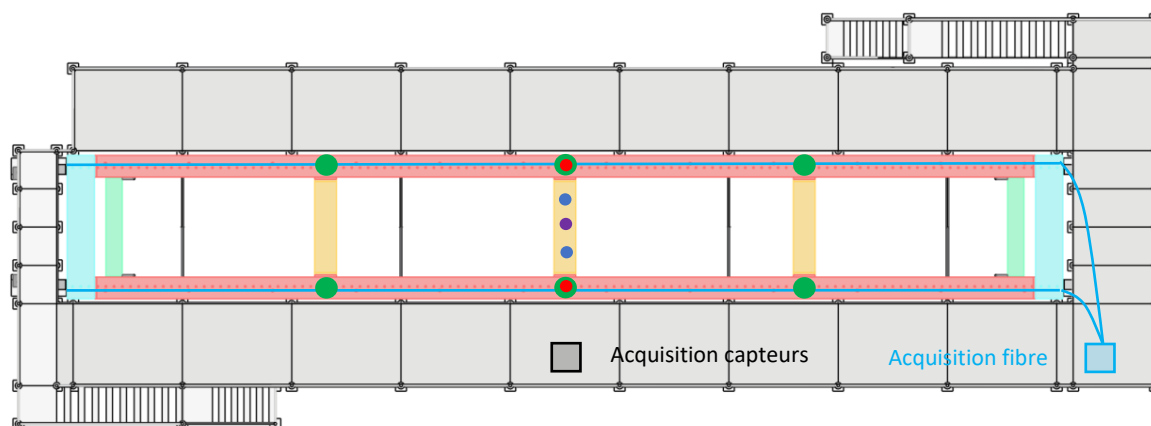


Figure 104 : Plan général d'implantation des capteurs



Figure 105 : Implantation générale des capteurs fixés sur la charpente

4.2.3.1.2 Accéléromètres LORD

On utilise six accéléromètres LORD sans fil d'une fréquence d'acquisition de 512 Hz (soit environ 2 ms). Le système d'acquisition est synchronisé pour les 6 capteurs mais indépendant de la centrale d'acquisition CATMAN. Les capteurs sont disposés précisément sur la semelle inférieure à l'intersection de l'âme des poutres longitudinales avec les âmes des traverses. Les capteurs nord et sud sont donc distants de 1,113 m à l'axe central du prototype. Les capteurs des traverses Est et Ouest sont à 4,38 m du milieu du prototype.

Les capteurs sont fixés tête en bas. Axe z vers le haut, axe x vers l'est, axe y vers le nord. L'accéléromètre fixé en sous-face et au repos indique une valeur de $9,76 \text{ m/s}^2$ en positif.

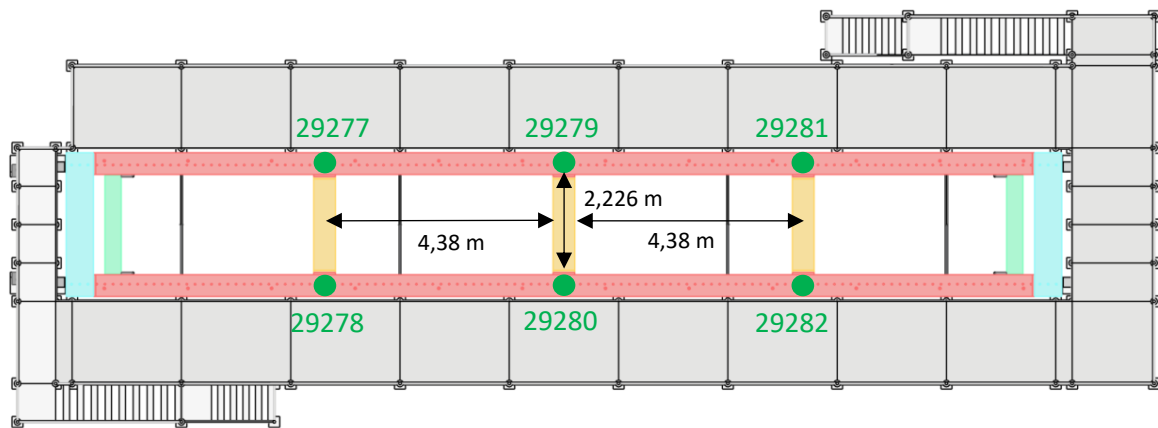


Figure 106 : Implantation des accéléromètres LORD



Figure 107 : Accéléromètre LORD au voisinage d'un capteur de déplacement LVDT sur pied

4.2.3.1.3 Capteurs de déplacement

On utilise deux capteurs de déplacement LVDT raccordés en filaire à la centrale CATMAN. Le capteur mesure en positif une longueur de rentrée de tige, donc un déplacement vertical vers le bas conduira à une augmentation en positif. La course limite est de 50 mm avec une rentrée de tige initiale de 15 mm.

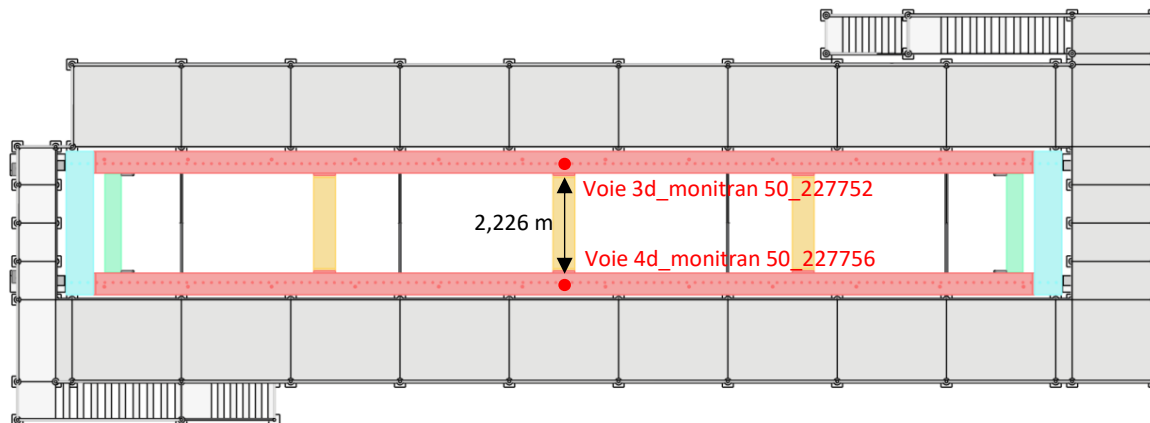


Figure 108 : Implantation des capteurs de déplacement LVDT

4.2.3.1.4 Vélocimètres

On utilise deux vélocimètres raccordés en filaire à la centrale CATMAN. Ils servent à mesurer directement la vitesse de la platine supérieure de l'amortisseur associé.



Figure 109 : Vélocimètre

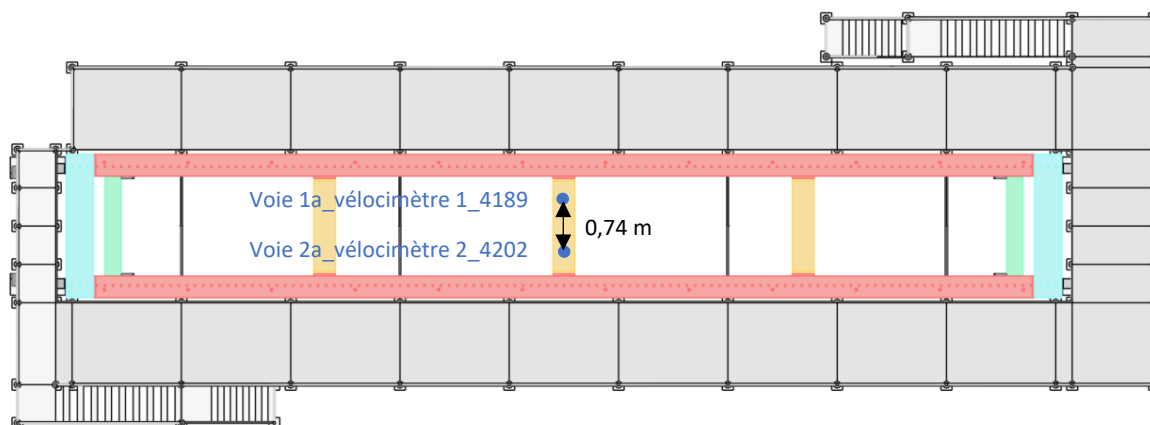


Figure 110 : Implantation des vélocimètres

4.2.3.1.5 Sondes de température

3 sondes de température sont raccordées à la centrale d'acquisition CATMAN. Une première sonde de température permet d'obtenir la température ambiante sous le prototype et deux sondes de température sont fixées au niveau d'un creux central des ailettes de refroidissement des amortisseurs.



Figure 111 : Positionnement des sondes de température

4.2.3.1.6 Centrale d'acquisition CATMAN

La centrale d'acquisition CATMAN est située sous la travée centrale de l'échafaudage sud. Elle présente une fréquence d'acquisition de 500 Hz.

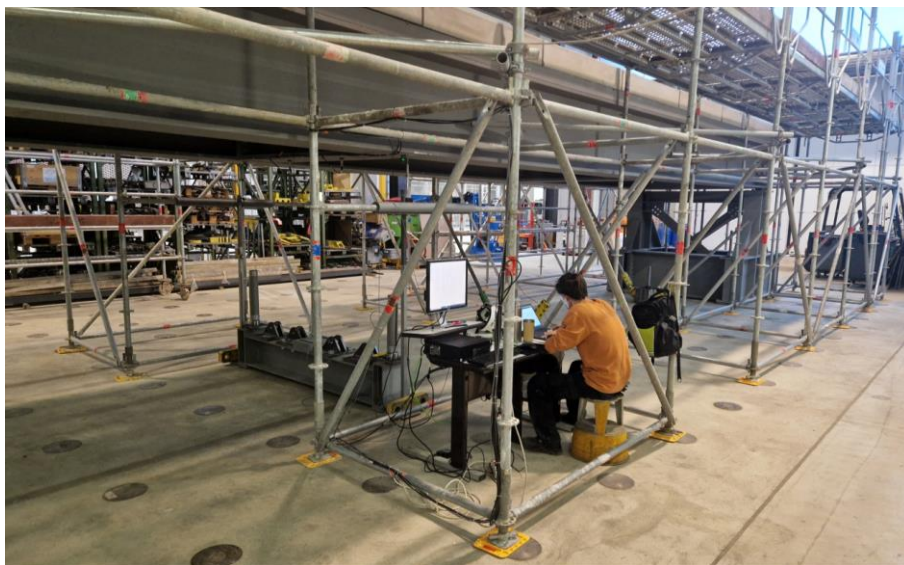


Figure 112 : Centrale d'acquisition et poste de mesure de l'instrumentation sur prototype

4.2.3.1.7 Fibre optique

Deux fibres optiques sont fixées sur le ferrailage sur le dernier acier de la dernière maille extérieur au goujon en treillis supérieur.

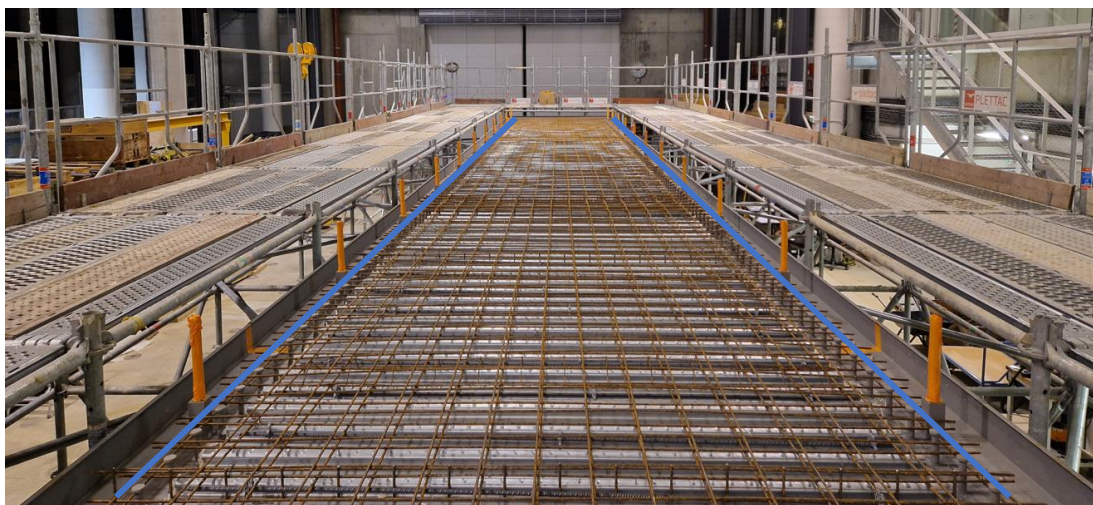


Figure 113 : Fixation des fibres actives sur le ferrailage

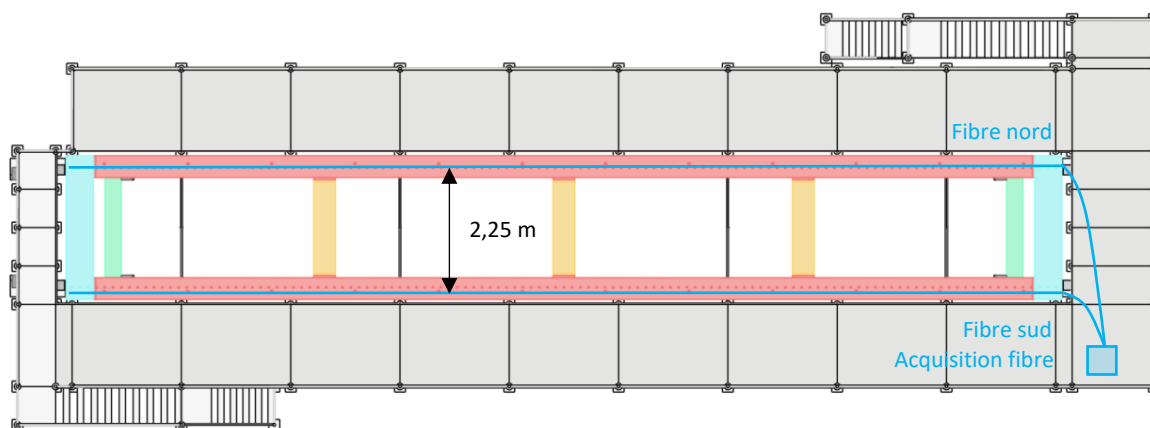


Figure 114 : Implantation des fibres actives et de l'acquisition



Figure 115 : Extrémité des fibres en attente après coulage et centrale d'acquisition de la fibre

4.2.3.2 Acquisition des données des participants

Il existe de nombreux systèmes d'acquisition expérimentale de l'action des individus [67]. Ces systèmes peuvent être directs ou indirects, plus ou moins intrusifs, précis ou onéreux. Les systèmes retenus pour l'expérience sont présentés en tenant compte des avantages et inconvénients respectifs.

4.2.3.2.1 Balance

La masse des participants aux essais a été obtenue avec une balance du commerce étalonnée. La balance est de marque OKOÏA d'une capacité de 150 kg avec une sensibilité de 0,1 kg.

4.2.3.2.2 Plaques de forces

Pour les essais, 12 paires de plaque de force K-Force de Kinvent ont été acquises. Le nombre a été limité par économie mais de sorte à en avoir à minima une par dalle pour chaque leader durant les essais de foule ou suffisamment pour instrumenter un groupe de 12 personnes centré sur le prototype. Afin de permettre le saut sans se blesser ou être perturbé par la réception, un cadre en mousse nommé « Plate Frame » a été mis en place avec les plaques.

L'acquisition se faisait par tablette grâce à une application Kinvent PHYSIO récupérant les données via bluetooth. L'acquisition n'était pas synchronisée et chaque paire de plaque de force devait bénéficier de sa tablette, dans notre cas des Samsung Galaxy Tab 10.1 wifi fonctionnant sous android. L'application a été initialement conçue pour des exercices médicaux ou pour l'entraînement de sportifs avec des exercices simples ou de répétition. Le module utilisé pour le saut était le module « tirage isométrique à mi-cuisse » pour permettre l'acquisition sur une durée de plusieurs dizaines de seconde d'une activité de type saut ou de balancement vertical.

Les données brutes sont disponibles sous format .csv à une fréquence de 200 Hz (fréquence ajustable dans les paramètres). Chaque plaque d'un couple est dédiée à instrumenter un pied. Chaque plaque comporte 4 capteurs donnant une valeur de masse en kg. On peut donc remonter au poids total ou au poids exercé par chaque pied en sommant les valeurs de capteurs et en multipliant par l'accélération de la gravité.

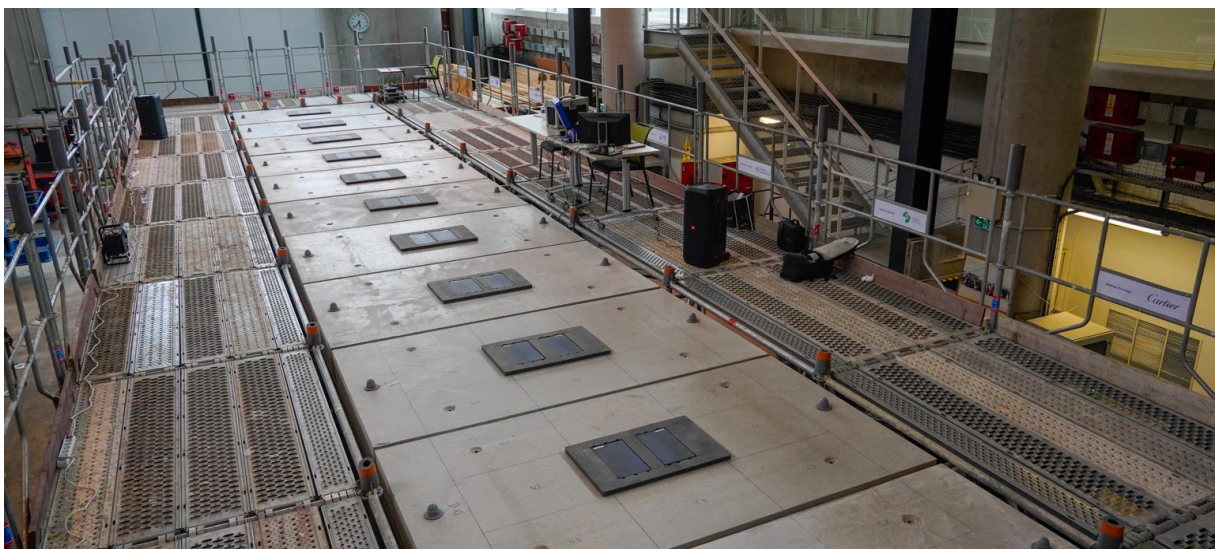


Figure 116 : Plaques de force K-Force de Kinvent et cadre de protection pour le saut

Une plaque de force K-Delta de plus grande taille a également été acquise pour faire des tests de vérification individuels a posteriori des essais (Figure 117). Elles sont plus grandes que les K-Force, donc plus adaptés à des sauts répétitifs sans se préoccuper de la réception et peuvent supporter des chargements encore plus importants (jusqu'à 35 kN contre 5,9 kN pour les K-Force).

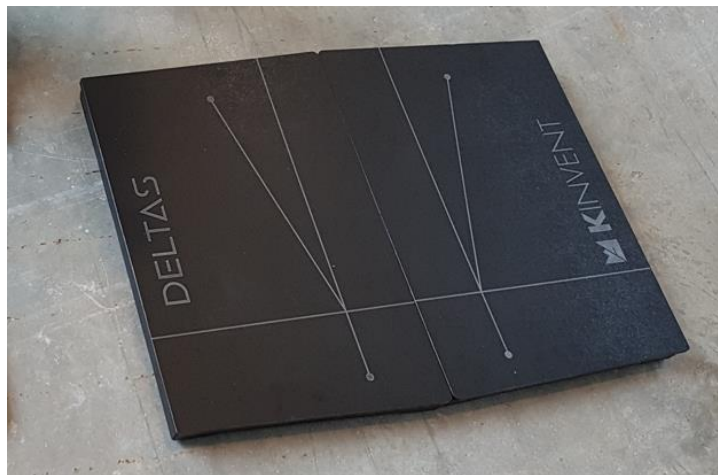


Figure 117 : Plaques de force K-Deltas de Kinvent

4.2.3.2.3 Accéléromètres COMETA

Les plaques de force étant un système de mesure direct de la force exercée sur le sol, il a été souhaité de comparer l'acquisition de l'action avec un système de mesure indirecte. Cela consiste à mesurer l'accélération au niveau de la 7^{ème} vertèbre comme proposé par McDonald et Zivanovic [4] et à multiplier ensuite par la masse de la personne.

Un système d'acquisition wavetrack_4 de COMETA accompagné de 12 centrales inertielles a été utilisé. La centrale d'acquisition peut fonctionner jusqu'à 16 capteurs avec acquisition synchronisée. Chaque centrale est équipée de trois capteurs triaxiaux : un accéléromètre, un magnétomètre et un gyroscope.



Figure 118 : Centrale inertielle fixée par adhésif et centrale d'acquisition COMETA

L'autonomie des centrales inertielles était de 8 h environ et le champ d'acquisition était de 50 m (sans obstacles). Les centrales inertielles pèsent 10 g pour une dimension de 33 x 25 x 7 mm.

Les caractéristiques des capteurs utilisés sont les suivantes :

Accéléromètre :

- Etendue de mesure : +/-2 g, +/-4 g, +/-8 g et +/-16 g
- Résolution 16 bits
- Fréquence d'échantillonnage : 286 Hz

Gyroscope :

- Etendue de mesure : +/-250 dps, +/-500 dps, +/-1000 dps et +/-2000 dps
- Résolution 16 bits
- Fréquence d'échantillonnage : 286 Hz

L'acquisition est visualisable en temps réel via le logiciel « EMG and Motion tools » version 8.7.6.0 de COMETA. Les résultats bruts des capteurs triaxiaux peuvent être exportés sous format texte et sont disponibles à une fréquence de 2000 Hz. Le boîtier WavePlus va récupérer des données à une fréquence de 2000 Hz, tandis que les IMU vont récolter des données à une fréquence de 286 Hz. Pour combler les trous dans les données des IMU (accéléromètre, etc.), le logiciel va calculer des valeurs théoriques entre chaque valeurs "réelle" des IMU. Ces valeurs sont donc théoriques et non mesurée. Si l'on souhaite avoir uniquement les valeurs accélérométriques qui ont été mesurées à la fréquence d'acquisition des IMU (286 Hz) il faut donc prendre une valeur sur 7 dans les données.

Pour chaque essai, 10 capteurs sur 10 participants actifs ont été utilisés. Pour les essais de foule, il s'agissait des leaders des dallettes 2 à 11. Les deux capteurs COMETA restants ont servi à la synchronisation globale de l'acquisition. Cela permet de faire le lien entre l'acquisition de la sollicitation et de la réponse. Tous les capteurs non synchronisés ont été recalés sur les capteurs COMETA manuellement. 2 accéléromètres étaient donc fixés par adhésif à côté des accéléromètres LORD centraux en sous face des poutres acier. Pour les essais de groupe, il s'agissait des capteurs 11 (nord) et 12 (sud) et pour les essais de foule, il s'agissait des capteurs 1 (sud) et 12 (nord). L'axe x a été orienté de manière identique aux accéléromètres LORD c'est-à-dire dans l'axe longitudinal vers l'Est.



Figure 119 : Emplacement des capteurs de synchronisation pendant le test H2 du 13/04/2023

4.2.3.2.4 Caméras

Des caméras GO PRO HERO 10 ont été utilisées pour filmer les essais. Plusieurs positions ont été envisagées, notamment sur les échafaudages mobiles afin d'avoir le maximum de recul. Mais pour éviter de voir les garde-corps, il a été préféré de fixer trois caméras sur le garde-corps nord de l'échafaudage en utilisant un angle large. Cela permet de filmer toute la dalle par léger recouvrement. Une quatrième caméra a été placée sur la main courante de l'escalier d'accès aux bureaux afin de filmer l'ensemble de la scène de $\frac{3}{4}$ face en contre-plongée.

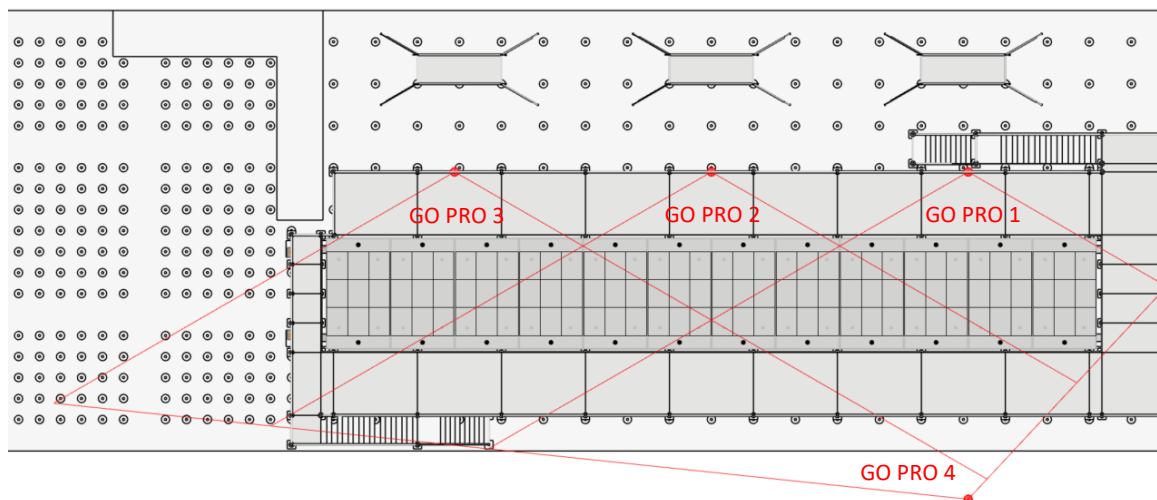


Figure 120 : Positionnement des caméras GOPRO (angle de vue large d'environ 120°)

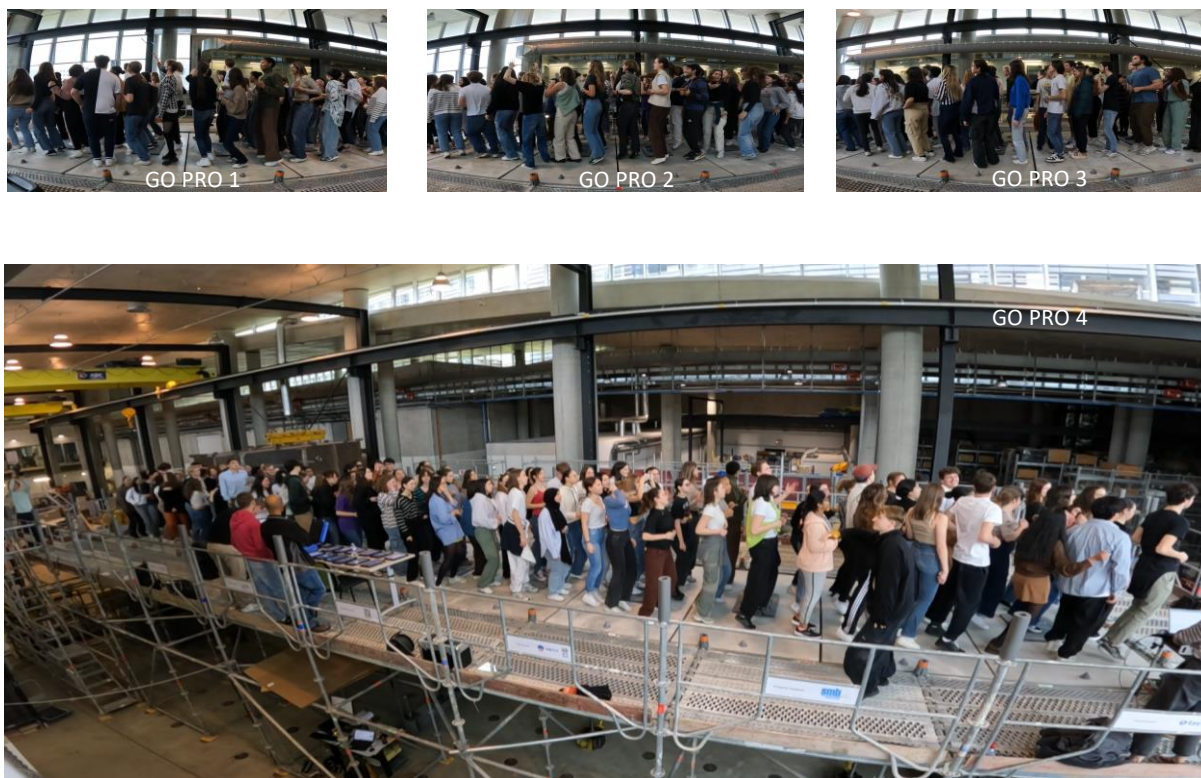


Figure 121 : Vues depuis les caméras fixes

4.2.3.2.5 Fiches de ressenti et de motricité

Pour les essais actifs, la fiche de ressenti a été remplie à la fin de chaque test par les 12 leaders pour les essais de foule ou les 12 participants pour les essais de groupe.

Les informations renseignées sur la fiche sont les suivantes :

N° du test :	
Date et heure :	
Case sur dalle :	
Plaque de force :	
Accéléromètre :	

INDICE DE CONFORT :

Entourer le chiffre correspondant (vert confort / rouge inconfort)

1	2	3	4	5	6	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---

Questions :	Oui	Non
J'ai perçu la vibration mais tout va bien		
Cela m'a perturbé un peu mais c'était supportable		
Cela m'a beaucoup gêné		
J'ai eu envie de quitter la dalle		

INDICE DE MOTRICITE :

Questions :	Oui	Non
Je connais la musique diffusée		
J'aime la musique diffusée		
Le signal sonore m'a donné envie de bouger		
J'ai eu envie de me balancer (flexion des genoux sans décollement pieds)		
Je me suis balancé		
J'ai eu envie de sautiller (décollement du talon du sol)		
J'ai sautillé		
J'ai eu envie de sauter (décollement complet des pieds du sol)		
J'ai sauté		
J'ai bougé naturellement sans avoir à me concentrer		
Je suis bien arrivé à suivre le tempo de la source sonore		
J'ai été gêné par la vibration du support dans mon mouvement		
J'ai le sentiment d'avoir été coordonné avec l'action du groupe		
Je suis fatigué à la fin du test		

COMMENTAIRES : Impressions générales / comportement personnel / relation aux autres

4.3 Déroulement général des essais

Les essais se sont organisés en quatre grandes phases successives s'étalant sur cinq mois de janvier à mai 2023. Ces dates ont été soumises parfois à des aléas de contexte social national et de fabrication.

Phase	Date	Type
1	11/01 et 12/01/23	Caractéristiques modales avec exciteur sans amortisseurs
2	23/01 et 24/01/23	Essais de groupes sans amortisseurs
3	10/03/23	Caractéristiques modales avec exciteur et avec amortisseurs
4	16/03, 13/04 et 20/04/23	Essais de foule avec et sans amortisseurs

Tableau 66 : Différentes phases d'essais

4.3.1 Phase 1 : Caractérisation modale avec exciteur et sans amortisseurs

Ces premiers essais se sont déroulés sur deux jours les 11 et 12 janvier 2023. Le premier jour, les tests 1 et 2 ont consisté à caractériser le prototype à vide. 5 courbes de réponse fréquentielle pour des amplitudes d'excitation différentes ont été tracées ainsi qu'une courbe complémentaire avec une amplitude de répétition en fin de test. Le lendemain, les tests ont été réalisés avec 39 étudiants (S3 + S5) et un enseignant de l'ENSAPVS. Le test 3 consistait à étudier les caractéristiques modales du prototype avec 40 personnes réparties sur l'ouvrage. De la même manière que pour les tests à vide, 6 courbes de réponse en fréquences ont été tracées. Les 40 participants ont ensuite été regroupés au centre de l'ouvrage pour faire un test 3bis de ressenti. Ils ont été exposés à 8 niveaux d'accélération dans un ordre aléatoire. Le test 4 consistait à établir les caractéristiques modales avec les 40 participants en situation de marche avec le tracé de 6 courbes de réponse en fréquence. Un dernier test 5 de perception des vibrations a été organisé en début d'après-midi avec un groupe de 18 participants centrés sur l'ouvrage. Il s'agissait d'exposer les participants à 8 niveaux de vibration d'amplitudes différentes et aléatoires. Une courbe de réponse en fréquence pour une sollicitation moyenne a été tracée afin de comparer les caractéristiques modales avec la configuration à 40 participants statiques répartis.

Test	Date	Type
1	11/01/23 AM	Caractéristiques modales sans dalles
2	11/01/23 PM	Caractéristiques modales avec dalles
3	12/01/23 AM	Caractéristiques modales avec 40 personnes statiques
3bis	12/01/23 AM	Test de ressenti avec 40 personnes centrées statiques
4	12/01/23 AM	Caractéristiques modales avec 40 personnes en marche
5	12/01/23 PM	Test de ressenti avec 18 personnes centrées statiques

Tableau 67 : Essais avec exciteur sans amortisseurs

4.3.2 Phase 2 : Essais de groupes sans amortisseurs

Ces essais de groupe ont été réalisés de sorte à tester la capacité des participants à mettre en résonance le prototype par une activité de type balancement vertical (flexion des genoux en maintenant le contact avec le support) ou de saut. Le fait de se limiter à un petit nombre de participants a permis de mieux contrôler l'exécution des essais tout en les instrumentant tous afin de pouvoir obtenir une relation précise entre excitation et réponse. De plus, cela a permis de commencer avec des amplitudes faibles étant donné la non-disponibilité des amortisseurs et notre réserve à immédiatement explorer la réponse à plus hautes vibrations avec une foule.

Les essais réalisés ont été détaillés au § 5.2.1. Le Tableau 68 et le Tableau 69 regroupent les principales séries de tests réalisées avec les étudiants S5 et S3. Il est important de souligner que ces essais devaient initialement être bien éloignés dans le temps pour permettre d'améliorer les techniques d'acquisition entre les deux jours de test qui avaient valeur d'entraînement pour les essais de foule. A cause d'un contexte de grèves impactant les transports, il a fallu s'adapter en réalisant les tests avec les deux groupes d'étudiants sur deux jours consécutifs. Malgré ce climat peu propice, une nette amélioration des procédures a été notée.

Etant donné que les différents matériels d'acquisition sont gérés chacun par un système différent, délicat à piloter et impossible à gérer par une seule personne, il a fallu répartir les différentes tâches que sont la coordination des participants et la gestion des différents systèmes d'acquisition pour un enregistrement le plus optimal possible.

Série S5	Date	Type
A	23/01/23 AM	Balancement vertical avec métronome à 12
C	23/01/23 AM	Balancement vertical en musique à 12
S	23/01/23 AM	Spécial / Excitation libre en musique à 17
E	23/01/23 PM	Saut avec métronome à 11
F	23/01/23 PM	Saut en musique à 10
S	23/01/23 PM	Spécial / Excitation libre en musique à 10

Tableau 68 : Essais de groupe avec les étudiants S5

Série S3	Date	Type
A	24/01/23 AM	Balancement vertical avec métronome à 12
E	24/01/23 AM	Saut avec métronome à 12
C	24/01/23 PM	Balancement vertical en musique à 12
F	24/01/23 PM	Saut en musique à 12
S	24/01/23 PM	Spécial / Excitation libre en musique à 13
S	24/01/23 PM	Spécial / Saut avec métronome à 16

Tableau 69 : Essais de groupe avec les étudiants S3

4.3.3 Phase 3 : Caractérisation modale avec exciteur et amortisseurs

En raison d'un aléa sur la fabrication des amortisseurs aux Etats-Unis, les test 6 et 7 ont dû être décalés (Tableau 70). Ils ont consisté en la caractérisation modale à vide du prototype équipé des deux amortisseurs. 5 courbes de réponse en fréquence d'amplitude variable ont été tracées pour chaque test avec une courbe de répétition additionnelle à faible amplitude mais uniquement pour le test 7.

Test	Date	Type
6	10/03/23 PM	Caractéristiques modales sans dalles et avec amortisseur
7	10/03/23 AM	Caractéristiques modales avec dalles et avec amortisseur

Tableau 70 : Essais avec exciteur et amortisseurs

4.3.4 Phase 4 : Essais de foule avec et sans amortisseurs

Les essais avec les étudiants S2 (Tableau 71) n'ont pu être réalisés qu'une fois le comportement du prototype complètement cerné par la caractérisation modale avec exciteur lors des précédents tests.

Ces essais se sont déroulés sur deux jours et une après-midi, respectivement le 16 mars, le 13 avril et le 20 avril 2023. Les tests ont été organisés de sorte à garder constante la motivation des étudiants. A cette fin, les trois sessions d'essais ont notamment été espacées dans le temps d'au moins une semaine. En effet, une baisse de motivation viendrait biaiser les résultats.

Série S2	Date	Type
A	16/03/23	Balancement vertical avec métronome à 102 avec amortisseurs
F		Saut en musique à 102 avec amortisseurs
S		Spécial / Saut avec métronome à 102 avec amortisseurs
G	13/04/23	Essais de coordination au métronome de 12 à 97 avec amortisseurs
E		Saut avec métronome à 97 avec amortisseurs
H		Essais de coordination au métronome de 12 à 95 sans amortisseurs
M		Essais de marche et d'applaudissement à 49 sans amortisseurs
F	20/04/23	Excitation libre en musique à 108 avec amortisseurs
CAR AA		Saut au métronome de 81 à 16 avec amortisseurs
CAR SA		Saut au métronome de 81 à 16 sans amortisseurs

Tableau 71 : Essais de foule avec les étudiants S2

Chapitre 5

Dans ce chapitre, les principaux résultats d'essais sont présentés. Les essais avec excitateur menés avec la participation de l'Université de Liège permettent d'identifier les caractéristiques dynamiques du plancher à vide avec et sans amortisseurs en fonction de l'amplitude de vibration. La modification des caractéristiques dynamiques en présence de public et sans amortisseurs est également étudiée. On termine avec la présentation détaillée des essais de groupe et de foule. Une synthèse des mesures de l'action exercée par les personnes et de la réponse en accélération du prototype est réalisée.

5 Analyse des résultats d'essai

5.1 Excitation mécanique et identification des caractéristiques dynamiques

5.1.1 Caractéristiques dynamiques à vide

5.1.1.1 Résultats d'essais

5.1.1.1.1 Essai sans dallettes (Test 1)

Un premier test a été réalisé sans dallettes de surcharge. Celles-ci servent à représenter le poids mort embarqué sur l'ouvrage de référence (Faux-plafond, réseaux divers, équipements, revêtement de sol). 5 niveaux de sollicitation de consigne au shaker (23 mg, 92 mg, 250 mg, 394 mg, 600 mg) ont été choisis pour tracer les FRF correspondantes. Le niveau de sollicitation de 250 mg a été rajouté en cours de mesure pour obtenir un point de mesure intermédiaire. Un niveau de sollicitation à bas niveau de 92 mg a été reconduit à chaque fin de test pour vérifier les propriétés modales après forte sollicitation.

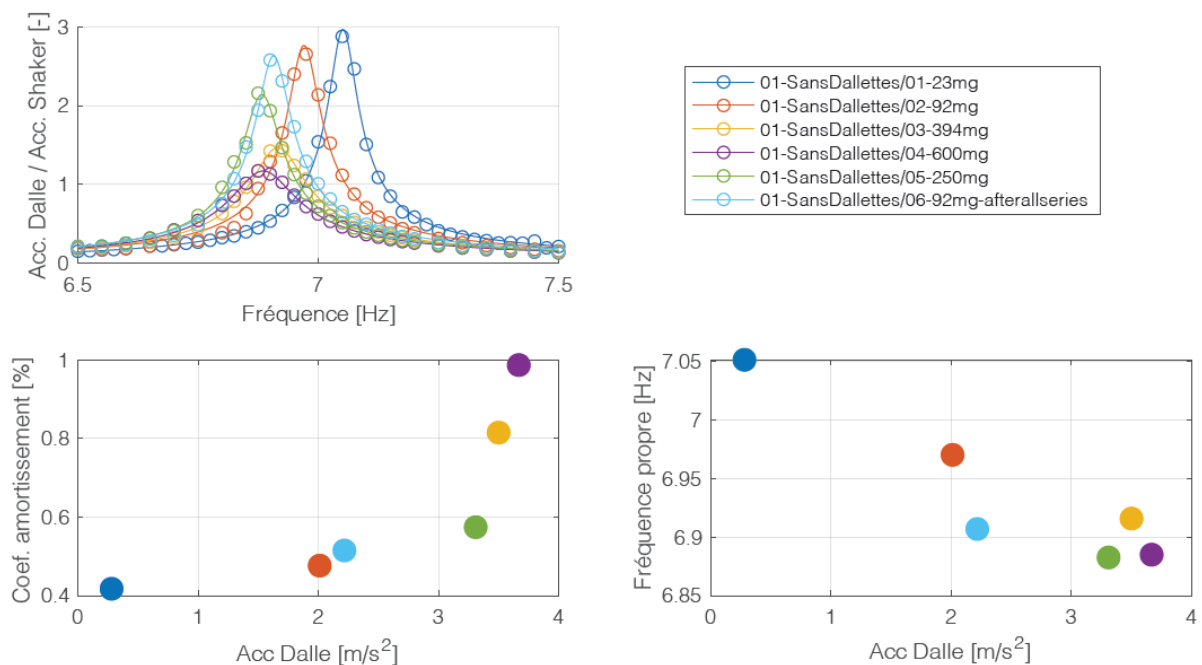


Figure 122 : Propriétés modales du prototype sans dallettes et à vide de public (Données ULiège)

FRF	a_{\max} [m/s ²]	Amortissement [%]	Fréquence [Hz]	Masse modale [t]
01_23mg	0,280	0,42	7,05	12,9
02_92mg	2,012	0,48	6,97	12,1
03_394mg	3,500	0,81	6,92	13,4
04_600mg	3,668	0,99	6,89	13,9
05_250mg	3,309	0,57	6,88	13,0
06_92mg	2,217	0,52	6,91	11,8

Tableau 72 : Propriétés modales du prototype sans dallettes et à vide de public (Données ULiège)

L'amortissement augmente avec l'amplitude de vibration. On passe de 0,42% à bas niveau à 0,99% à haut niveau. Le test de répétabilité à 92 mg montre que l'amortissement ne fluctue pas notablement.

5.1.1.1.2 Essai avec dallettes (Test 2)

On réalise un deuxième essai identique au précédent mais en installant les dallettes de surcharge sur le plancher. On détermine les FRF pour les 5 mêmes niveaux de sollicitation croissants cette fois-ci avec un test de répétabilité en fin de séquence.

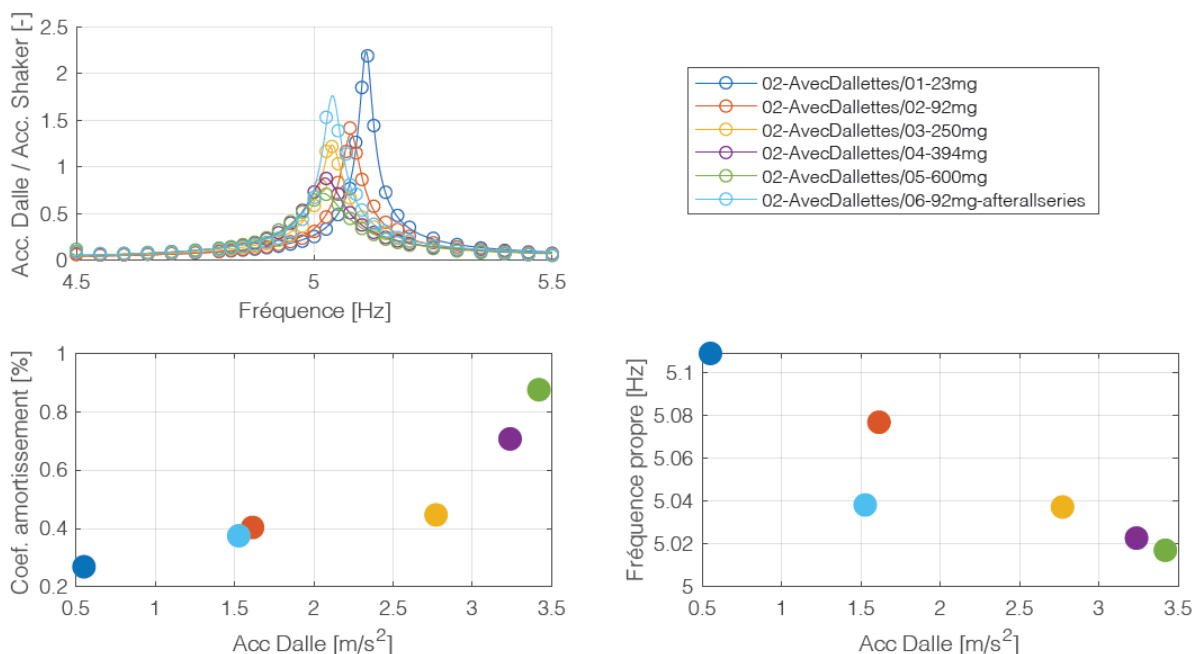


Figure 123 : Propriétés modales du prototype avec dallettes et à vide de public (Données ULiège)

FRF	a_{\max} [m/s ²]	Amortissement [%]	Fréquence [Hz]	Masse modale [t]
01_23mg	0,551	0,27	5,11	26,6
02_92mg	1,614	0,40	5,08	29,3
03_250mg	2,771	0,45	5,04	29,0
04_395mg	3,238	0,71	5,02	25,6
05_600mg	3,419	0,88	5,02	25,5
06_92mg	1,527	0,37	5,04	24,2

Tableau 73 : Propriétés modales du prototype avec dallettes et à vide de public (Données ULiège)

L'amortissement est plus faible que pour l'essai précédent à amplitude comparable. On passe de 0,27% à bas niveau à 0,88% à haut niveau.

On a des valeurs d'amortissement assez faibles à bas niveau qui s'expliquent par le fait que la contribution de la dalle béton dans la rigidité est assez faible par rapport à l'acier et du fait qu'il s'agisse d'assemblages boulonnés précontraints.

5.1.1.2 Identification des modes propres

5.1.1.2.1 Identification modale et comparaison au modèle aux éléments finis

Un modèle aux éléments finis 3D à plaques a été réalisé avec le logiciel SCIA Engineer pour étudier la forme des premiers modes. Le premier mode est un mode de flexion à un ventre. Il est annoncé à 4,58 Hz dans la configuration avec dallettes.

Déplacements 3D

Valeur: U_{total}
 Les formes modales sont normalisées de telle façon que la masse généralisée de chaque mode est égale à 1kg.
 Combinaison masse: Avec G' A vide/1
 - 4,58
 Sélection: Tout
 Position: Aux noeuds, moyenne.
 Système: Global

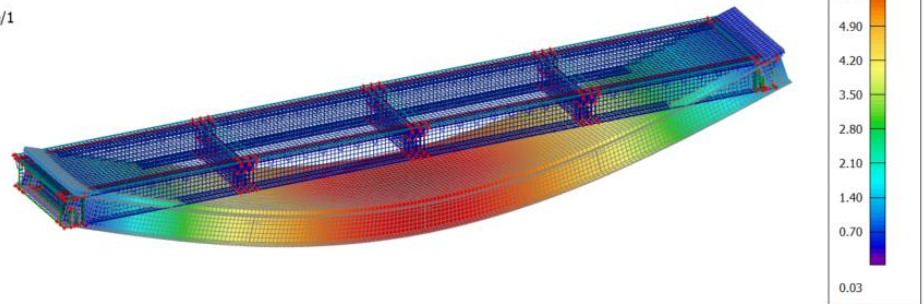


Figure 124 : Mode 1 du prototype aux éléments finis 3D

Le deuxième mode est un mode antisymétrique de torsion annoncé à 7,30 Hz avec dallettes.

Déplacements 3D

Valeur: U_{total}
 Les formes modales sont normalisées de telle façon que la masse généralisée de chaque mode est égale à 1kg.
 Combinaison masse: Avec G' A vide/2
 - 7,30
 Sélection: Tout
 Position: Aux noeuds, moyenne.
 Système: Global

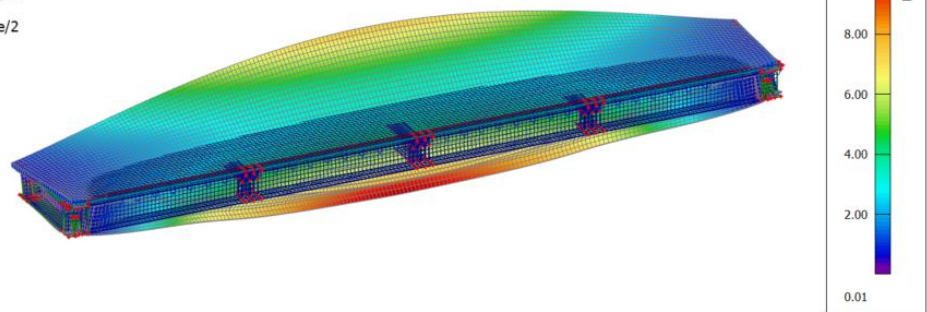


Figure 125 : Mode 2 du prototype aux éléments finis 3D

Le troisième mode présente une déformée similaire avec une fréquence de 9,74 Hz avec dallettes.

Déplacements 3D

Valeur: U_{total}
 Les formes modales sont normalisées de telle façon que la masse généralisée de chaque mode est égale à 1kg.
 Combinaison masse: Avec G' A vide/3
 - 9,74
 Sélection: Tout
 Position: Aux noeuds, moyenne.
 Système: Global

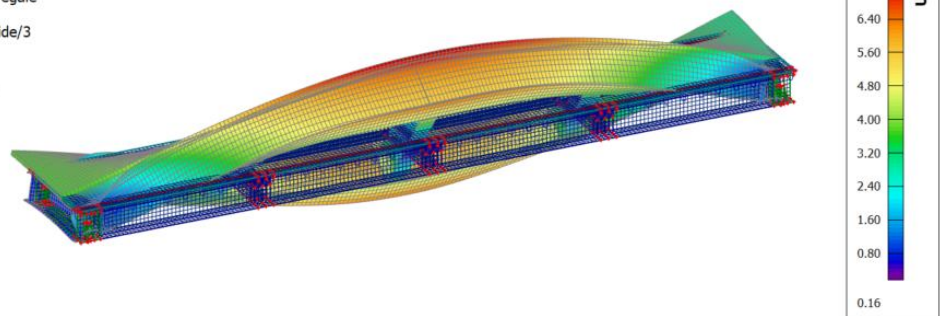


Figure 126 : Mode 3 du prototype aux éléments finis 3D

Enfin le quatrième mode est le mode de flexion à deux ventres annoncé à 14,46 Hz avec dallettes.

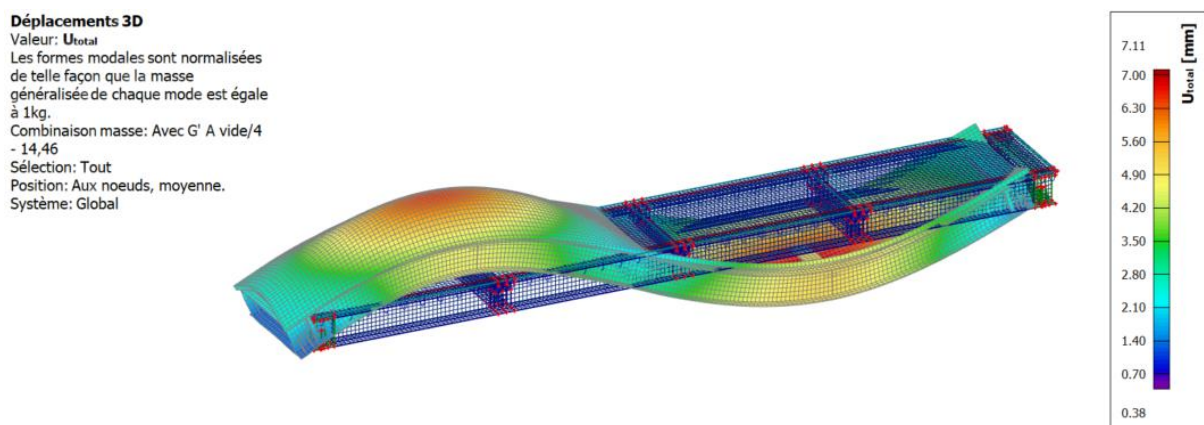


Figure 127 : Mode 4 du prototype aux éléments finis 3D

Afin de vérifier les modes, on se base sur les déformations des fibres optiques noyées dans la dalle mesurées pour l'essai S1 du 23/01/2023 (Tableau 99 : saut en musique à 2,15 Hz de 17 personnes au centre du prototype). L'acquisition des données a été réalisée par le laboratoire COSYS/IMSE de l'Université Gustave Eiffel (Figure 128).

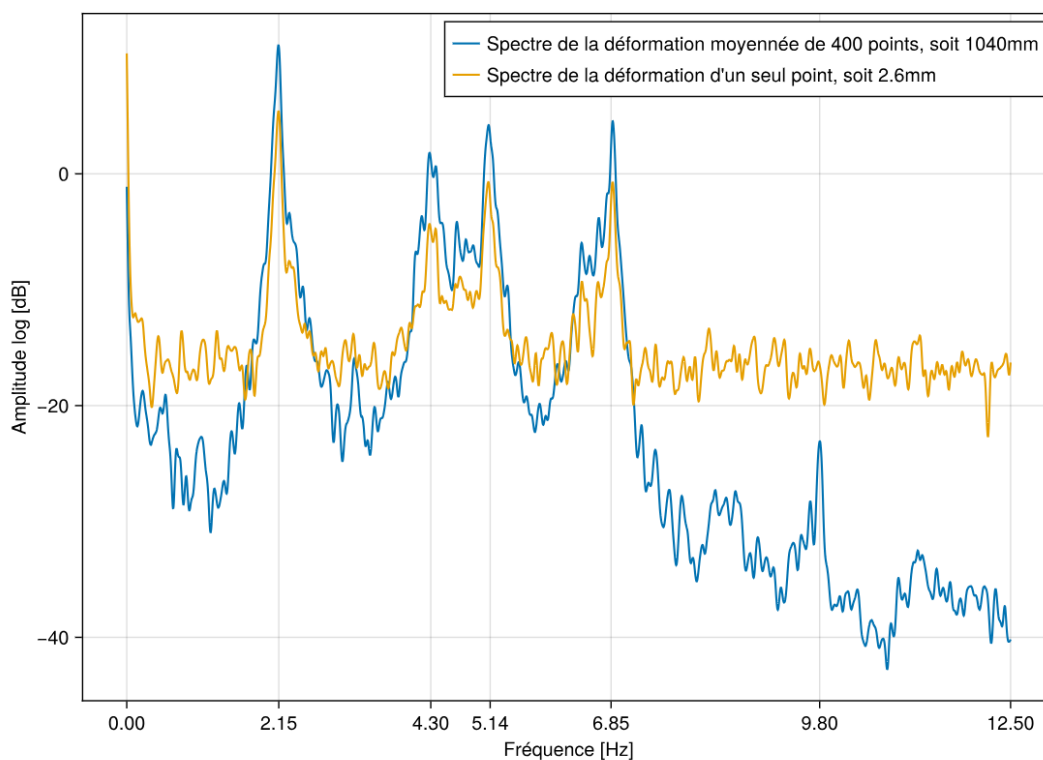


Figure 128 : Déformation de la fibre nord durant l'essai S1 du 23/01 (Données COSYS/IMSE)

On identifie les éléments suivants :

- 2,15 Hz : 1^{ère} harmonique de l'excitation forcée
- 4,30 Hz : 2^{ème} harmonique de l'excitation forcée
- 5,14 Hz : Mode 1, flexion à un ventre
- 6,85 Hz : Mode 2, torsion
- 9,80 Hz : Mode 3, torsion

Avec la FFT de la déformation différentielle entre fibres optiques nord et sud on peut identifier si le mode est symétrique ou antisymétrique (Figure 129). Les modes 2 et 3 identifiés sont bien antisymétriques car le spectre de la différence est supérieur au spectre de la moyenne. Cela confirme l'hypothèse de modes de torsion.

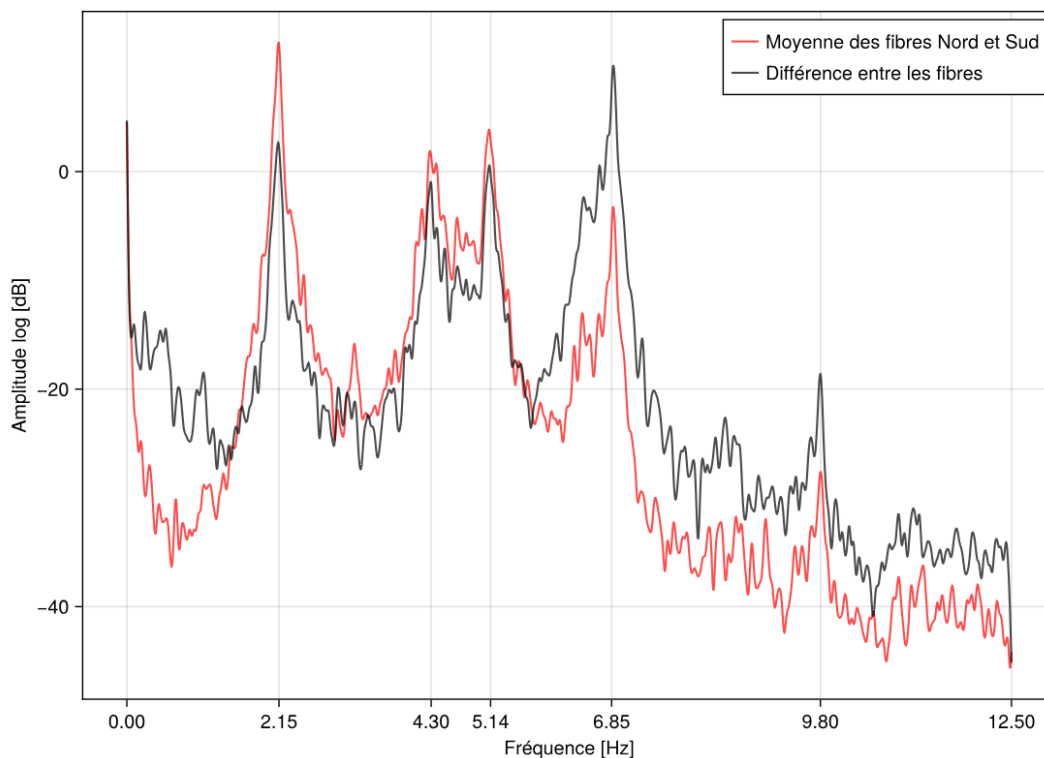


Figure 129 : Déformation moyenne et différentielle entre fibres optiques (Données COSYS/IMSE)

La fréquence du mode 1 (Tableau 74) obtenue avec la fibre est proche de celle estimée avec les essais avec excitateur. La fréquence propre du modèle EF est donc bien sous-estimée. Pour le mode 2 et le mode 3, on est proche des fréquences identifiées avec le modèle de calcul. Néanmoins il convient d'être prudent étant donné les approximations de modélisation de la connexion poutres dalles dans le sens transversal pour ces modes de torsion.

Modes		Mode 1	Mode 2	Mode 3
		Flexion	Torsion	Torsion
Modèle EF SCIA Engineer	f [Hz]	4,58	7,30	9,74
FFT Fibres essai S1 23/01	f [Hz]	5,14	6,85	9,80
Ecart	Δ [Hz]	0,56	-0,45	0,06
	%	11%	-7%	1%

Tableau 74 : Comparaison des fréquences propres entre mesures avec fibres et modèle EF

5.1.1.2.2 Estimation analytique affinée de la première fréquence propre

La fréquence propre du mode 1 obtenue par modélisation EF est plus faible que celles mesurées pour le premier mode avec excitateur mécanique ou avec fibres. Cela peut s'expliquer en partie par la modélisation approchée de la dalle au chapitre 4 qui ne tient pas compte des armatures ou du bac acier. Afin d'affiner l'estimation, on propose de réaliser un calcul analytique. On retient les paramètres des matériaux exposés au paragraphe précédent en utilisant le module d'Young dynamique du béton basé sur la résistance caractéristique estimée par essais sur éprouvettes (Tableau 75).

Module d'Young de l'acier	E_a [GPa]	210
Résistance caractéristique du béton (Tableau 64)	f_{ck} [MPa]	30
Module d'Young statique	E_{cm} [GPa]	33
Module d'Young dynamique [63]	$E_{cm,d}$ [GPa]	43

Tableau 75 : Caractéristiques des matériaux du prototype

On considère une portée réduite de 4 cm en raison des appuis à grains. On peut envisager que le contact en flexion se fera sur la tranche intérieure. Concernant la hauteur du platelage, il s'agit d'un plancher collaborant de 12 cm avec un bac de 4 cm de hauteur d'onde dont l'épaisseur équivalente correspond à une dalle de 11 cm.

Portée	L [m]	17,68
Bande participante	b_{eff} [m]	1,31
Hauteur équivalente de béton	h_c [m]	0,110
Hauteur équivalente du bac acier	h_p [m]	0,010
Section béton utile	A_b [m ²]	0,14
Inertie propre béton	I_b [m ⁴]	1,46E-04

Tableau 76 : Caractéristiques géométriques du prototype

On tient compte également des armatures de la dalle dans le sens longitudinal (sens contribuant à l'inertie de la section). On a disposé un treillis ST25C en partie supérieure et un treillis ST25C d'anti-poinçonnement juste au-dessus des ondes du bac acier (Tableau 77).

Section d'armatures supérieures dans la section efficace	$A_{s_{sup}}$ [m ²]	3,37E-04
Position / face supérieure de la dalle	d [m]	2,00E-02
Section d'armatures inférieures dans la section efficace	$A_{s_{inf}}$ [m ²]	3,37E-04
Position / face supérieure de la dalle	d [m]	7,00E-02

Tableau 77 : Ferrailage du prototype

On tient compte également du bac acier cofrastra 40 d'épaisseur 0,88mm même si sa contribution est minime (Tableau 78). En effet celui-ci est orienté perpendiculairement aux poutres.

Epaisseur bac acier	e_{bac} [m]	8,80E-04
Section bac acier dans la section efficace	A_{bac} [m ²]	1,16E-03
Inertie du bac acier	I_{bac} [m ⁴]	7,46E-11
Axe neutre / face supérieure	y_{bac} [m]	1,17E-01

Tableau 78 : Bac acier du prototype

On tient compte de la costière qui est solidaire de la poutre (Tableau 79).

Aire de costière	A_{cos} [m ²]	4,92E-04
Inertie de la costière	I_{cos} [m ⁴]	9,36E-07
Axe neutre de la costière / face supérieure	y_{cos} [m]	8,20E-02

Tableau 79 : Costières du prototype

Le profilé acier longitudinal étant décrit de la manière suivante (Tableau 80) :

Largeur semelle sup acier	b_f [m]	0,400
Épaisseur semelle sup acier	t_f [m]	0,030
Épaisseur de l'âme acier	t_w [m]	0,012
Hauteur section acier	h_a [m]	0,750
Section acier	A_a [m ²]	0,032
Inertie propre acier	I_a [m ⁴]	3,44E-03

Tableau 80 : Poutres longitudinales du prototype

On en déduit Tableau 81 les paramètres de calcul de la section mixte correspondante :

Coefficient d'équivalence	n	4,91
Aire mixte par rapport à l'acier	A_m [m ²]	0,064
Position de l'axe neutre élastique / face sup	$y_{el,sup}$ [m]	0,278
Inertie mixte par rapport à l'acier	I_m [m ⁴]	6,54E-03

Tableau 81 : Caractéristiques générales de la section mixte

Enfin il faut tenir compte des masses participantes à travers les chargements permanents du Tableau 82. Dans la charge de charpente, on ne tient pas compte des traverses d'appui. La charge de dalles est prise en compte selon les documents d'exécution.

Charge charpente (hors traverses d'appui)	G_{acier} [kN/m ²]	2,54
Charge de platelage	G_{dalle} [kN/m ²]	2,93
Charge permanente totale	G [kN/m ²]	5,47
Surcharge de dalles	G' [kN/m ²]	5,28

Tableau 82 : Charges permanentes du prototype

Avec la formule analytique de calcul de la fréquence propre d'une poutre simplement appuyée, où m désigne la masse linéique (§2.2.1 de [13]) :

$$f = \frac{\pi^2}{2\pi} \sqrt{\frac{E_a I_m}{m L^4}} \quad (98)$$

On en déduit les fréquences propres estimées affinées suivantes au Tableau 83:

Estimation de la fréquence propre à vide avec dalles	f_G [Hz]	4,91
Estimation de la fréquence propre à vide sans dalles	$f_{G+G'}$ [Hz]	6,88

Tableau 83 : Fréquences propres par la formule analytique de la poutre sur 2 appuis articulés

5.1.1.2.3 Estimation du seuil de déplacement pour les premières fissurations

Afin de vérifier les ordres de grandeur d'apparition des premières fissures, il est possible de calculer le déplacement vers le haut donnant lieu aux premières fissurations de la table. On considère une poutre isostatique chargée en son centre qui reste dans le domaine élastique. La déformée à mi-portée sous une charge ponctuelle P est donnée par :

$$\delta = \frac{P L^3}{48 E_a I_{ha}} \quad (99)$$

Le moment à mi-portée sous charge est donné par :

$$M = \frac{P L}{4} \quad (100)$$

On en déduit le déplacement en fonction du moment de flexion à mi-portée :

$$\delta = \frac{M L^2}{12 E_a I_{ha}} \quad (101)$$

En faisant le lien entre le moment fléchissant et la contrainte dans la fibre extrême supérieure :

$$\sigma = \frac{M y_{el,sup}}{I_{ha} n} \quad (102)$$

On obtient :

$$\delta = \frac{\sigma L^2}{12 E_c y_{el,sup}} \quad (103)$$

Le déplacement vers le haut induisant la fissuration dépend donc notamment de la contrainte initiale de traction à développer en fibre supérieure et du module du béton.

Le module d'Young est estimé sur la base de la résistance caractéristique relevée :

$$E_c = 22\,000 \left(\frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{0,3} = 32\,714 \text{ MPa} \quad (104)$$

On considère par la suite le module d'Young dynamique du béton. Pour cela on va se référer au modèle de Popovics [63] qui établit un lien entre le module dynamique et le module d'Young statique :

$$E_c = \frac{0,107 E_{cd}^{1,4}}{\rho} \quad (105)$$

Avec ρ désignant la masse volumique du béton en kg/m^3 et le module d'Young s'exprimant en MPa. On en déduit le module d'Young dynamique, supérieur de 30% au module statique :

$$E_{cd} = 42\,749 \text{ MPa} \quad (106)$$

La contrainte de traction à développer doit dépasser le seuil de traction de première fissuration. A cela s'ajoute la compensation de la contrainte de compression due aux charges permanentes. Selon le phasage, le poids propre de l'acier ne met pas en charge la dalle car la charpente n'était pas étayée au montage. En revanche, la charpente a été étayée au coulage de la dalle. Il faut donc déterminer la contrainte de compression sous le poids de la dalle seule pour le premier essai sans dalles et avec dalles pour le suivant. D'un autre côté, on peut soustraire la contrainte de traction liée au retrait de dessiccation à environ 40 jours que l'on peut estimer par le calcul. Enfin, il demeure également une part de traction liée au refroidissement du béton à la prise, un retrait thermique qui est estimé par ordre de grandeur sur la base du Traité de Génie Civil Volume 12 page 179 [68]. Une fois la dalle fissurée pour le second essai, la fissure va se réouvrir à partir d'une contrainte de traction égale à 0 MPa.

		SD	AD
Résistance caractéristique du béton en compression	f_{ck} [MPa]	29,53	29,53
Résistance caractéristique à la traction	$f_{ctk0,05}$ [MPa]	2,01	0,00
Contrainte de traction à la prise et due au refroidissement bridé	σ_{prise} [MPa]	-1,90	-1,90
Contrainte de retrait de dessiccation	$\sigma_{retrait}$ [MPa]	-0,69	-0,69
Contrainte de compression liée au poids de la dalle	$\sigma_{c,plat}$ [MPa]	1,40	1,40
Contrainte de compression liée au poids des dalles	$\sigma_{c,dal}$ [MPa]	0,00	2,50
Contrainte résultante en fibre supérieure	σ [MPa]	-1,19	1,31
Module d'Young statique	E_{cm} [GPa]	33	33
Module d'Young dynamique	E_{cd} [GPa]	43	43
Distance de l'axe neutre à la fibre supérieure en dynamique	$y_{el,sup}$ [m]	0,278	0,278
Portée de la poutre	L [m]	17,68	17,68
Déplacement vertical vers le haut induisant la première fissuration	δ [mm]	1,8	2,9

Tableau 84 : Déplacement vers le haut pour fissurer la dalle avec (AD) et sans dalles (SD)

5.1.1.2.4 Variation de la fréquence propre avec l'amplitude de vibration

En revenant à l'essai avec excitateur, on trace la variation de la fréquence propre fondamentale mesurée avec et sans dalles pour analyse :

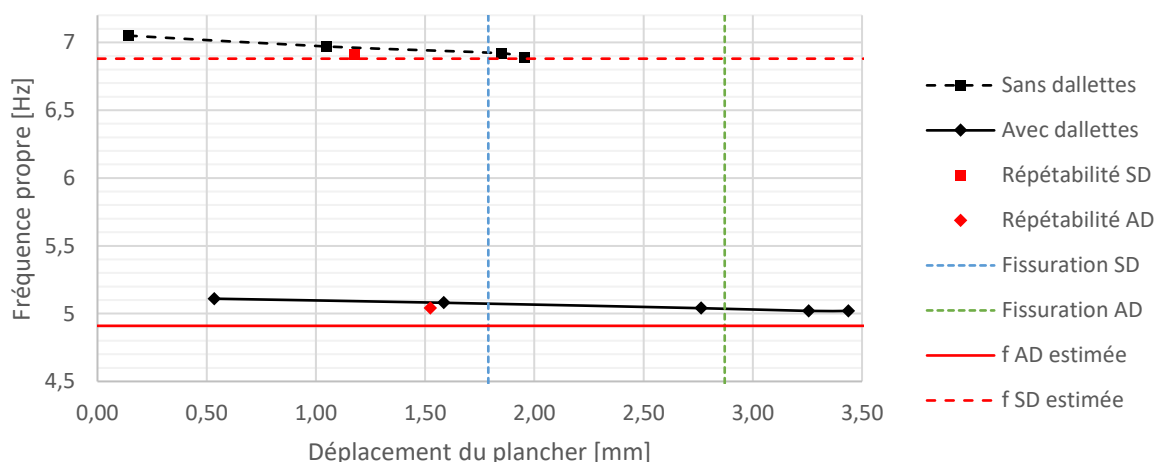


Figure 130 : Évolution de la fréquence propre en fonction du déplacement (Tests 1 et 2)

La fréquence propre diminue avec l'amplitude de vibration. Comme il s'agit des premiers tests sur l'ouvrage, cette diminution peut être imputable à la mise en place de la structure puis des premières fissurations. On trace ainsi le déplacement du capteur LVDT pour le test d'excitation avec dallettes (Figure 131). Une augmentation du déplacement correspond à la rentrée de la tige et donc à un déplacement vers le bas. Entre deux résonances de balayage fréquentiel à amplitude donnée (FRF), on observe une valeur de position moyenne qui tend à diminuer avec les FRF successives. L'ordre de grandeur de cet assouplissement est de 0,2 mm entre les FRF 2 et 3 (Figure 131), ce qui explique une baisse de la fréquence propre de l'ordre de 0,04 Hz (Tableau 73).

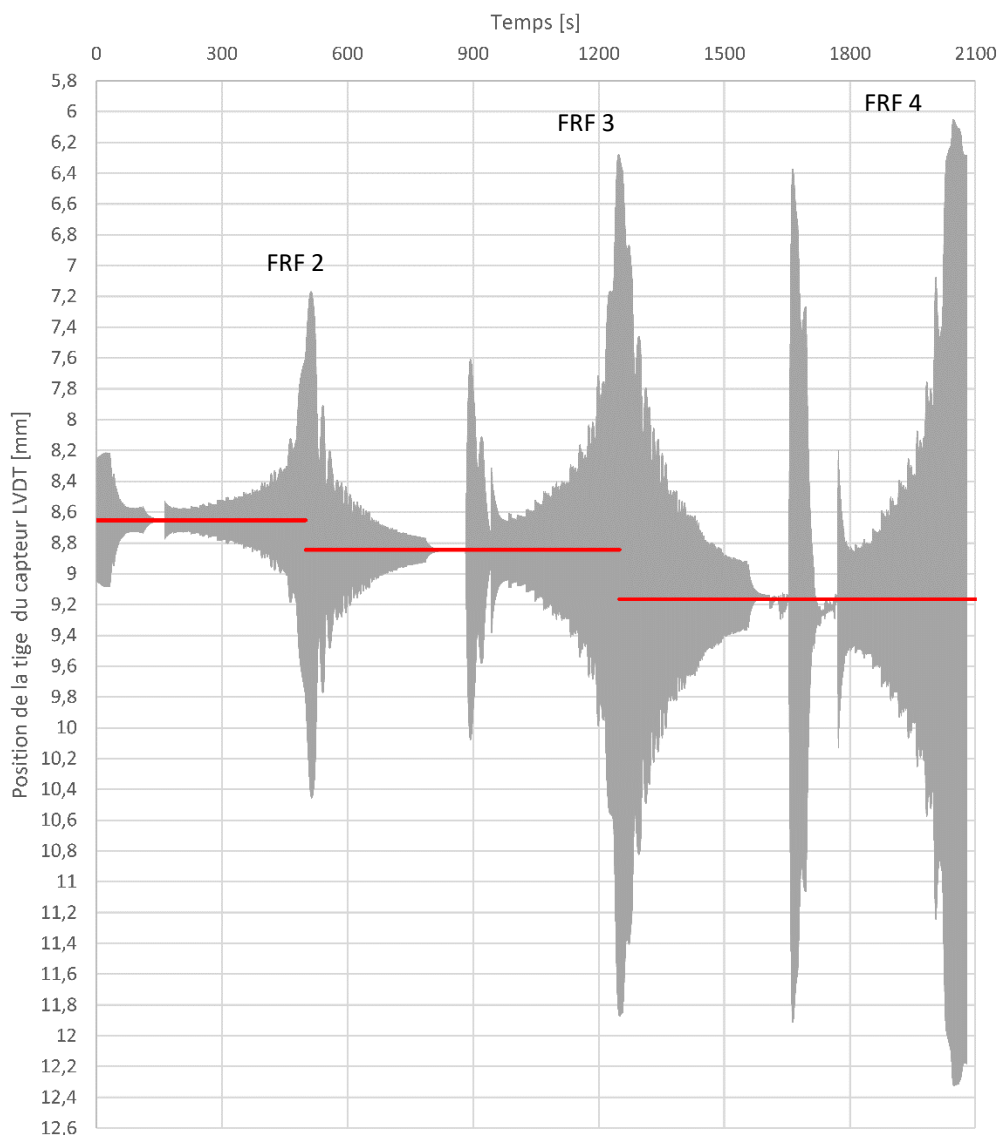


Figure 131 : Déplacement du capteur LVDT [mm] en fonction du temps (Test 2 avec dallettes)

L'essai de répétabilité de fin de série à faible amplitude donne dans les deux cas une fréquence propre inférieure à celle obtenue en début de série pour la même amplitude. Cela indique bien un endommagement irréversible. De plus la valeur de la fréquence propre reste assez proche de la dernière valeur atteinte à forte amplitude.

La fréquence propre mesurée est légèrement supérieure à la fréquence propre calculée de 4,91 Hz avec dallettes mais reste très proche avec une erreur de l'ordre de 2%. On peut émettre l'hypothèse que les dallettes, bien que disjointes par tronçons, apportent une légère rigidité additionnelle.

5.1.1.3 Analyse de l'amortissement en fonction de l'amplitude de vibration

On compare les courbes d'évolution de l'amortissement pour les deux tests avec et sans dalles en fonction de l'accélération d'une part et en fonction du déplacement d'autre part. Cette dernière courbe est obtenue en divisant l'accélération par la pulsation mesurée au carré.

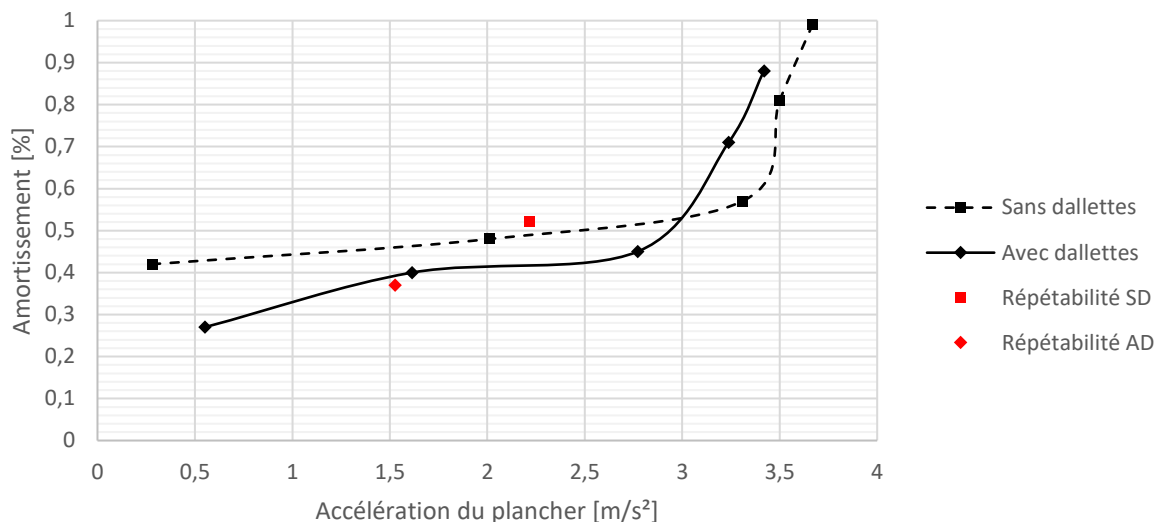


Figure 132 : Evolution de l'amortissement en fonction de l'accélération (Tests 1 et 2)

Tout d'abord, si on regarde la courbe de la première série d'essais sans dalles (Figure 133), on constate qu'il y a deux morceaux. Une première évolution croissante mais assez lente de l'amortissement à faible amplitude et un deuxième morceau avec une augmentation rapide de l'amortissement à partir de 3 m/s². On peut donc postuler qu'à partir de ces valeurs on passe d'un amortissement purement visqueux dans le béton à un amortissement visqueux et de friction lié à l'ouverture de premières fissures.

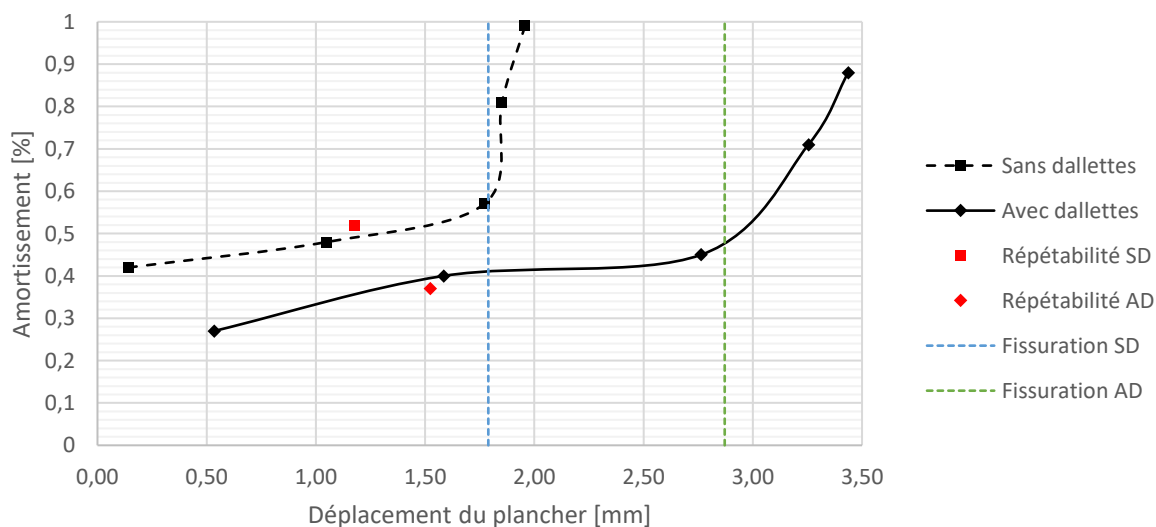


Figure 133 : Evolution de l'amortissement en fonction du déplacement (Tests 1 et 2)

La différence de déplacement estimée pour l'amorce de fissuration avec et sans dalles correspond bien aux changements de pente respectifs (Figure 133). La fissuration du béton initialement non fissuré peut donc expliquer l'augmentation brusque de l'amortissement. Ceci est liée à la friction entre le béton et les armatures traversant les fissures [6]. En effet, lors du deuxième test avec dalles, l'augmentation accentuée de l'amortissement se produit plus tardivement. La contrainte de compression introduite à la pose des dalles étant plus importante, il faut plus de déplacement vertical vers le haut pour réouvrir les fissures.

Il est également intéressant de constater que le taux d'amortissement est plus faible avec dalles que sans dalles à faible amplitude. Ceci peut s'expliquer par le fait que dans le cas d'un amortissement visqueux, le taux d'amortissement est proportionnel à la fréquence [6]. Cela implique un rapport d'environ 1,4 entre les amortissements des systèmes vibrants chacun à 7 Hz et 5 Hz.

A forte amplitude, c'est-à-dire pour des niveaux d'accélération pouvant engendrer un fort inconfort de la foule en concert, on peut avoir un amortissement 2 à 3 fois supérieur à la valeur d'un amortissement que l'on aurait obtenu avec un essai classique à faible amplitude. Par exemple avec un exciteur APS 400 moins puissant que l'exciteur utilisé pour nos essais.

Néanmoins, il faut toujours rester prudent car il est possible que l'amortissement chute lorsque la structure est complètement fissurée. Dans notre cas, il est probable que ce niveau n'ait pas été atteint puisque l'amortissement après fissuration n'a pas plafonné.

Faute de disposer d'un exciteur suffisamment puissant, il n'a pas été possible d'aller au-delà. Il serait intéressant d'avoir un retour d'expérience plus poussé à l'avenir pour prolonger la Figure 133.

5.1.1.4 Conclusion

On observe une non-linéarité de l'augmentation de l'amortissement avec l'amplitude de vibration qui semble correspondre avec l'apparition des fissures dans la table. L'amortissement peut alors être amené à doubler ou tripler. Parallèlement, la fréquence propre fondamentale diminue avec l'amplitude, probablement pour la même raison.

Par la suite on pourra retenir un amortissement propre à la structure compris entre 0,3% et 1% selon l'amplitude de vibration. La fréquence propre de référence pour les vérifications avec dalles à vide de public pourra être prise en compte avec une valeur de 5,04 Hz.

5.1.2 Caractéristiques dynamiques à vide avec amortisseurs visqueux additionnels

L'amortissement de la structure mixte reste assez faible, même avec des amplitudes de vibration élevées. Le prototype étant inspiré d'un plancher incorporé dans un bâtiment à niveaux, il a été imaginé de pouvoir intégrer des amortisseurs à mi-portée du plancher. Cette disposition permet également de disposer d'un moyen de correction éventuel lors des essais de foule.

5.1.2.1 Résultats d'essais

5.1.2.1.1 Essai sans dallettes (Test 6)

Le prototype a été testé avec amortisseurs avec dallettes de surcharge et ensuite sans dallettes. On présente néanmoins les résultats dans le même ordre que pour les tests sans amortisseurs. Les courbes de réponse fréquentielle (FRF) sont obtenues ci-dessous :

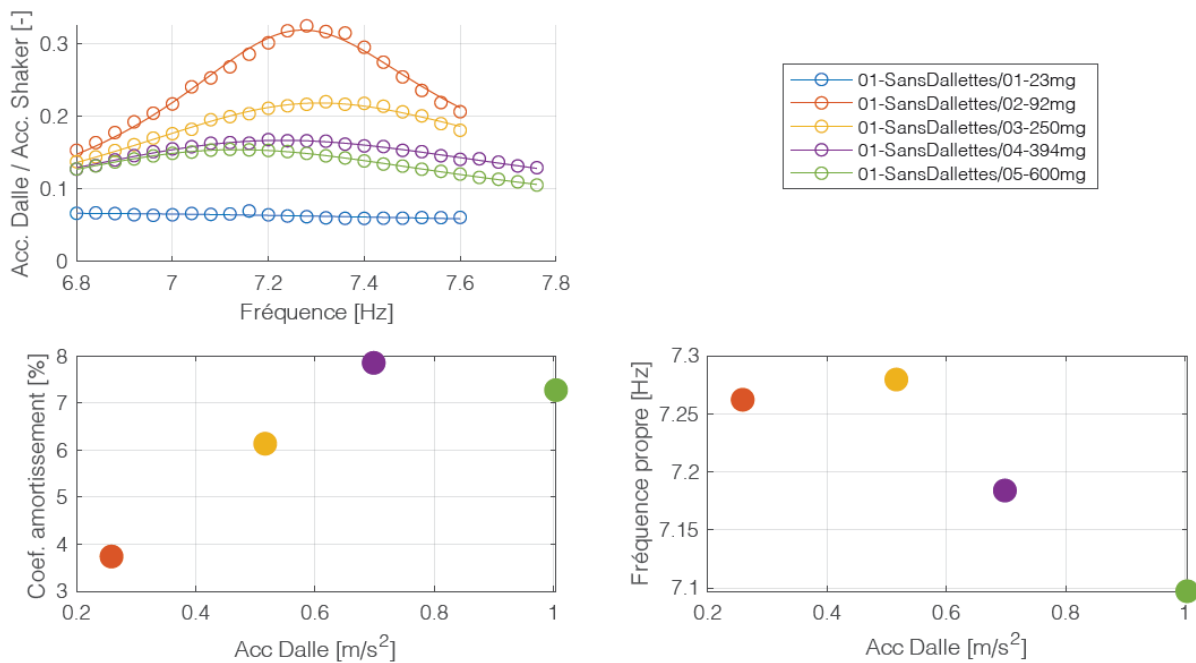


Figure 134 : Propriétés modales du prototype sans dallettes, à vide et avec amortisseurs (ULiège)

FRF	a_{\max} [m/s ²]	Amortissement [%]	Fréquence [Hz]	Masse modale [t]
01_23mg	0,013	-	-	12,8
02_92mg	0,26	3,7	7,26	13,4
03_250mg	0,52	6,1	7,28	12,0
04_394mg	0,70	7,8	7,18	12,3
05_600mg	1,00	7,3	7,10	14,3

Tableau 85 : Propriétés modales du prototype sans dallettes, à vide et avec amortisseurs (ULiège)

- La première FRF n'a pas permis d'exciter suffisamment la structure à très bas niveau à cause d'un incident sur l'excitateur.
- La fréquence propre est supérieure à la fréquence propre obtenue sans amortisseurs.
- L'amortissement passe de 3,7% à 7,8% avec l'augmentation de l'amplitude de vibration. L'amortissement n'augmente plus au-delà de 0,7 m/s².

5.1.2.1.2 Essai avec dallettes (Test 7)

On donne ci-après les résultats d'essais avec dallettes transmis par l'université de Liège :

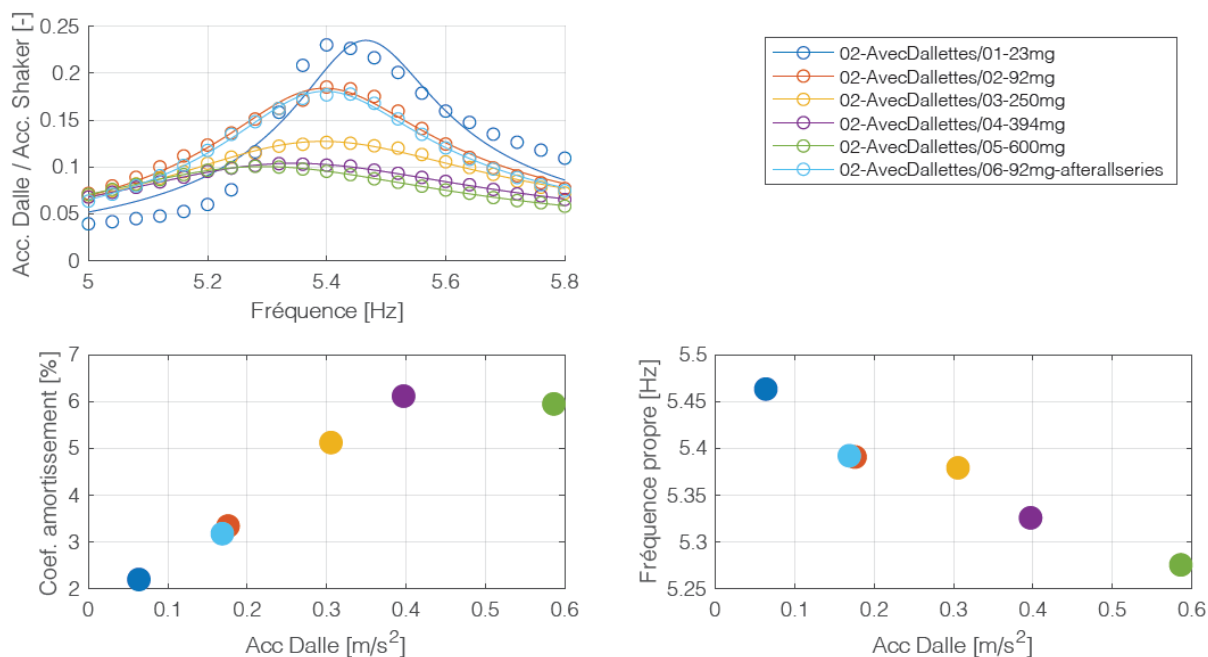


Figure 135 : Propriétés modales du prototype avec dallettes, à vide et avec amortisseurs (ULiège)

FRF	a_{\max} [m/s ²]	Amortissement [%]	Fréquence [Hz]	Masse modale [t]
01_23mg	0,06	2,2	5,46	29,0
02_92mg	0,18	3,3	5,39	26,1
03_250mg	0,30	5,1	5,38	24,6
04_394mg	0,40	6,1	5,33	25,3
05_600mg	0,59	5,9	5,28	26,9
06_92mg	0,17	3,8	5,39	27,9

Tableau 86 : Propriétés modales du prototype avec dallettes, à vide et avec amortisseurs (ULiège)

Observations :

- L'amortissement augmente avec l'accélération en passant de 2,2% à 6,1%. L'amortissement n'augmente plus au-delà de 0,4 m/s².
- La fréquence propre diminue progressivement de 5,46 Hz à 5,28 Hz mais reste supérieure à 5,04 Hz, valeur que l'on a obtenue sans amortisseurs. Cette modification peut être imputée au fait qu'il puisse y avoir une raideur en série avec l'amortisseur. Cette raideur peut sans doute venir de la traverse d'appui.
- La forme de la courbe de réponse fréquentielle pour une excitation de 23 mg est un peu différente des autres courbes. Il est probable qu'il y ait une non-linéarité, par exemple au niveau des fixations de l'amortisseur sur la structure où un son était émis pendant les essais. La valeur d'amortissement donnée est donc une valeur d'amortissement d'une structure à comportement équivalent.

5.1.2.2 Analyse de la variation de la fréquence propre avec et sans amortisseurs

L'excitateur ayant ses limites, il n'était pas possible d'aller explorer aussi loin en déplacements que lors des essais sans amortisseurs.

Néanmoins, on observe nettement une augmentation de la fréquence propre du mode 1 pour le prototype équipé d'amortisseurs (Figure 136 et Figure 137). C'est un phénomène qui n'est pas attendu a priori, les amortisseurs étant réputés être parfaitement visqueux en théorie. L'essai de répétabilité n'a été fait que pour la configuration de prototype amorti avec dallettes. On constate une bonne réversibilité.

On émet l'hypothèse d'une influence de la rigidité de la traverse support en pied des amortisseurs sur la modification de la fréquence propre du système.

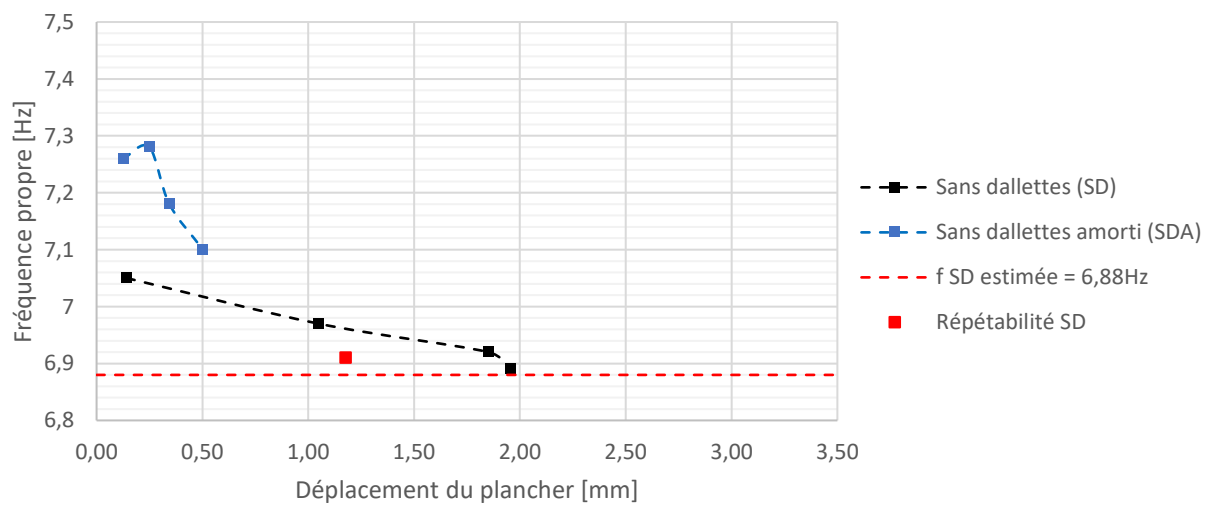


Figure 136 : Evolution de la fréquence sans dallettes (Tests 1 et 6) en fonction du déplacement

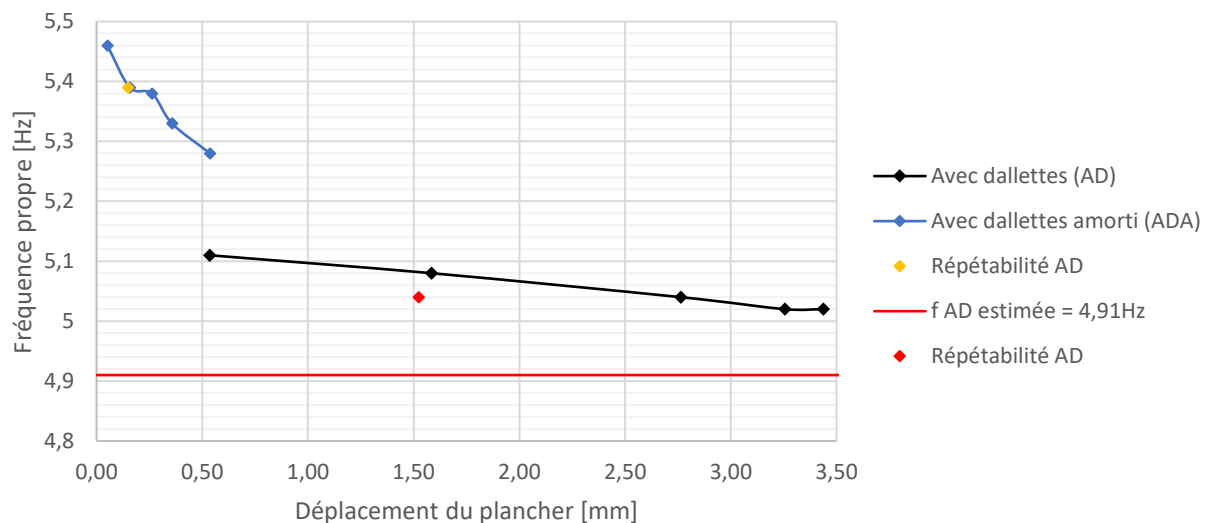


Figure 137 : Evolution de la fréquence avec dallettes (Tests 2 et 7) en fonction du déplacement

5.1.2.3 Analyse de la variation de l'amortissement du prototype avec l'amplitude

5.1.2.3.1 Loi de comportement de l'amortisseur

Etudions le comportement de l'amortisseur en sortie d'usine. Les résultats présentés sur la Figure 138 découlent des tests réalisés par TAYLOR, fabricant des amortisseurs, avant expédition.

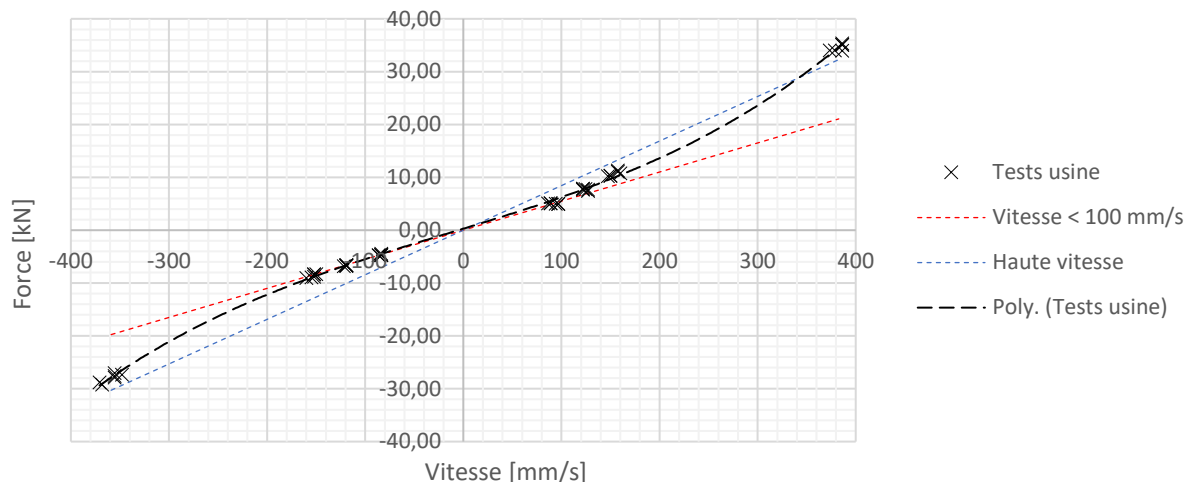


Figure 138 : Loi de comportement de l'amortisseur sur la base des tests d'usine TAYLOR

L'amortisseur présente un comportement non-linéaire. Mais pour des vitesses inférieures à 100 mm/s, on peut assimiler son comportement à celui d'un amortisseur visqueux parfait de valeur C égale à 55 026 N.s/m. Au-delà de cette vitesse, on considérera la valeur sécante supérieure selon la courbe polynomiale de degré 3 de la force : $F(v) = 1,987E-07 v^3 + 1,063E-05 v^2 + 5,661E-02 v + 2,866E-01$. En se basant sur les fréquences mesurées lors des essais, supérieures aux fréquences obtenues sans amortisseurs, on peut estimer les taux d'amortissement attendus pour le prototype amorti :

$$\zeta = \frac{(c_p + 2 c_a \sin(\alpha)^2)}{2m^*(2\pi f)} \quad (107)$$

Amortissement propre du prototype à faible vitesse (Test 1 : $c_p = 2m^* \omega \zeta_p$)	c_p [N.s/m]	4895
Amortissement d'un amortisseur à faible vitesse (valeur d'usine TAYLOR)	c_a [N.s/m]	55026
Angle d'inclinaison des deux amortisseurs	α [°]	78
Masse modale estimée par méthode EF (Modèle SCIA)	m^* [kg]	13421
Fréquence propre mesurée avec amortisseurs (Test 6 à 0,7m/s ²)	f [Hz]	7,18
Amortissement attendu pour les essais	ξ_{SDA} [%]	9,1%

Tableau 87 : Taux d'amortissement attendu sans dallettes

Amortissement propre du prototype à faible vitesse (Test 2 : $c_p = 2m^* \omega \zeta_p$)	c_p [N.s/m]	4461
Amortissement d'un amortisseur à faible vitesse (valeur d'usine TAYLOR)	c_a [N.s/m]	55026
Angle d'inclinaison des deux amortisseurs	α [°]	78
Masse modale estimée par méthode EF (Modèle SCIA)	m^* [kg]	25730
Fréquence propre mesurée avec amortisseurs (Test 7 à 0,4m/s ²)	f [Hz]	5,33
Amortissement attendu pour les essais	ξ_{ADA} [%]	6,4%

Tableau 88 : Taux d'amortissement attendu avec dallettes

5.1.2.3.2 Variation de l'amortissement du prototype avec l'amplitude

On s'intéresse au comportement non linéaire de l'amortisseur caractérisé par l'augmentation de l'amortissement avec l'accélération. L'amortissement avec (ADA) et sans dalles (SDA) est tracé en fonction du déplacement en divisant l'accélération par la pulsation propre au carré (Figure 139).

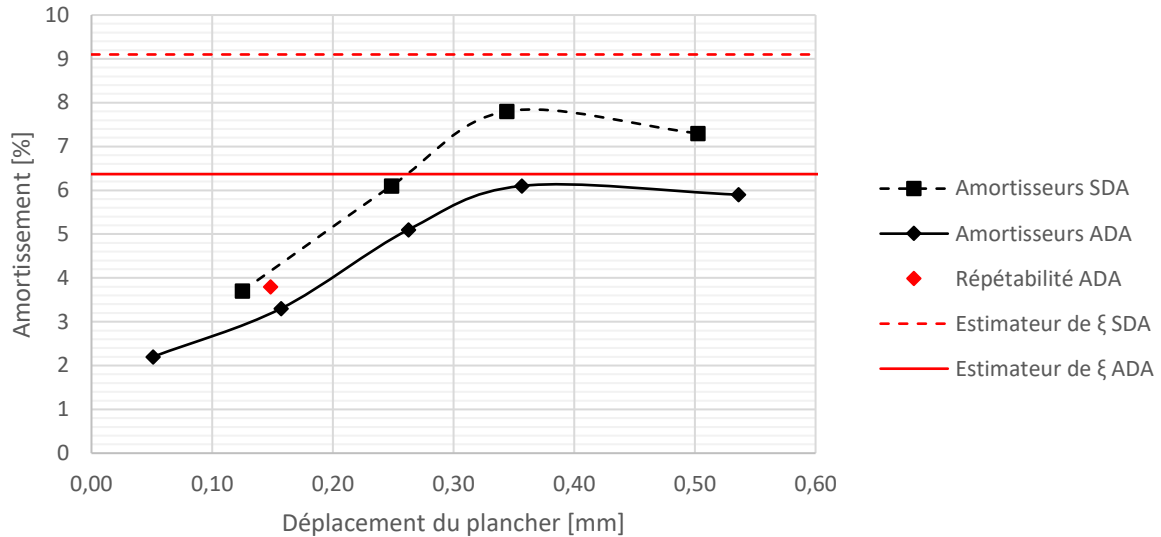


Figure 139 : Variation de l'amortissement en fonction du déplacement (Tests 6 et 7)

Avec ou sans dalles, l'amortissement se stabilise pour la même valeur d'amplitude crête d'environ 0,35mm.

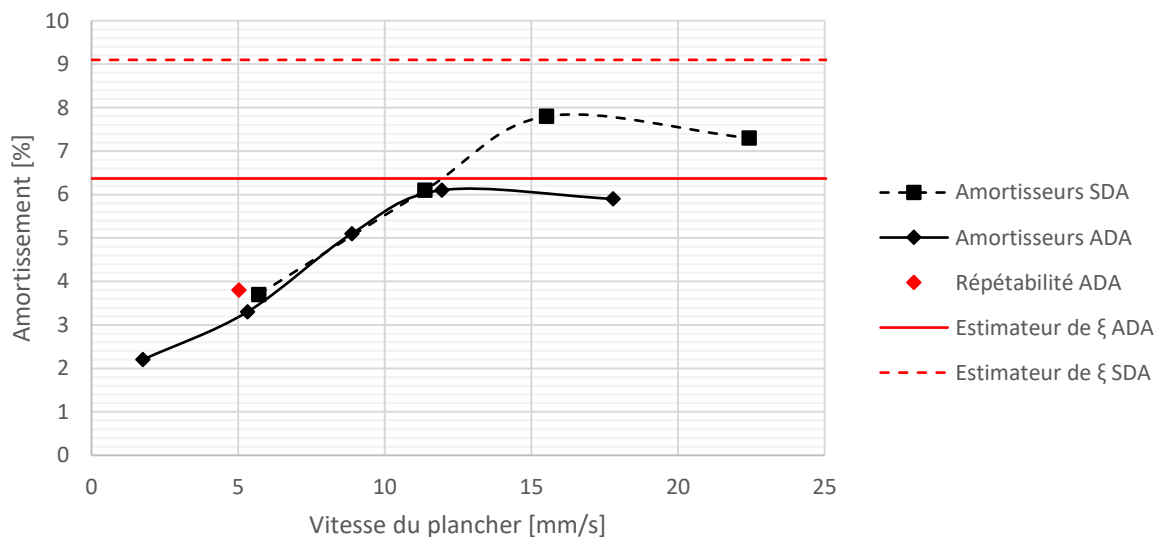


Figure 140 : Variation de l'amortissement en fonction de la vitesse (Tests 6 et 7)

On observe que les vitesses maximales atteintes sont de l'ordre de 22,2 mm/s. Cela correspond à des niveaux d'accélération de l'ordre de 1 m/s^2 . Pour des tests allant jusqu'à des vibrations correspondant au seuil dit de panique soit environ 3 m/s^2 , les vitesses maximales atteintes avec dalles seront de l'ordre de 65 mm/s. Par conséquent on peut considérer la valeur d'amortissement des amortisseurs comme constante pour la plage d'utilisation d'après les tests d'usine.

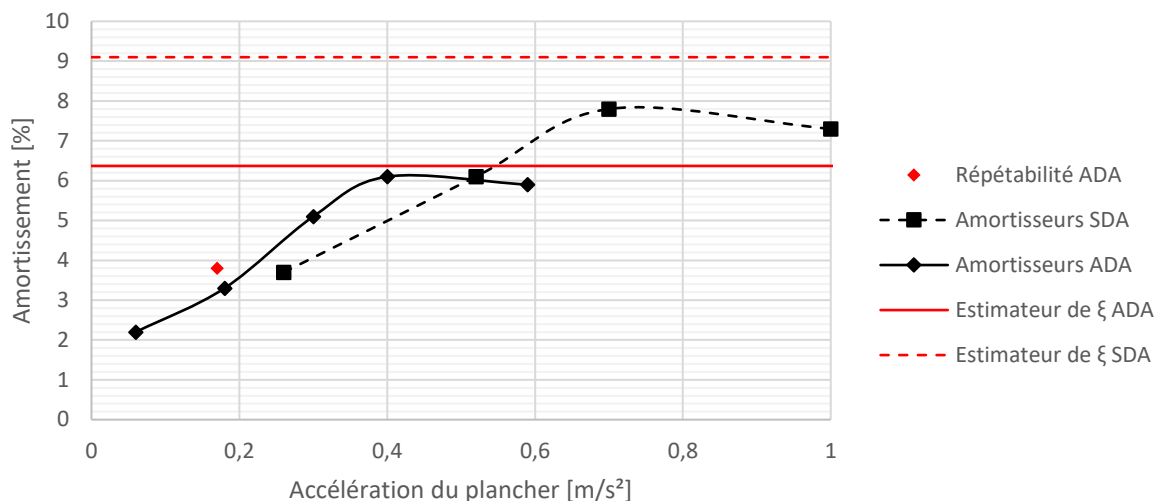


Figure 141 : Variation de l'amortissement en fonction de l'accélération (Tests 6 et 7)

Avec dalles, puisque cela correspond à la configuration pratique d'études, on observe Figure 141 que l'amortissement se stabilise pour une accélération de 0,4 m/s², ce qui est de l'ordre du seuil de confort maximal usuel de l'ordre de 0,5 m/s². On peut donc considérer que le seuil d'entrée en service à 100% de la capacité propre de l'amortisseur est satisfaisante.

Une autre façon de présenter les résultats est d'estimer l'amortissement équivalent c_a d'un amortisseur dans les deux configurations pour la comparer à la valeur de calcul déduite des tests d'usine (Figure 142). On procède en rapport avec les équations présentées au paragraphe 3.2.5.3:

$$c_a = \frac{(2m^* \omega \zeta - c_p)}{2 \sin(\alpha)^2} \quad (108)$$

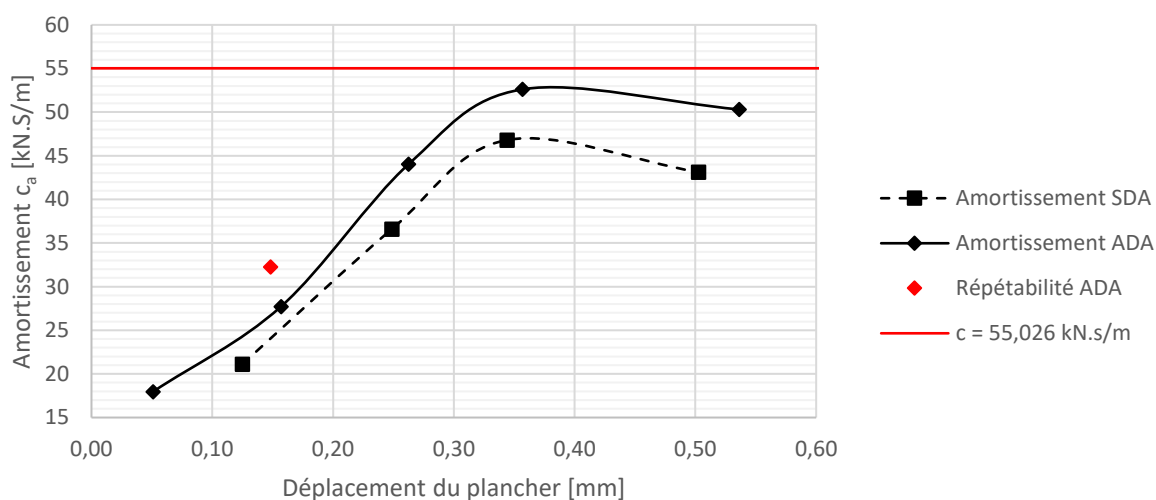


Figure 142 : Comparaison de la valeur estimée de l'amortissement avec la valeur d'usine

Passé le seuil de fonctionnement à 100% de 0,35 mm, l'amortissement équivalent reste inférieur à l'estimation issue des tests d'usine. Il y a donc un effet de réduction de l'efficacité de l'amortisseur à identifier. Les courbes ont bien une allure similaire avec et sans dalles mais l'écart avec la valeur cible est plus important sans dalles.

5.1.3 Caractéristiques dynamiques en présence de public actif ou passif

Les essais avec excitateur présentés jusqu'à présent se sont concentrés sur la caractérisation du prototype à vide de public selon la présence de dallettes de surcharge ou d'amortisseurs. Les essais présentés dans ce paragraphe traitent de l'influence de la présence de public sur les caractéristiques modales pour les 3 configurations suivantes :

- 40 individus statiques disposés sur le plancher de manière répartie
- 40 individus marchant de manière continue sur le plancher en décrivant des cercles de part et d'autre de l'excitateur. Cela permet d'étendre les études de Shahabpoor et al. [69] réalisées jusqu'à 15 marcheurs.
- 18 individus statiques regroupés vers le centre du plancher.

En complément de ces essais, des tests de ressentis ont été effectués à 40 et 18 personnes.

5.1.3.1 Test avec 40 individus statiques (Test 3)

Un groupe de 40 personnes statiques est présent sur le plancher. Les personnes présentes n'ont pas reçu de consignes précises quant à la posture à adopter si ce n'est que de rester sur place. L'objectif de l'essai est de déterminer l'influence de la présence de ce groupe de personnes sur l'amortissement. Les tests sont réalisés avec dallettes.



Figure 143 : Test avec excitateur et 40 individus statiques (Test 3)

D	1			2			3			4			5			6			7			8			9			10			11			12					
P	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
S				3		4	7		8	11		12	15		16	19		20				23	24	27				28	31	32	35			36	39	40			
C																																							
N				1		2	5		6	9		10	13		14	17		18				21	22	25				26	29	30	33			34	37	38			

Figure 144 : Positionnement des participants et de l'excitateur sur les dallettes (Test 3)

Individu	Dalle	Rangée	Position	Sexe	Age	Masse (kg)	Taille (cm)	IMC	Indicateur
1	2	N	1	F	20	125,0	175	41	obésité mor.
2	2	N	3	F	20	63,3	171	22	normal
3	2	S	1	F	22	59,0	172	20	normal
4	2	S	3	M	20	57,4	175	19	normal
5	3	N	1	F	22	52,0	159	21	normal
7	3	N	3	F	25	90,0	169	32	obésité mod.
6	3	S	1	F	20	58,6	165	22	normal
8	3	S	3	M	21	55,3	170	19	normal
9	4	N	1	M	20	80,9	182	24	normal
10	4	N	3	F	21	57,0	170	20	normal
11	4	S	1	F	20	71,8	170	25	normal
12	4	S	3	F	20	48,6	162	19	normal
13	5	N	1	F	20	74,8	163	28	surpoids
14	5	N	3	F	20	86,5	173	29	surpoids
15	5	S	1	M	22	89,4	173	30	surpoids
16	5	S	3	F	20	52,1	154	22	normal
17	6	N	1	M	20	71,0	182	21	normal
18	6	N	3	F	20	55,0	167	20	normal
19	6	S	1	F	20	61,9	170	21	normal
20	6	S	3	F	20	62,0	174	20	normal
21	7	N	2	M	21	58,4	174	19	normal
22	7	N	3	F	20	60,8	172	21	normal
23	7	S	2	F	20	55,7	159	22	normal
24	7	S	3	F	19	48,7	160	19	normal
25	8	N	1	F	19	55,7	170	19	normal
26	8	N	3	M	19	62,0	173	21	normal
27	8	S	1	M	27	63,0	179	20	normal
28	8	S	3	F	20	55,0	160	21	normal
29	9	N	1	F	22	67,7	161	26	surpoids
30	9	N	3	M	20	82,0	180	25	surpoids
31	9	S	1	F	19	55,1	167	20	normal
32	9	S	3	M	20	79,9	178	25	surpoids
33	10	N	1	F	20	61,3	163	23	normal
34	10	N	3	M	21	73,0	181	22	normal
35	10	S	1	M	22	76,0	182	23	normal
36	10	S	3	F	19	57,0	157	23	normal
37	11	N	1	F	19	56,7	162	22	normal
38	11	N	3	M	53	72,6	170	25	surpoids
39	11	S	1	M	28	64,7	170	22	normal
40	11	S	3	M	24	79,3	185	23	normal

STATISTIQUES	M/F : 40	22	66,4	170	23	normal
	M: 15	24	71,0	177	23	normal
	F: 25	20	63,7	166	23	normal

Tableau 89 : Caractéristiques physiques des participants

La fonction de réponse en fréquence est tracée pour les 5 niveaux d'excitation et 1 niveau d'excitation de répétition complémentaire. On donne à la suite les caractéristiques modales correspondantes.

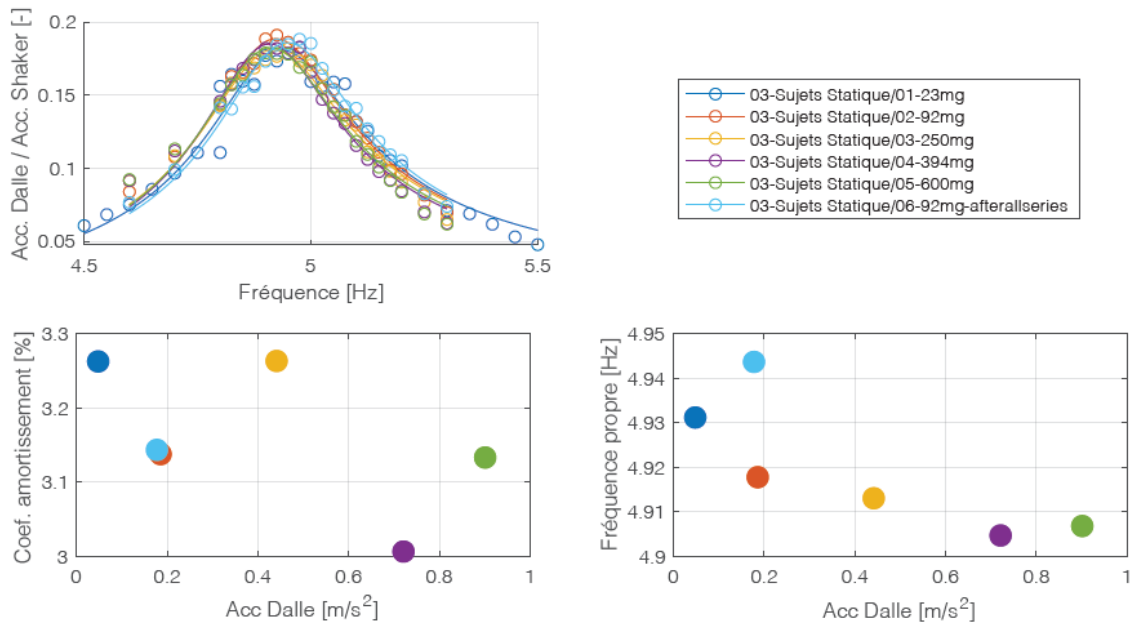


Figure 145 : FRF, amortissement et fréquence en fonction de l'accélération du plancher (ULiège)

FRF	a_{\max} [m/s ²]	Amortissement [%]	Fréquence [Hz]	Masse modale [t]
01_23mg	0,048	3,26	4,93	27,1
02_92mg	0,186	3,14	4,92	27,0
03_250mg	0,441	3,26	4,91	27,0
04_394mg	0,721	3,01	4,90	28,8
05_600mg	0,901	3,13	4,91	28,0
06_92mg	0,177	3,14	4,94	27,4

Tableau 90 : Propriétés modales du prototype avec dallettes avec 40 individus statiques (ULiège)

Observations :

- Les données expérimentales correspondent bien au modèle théorique en trait continu. L'interaction homme-structure rend la correspondance moins lisse que pour les essais sans individus. Mais la tendance générale permet une bonne estimation des paramètres modaux équivalents.
- Les niveaux de vibrations atteints sont plus faibles que pour les essais à vide et sans amortisseurs. Ceci s'explique par la puissance limitée de l'excitateur et l'amortissement plus élevé obtenu dans cet essai.
- On observe un amortissement moyen de 3,16% sur les 5 premières FRF de la série. On n'observe pas une sensibilité particulière de l'amortissement avec l'amplitude. Il aurait été intéressant d'aller explorer au-delà de 1 m/s² avec un excitateur plus puissant.
- La masse modale augmente légèrement en moyenne par rapport aux essais à vide. Les personnes contribuent à la masse généralisée sans être complètement parfaitement liées à l'ouvrage ce qui explique que l'augmentation peut être plus faible qu'attendue.
- La fréquence propre de l'ordre de 4,91 Hz est plus faible que la fréquence propre à vide de l'ordre de 5,04 Hz, ce qui est conforme aux attentes.

5.1.3.2 Test avec 40 individus en situation de marche (Test 4)

Dans ce test les mêmes 40 individus marchent en formant une boucle de part et d'autre de l'excitateur.



Figure 146 : Test avec excitateur avec 40 individus en situation de marche (Test 4)

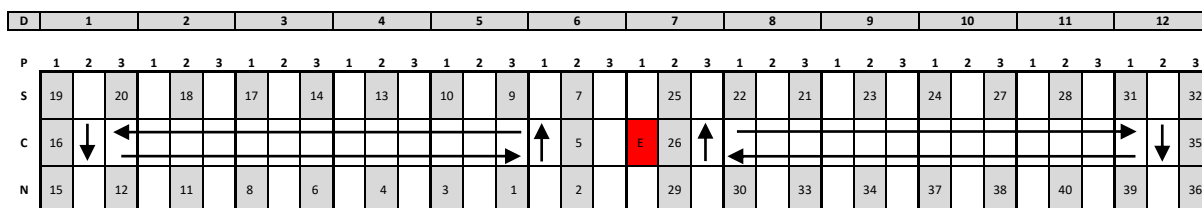


Figure 147 : Positionnement des participants et de l'excitateur sur les dalles (Test 4)

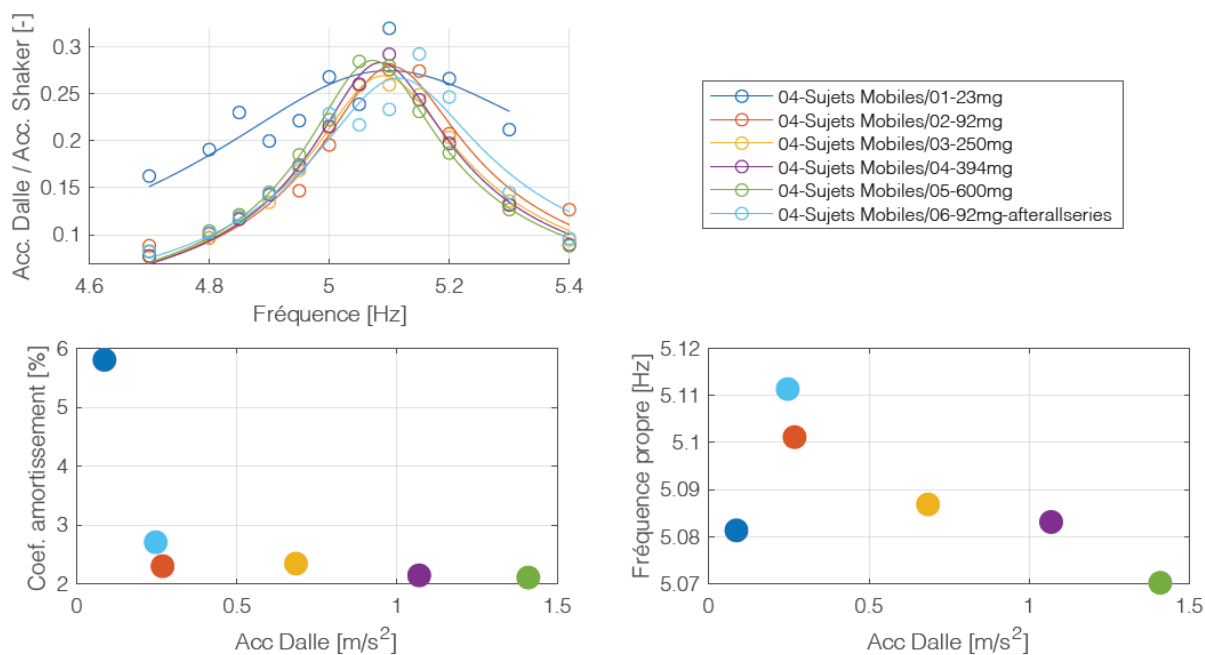


Figure 148 : FRF, amortissement et fréquence en fonction de l'accélération du plancher (ULiège)

FRF	a_{\max} [m/s ²]	Amortissement [%]	Fréquence [Hz]	Masse modale [t]
01_23mg	0,086	*5,81*	*5,08*	*10,1*
02_92mg	0,267	2,30	5,10	24,9
03_250mg	0,684	2,34	5,09	25,4
04_394mg	1,069	2,14	5,08	26,4
05_600mg	1,410	2,11	5,07	26,6
06_92mg	0,246	*2,71*	*5,11*	*22,2*

Tableau 91 : Propriétés modales du prototype avec dallettes avec 40 individus mobiles (ULiège)

Observations :

- La première FRF n'est pas satisfaisante et est à rejeter car l'excitation mécanique n'était pas assez forte pour contrecarrer l'action de la foule en marche. La FRF de répétition à faible amplitude est également à rejeter par précaution, les mesures étant trop distinctes de la courbe théorique.
- Pour les FRF restantes, des niveaux d'accélération supérieurs ont été atteints par rapport au test avec des individus statiques.
- L'amortissement moyen est plus faible qu'avec des individus statiques, 2,22% contre 3,16% au Test 3.
- Les fréquences propres sont similaires aux fréquences propres obtenues à vide avec dallettes (Test 2) de même que la masse modale.



Figure 149 : Vue axonométrique du test de marche (Test 4)

5.1.3.3 Test avec 18 individus statiques (Test 5)

Ce test est initialement prévu pour évaluer les ressentis. Afin de ne pas mobiliser les participants trop longtemps, il a été choisi de ne faire qu'une FRF à amplitude de vibration moyenne.



Figure 150 : Test avec exciteur avec 18 individus statiques (Test 5)

D	1			2			3			4			5			6			7			8			9			10			11			12								
P	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
S																																										
C																																										
N																																										

Figure 151 : Positionnement des participants et de l'exciteur sur les dalles (Test 5)

Individu	Dalle	Rangée	Position	Sexe	Age	Masse (kg)	Taille	IMC	Indicateur
1	6	C	1	M	24	94,5	184	28	surpoids
2	6	N	1	M	20	79,9	178	25	surpoids
3	6	S	1	F	19	56,7	162	22	normal
4	6	C	2	M	20	57,4	175	19	normal
5	6	N	2	M	20	71,0	182	21	normal
6	6	S	2	M	27	63,0	179	20	normal
7	6	C	3	F	20	61,3	163	23	normal
8	6	N	3	F	20	55,7	159	22	normal
9	6	S	3	M	22	89,4	173	30	surpoids
10	7	C	2	F	20	60,8	172	21	normal
11	7	N	2	F	19	55,1	167	20	normal
12	7	S	2	F	19	48,7	160	19	normal
13	7	C	3	M	33	76,5	182	23	normal
14	7	N	3	F	22	67,7	161	26	surpoids
15	7	S	3	F	19	55,7	170	19	normal
16	8	C	1	F	19	57,0	157	23	normal
17	8	N	1	M	20	82,0	180	25	surpoids
18	8	S	1	M	21	55,3	170	19	normal

STATISTIQUES	M/F : 18	21	66,0	171	22,5	normal
--------------	----------	----	------	-----	------	--------

Tableau 92 : Caractéristiques physiques des participants

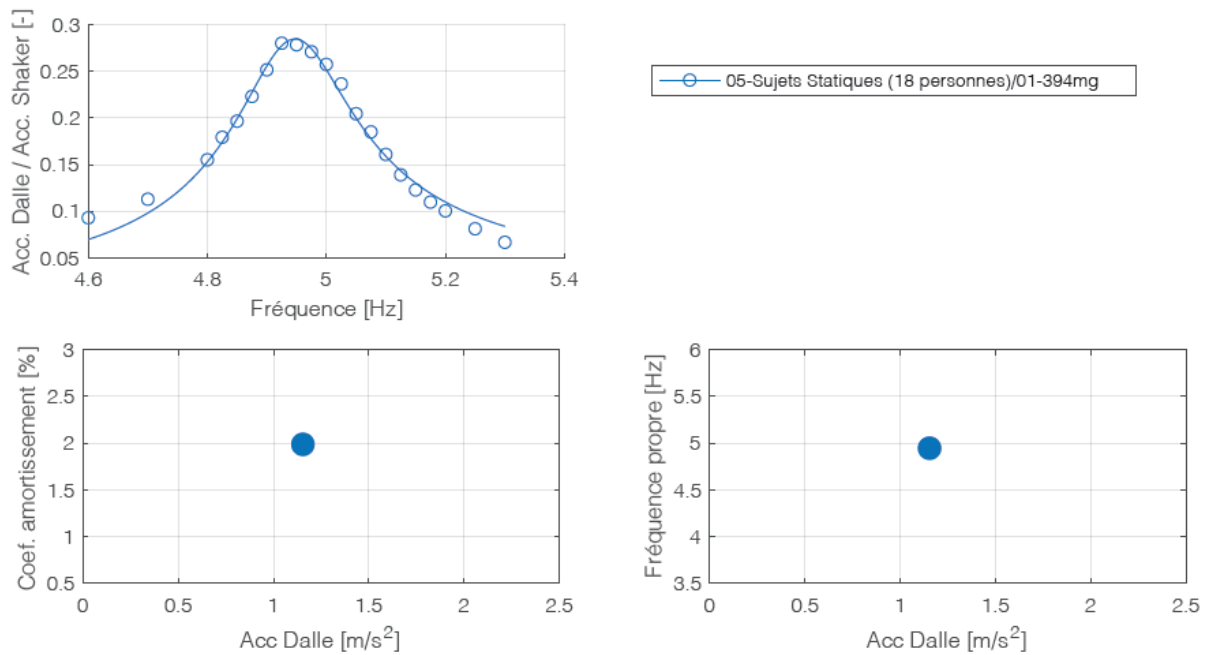


Figure 152 : FRF, amortissement et fréquence en fonction de l'accélération du plancher (ULiège)

FRF	a_{\max} [m/s ²]	Amortissement [%]	Fréquence [Hz]	Masse modale [t]
01_394mg	1,154	1,99	4,95	28,3

Tableau 93 : Propriétés modales du prototype avec dalles avec 18 individus statiques (ULiège)

Observations :

- L'amortissement est plus faible que pour le test à 40 personnes statiques (Test 3).
- La fréquence propre est inférieure à la fréquence propre à vide (Test 2) mais supérieure à la fréquence propre avec 40 personnes statiques (Test 3).
- La masse modale est de l'ordre de celle obtenue avec 40 personnes statiques. A noter que dans cet essai les personnes sont regroupées au centre pour les tests de ressenti alors que dans le test à 40 personnes les personnes sont réparties. Les personnes centrées participent de manière plus significative à la masse modale par principe.

5.2 Excitation par des personnes coordonnées et d'actions variables

5.2.1 Essais de groupes

5.2.1.1 Programme initial d'essais

Le programme initial visait à structurer les essais de groupe en deux temps : une matinée dédiée à des séries de tests de balancement vertical (Séries A/B/C) et une après-midi dédiée aux séries de sauts de sorte à solliciter progressivement les participants sur le plan physique (Séries E/F). L'idée était également d'intercaler des tests un peu plus libres pour détendre les participants (Série D). Les tests de la série D prévus n'ont pas été réalisés pour des questions de temps tandis que la série B n'a pas été réalisée en raison des aléas d'acquisition sur les plaques de force. Néanmoins, la description du programme d'essais initial reste intéressante pour inspirer de futures campagnes d'essai.

La série A du Tableau 94 consistait à réaliser 5 séquences de mesures successives avec des plages de sollicitation en balancement à des fréquences de métronome augmentant successivement de 0,1 Hz entre 1,2 Hz et 2,8 Hz toutes les 60 s. Cette plage de fréquence a été définie selon les plages conventionnellement repérées dans la littérature comme atteignables par des personnes en concert. Le découpage a été réalisé de sorte à permettre des temps réguliers d'acquisition des données pour éviter d'avoir des fichiers trop longs et s'assurer de la synchronisation entre capteurs. L'essentiel des essais consistait à regrouper 12 participants au centre de l'ouvrage en les faisant faire face à l'extrémité Est du prototype où se trouve la source sonore principale et le coordonnateur des essais. 10 participants actifs (en vert Figure 153) entourent 2 participants passifs en contact permanent avec l'ouvrage (en orange Figure 153). Ces derniers permettaient de donner un ressenti vibratoire.

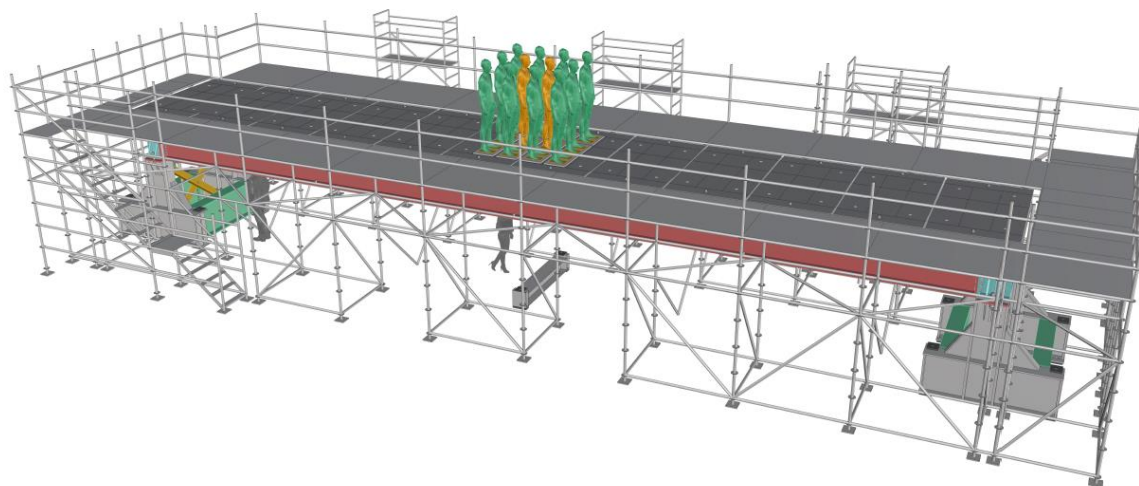


Figure 153 : Configuration des essais de groupe : personnes actives en vert et passives en orange

A	Actifs	Passifs	Source	Plage de f (Hz)	Activité	Plaque	Accél.	Amort.	[s]
A1	10	2	Métronome	1,2 / 1,5	Balancement	12	10	non	240
A2	10	2	Métronome	1,6 / 1,8	Balancement	12	10	non	180
A3	10	2	Métronome	1,9 / 2,1	Balancement	12	10	non	180
A4	10	2	Métronome	2,2 / 2,4	Balancement	12	10	non	180
A5	10	2	Métronome	2,5 / 2,8	Balancement	12	10	non	240

Tableau 94 : Séries de tests A : Balancement au métronome

B / C	Actifs	Passifs	Source		f(Hz)	BPM	Activité	Plaque	Accél.	Amort.	[s]
B1 / C1	10	2	Musiques		1,2 / 1,5		Balancement	B:12/C:0	10	non	270
			Survivor	Destiny's Child	1,35	81					90
			Boys don't cry	The Cure	1,42	85					90
			In da club	50 cent	1,5	90					90
B2 / C1	10	2	Musiques		1,6 / 1,8		Balancement	B:12/C:0	10	non	270
			Dancing Queen	ABBA	1,67	100					90
			Long way 2 go	Cassie	1,77	106					90
			Give it to me	Timbaland	1,85	111					90
B3 / C3	10	2	Musiques		1,9 / 2,1		Balancement	B:12/C:0	10	non	270
			Get lucky	Daft Punk	1,93	116					90
			Smells Like Teen Spirit	Nirvana	1,97	118					90
			Hung up	Madonna	2,1	126					90
B4 / C4	10	2	Musiques		2,2 / 2,4		Balancement	B:12/C:0	10	non	270
			Freed from desire	Gala	2,15	129					90
			Heads Will Roll	A-trak Remix	2,3	138					90
			Bande organisée	Jul	2,37	142					90
B5 / C5	10	2	Musiques		2,5 / 2,8		Balancement	B:12/C:0	10	non	270
			Du propre	Orelsan	2,5	150					90
			Pump It	Black Eyed Peas	2,55	153					90
			Happy	Pharrell Williams	2,67	160					90

Tableau 95 : Série de tests B/C : Balancement en musique avec ou sans plaques de force

Les séries B/C du Tableau 95 consistaient à réaliser des tests de balancement en musique avec des plages de fréquences des titres diffusés pendant 90 s qui correspondaient à celles précédemment explorées avec le métronome, soit entre 1,2 Hz et 2,8 Hz. Cela permettait de comparer les résultats obtenus quand on est en situation guidée par métronome ou en musique. Les publications se basent en effet souvent sur des essais de caractérisation au métronome. On souhaitait donc étudier l'influence de la sollicitation sonore sur le comportement et donc l'action exercée avec un tempo sensiblement identique. D'autre part cela permettait également de tester la réactivité des personnes suivant le genre musical ou le titre en particulier.

Les participants à la série B devaient être sur plaque de force tandis qu'aucune plaque de force n'était utilisée dans la série C. Cela permettait dans des conditions identiques de voir l'impact du système d'acquisition sur l'action exercée. En d'autres termes, l'idée était de voir dans quelle mesure les plaques de force peuvent perturber l'action. C'est une information qui peut être intéressante à noter dans la perspective de comparer acquisition indirecte par accéléromètre ou acquisition directe par plaque de force. Les accéléromètres sont certes peu invasifs mais potentiellement moins précis que les plaques de force.

D	Actifs	Passifs	Source		f(Hz)	BPM	Activité	Plaque	Accél.	Amort.	[s]
D1	Variable		Musiques				Au choix	0	10	non	180
D	10	2	Bande organisée	Jul	2,37	142	position libre				60
	10	10			2,37	142					60
	20	0			2,37	142					60
D2	Variable		Musiques				Au choix	0	10	non	180
D	10	2	Du propre	Orelsan	2,5	150	position libre				60
	10	10			2,5	150					60
	20	0			2,5	150					60
D3	Variable		Musiques				Au choix	0	10	non	180
D	10	2	Pump It	Black Eyed Peas	2,55	153	position libre				60
	10	10			2,55	153					60
	20	0			2,55	153					60

Tableau 96 : Série de tests D : Excitation libre en musique

La série D du Tableau 96 devait être plus libre au niveau du contrôle de l'excitation exercée. Il s'agissait de laisser une grande liberté dans le comportement des participants à la fois en termes de niveau d'activité (statique, balancement ou saut) ou de positionnement voir de mobilité entre individus. La seule contrainte était d'organiser trois séquences pour le titre diffusé durant lequel le nombre de participants actifs étaient variable sur trois plages de 60 s.

E	Actifs	Passifs	Source	plage de f (Hz)	Activité	Plaque	Accél.	Amort.	[s]
E1	10	2	Métronome	1,2 / 1,5	Saut	12	10	non	240
E2	10	2	Métronome	1,6 / 1,8	Saut	12	10	non	180
E3	10	2	Métronome	1,9 / 2,1	Saut	12	10	non	180
E4	10	2	Métronome	2,2 / 2,4	Saut	12	10	non	180
E5	10	2	Métronome	2,5 / 2,8	Saut	12	10	non	240

Tableau 97 : Série de tests E : Saut au métronome

La série E du Tableau 97 est similaire à la série A à l'exception du fait qu'il s'agisse cette fois d'une sollicitation de type saut. On a limité les fréquences dans la plage 1,2 Hz à 2,8 Hz en première approche. Cette plage sera étendue au-delà de 2,8 Hz pour les essais de foule.

F	Actifs	Passifs	Source	plage de f (Hz)	Activité	Plaque	Accél.	Amort.	[s]
F1	10	2	Musiques		Saut	12 et 0	10	non	565
F1A			Jump Around	House Of Pain	1,78	107			214
F1B			Black Betty	Ram Jam	1,95	117			237
F1C			Seven Nation Army	The White Stripes	2,03	122			232
F2	10	2	Musiques		Saut	12 et 0	10	non	565
F2A			Mala Vida	Mano Negra	2,13	128			174
F2B			Memories	David Guetta	2,17	130			210
F2C			Everytime we touch	Cascada	2,38	143			197
F3	10	2	Musiques		Saut	12 et 0	10	non	565
F3A			Miss you	Oliver Tree	2,42	145			206
F3B			Pump It	Black Eyed Peas	2,55	153			213
F3C			Hey Ya	Outkast	2,65	159			235

Tableau 98 : Série de tests F : Saut en musique

La série F du Tableau 98 vise à étudier une sollicitation de type saut en musique tout en restant soumise à l'envie des participants. Ils sont bien sûr encouragés à avoir une activité énergétique mais elle n'est pas imposée. Il était également question de faire les tests avec et sans plaque de force dans le même objectif de comparaison d'influence des capteurs que pour les essais B/C. On notera que la plage de fréquence a été resserrée pour deux raisons. D'une part sauter à des fréquences plus basses que 1,7 Hz est relativement difficile. D'autre part, il a été initialement identifié que des titres susceptibles de faire sauter les personnes au-delà de 2,7 Hz sont relativement rares et peu connus. Enfin il faut aussi se rappeler que la fréquence propre du mode 1 avait déjà été identifiée aux alentours de 5 Hz avec dallettes de surcharges. En effet tous les essais réalisés avec du public sont réalisés avec dallettes. Pour mettre en résonance l'ouvrage, il s'agit de disposer d'une liste de titres permettant aux individus d'exciter l'ouvrage via la seconde harmonique, c'est à dire pour un tempo aux alentours de 2,5 Hz ou légèrement inférieur suivant le nombre d'individus restant en contact avec l'ouvrage car responsables d'une diminution de la fréquence propre équivalente.

5.2.1.2 Séries d'essais du 23/01/2023 avec les S5

Lors de l'acquisition des données, des difficultés associées aux plaques de force ont été rencontrées pour des raisons de mise en veille et de gestion de l'enregistrement. C'est pourquoi beaucoup de temps a été consacré à la résolution de ces sujets au détriment de la réalisation de l'intégralité du programme précédemment décrit. Les séries A et C pour le balancement ont été réalisés partiellement sur les fréquences d'excitation basses. Un essai spécial nommé S1 a été réalisé en supplément pour distraire et motiver les participants. Le Tableau 99 décrit chronologiquement les tests réalisés.

S5	9:00	AM	23/01/2023				Essais de groupe centrés						
Test	Fin	Actifs	Passifs	Source		f [Hz]	BPM	Activité	Plaque	Accél.	Amort.	[s]	
A1	11:25	10	2	Métronome				Balancement	12	10	non	240	
						1,2	72					60	
						1,3	78					60	
						1,4	84					60	
						1,5	90					60	
A2	12:15	10	2	Métronome				Balancement	12	10	non	180	
						1,6	96					60	
						1,7	102					60	
						1,8	108					60	
C1	12:41	10	2	Musiques				Balancement	0	10	non	294	
				Survivor	Destiny's Child	1,35	81					98	
				Boys don't cry	The Cure	1,42	85					98	
				In da club	50 cent	1,5	90					98	
C2	12:51	10	2	Musiques				Balancement	0	10	non	351	
				Dancing Queen	ABBA	1,67	100					117	
				Long way 2 go	Cassie	1,77	106					117	
				Give it to me	Timbaland	1,85	111					117	
C3	13:06	10	2	Musiques				Balancement	0	10	non	293	
				Get lucky	Daft Punk	1,93	116					98	
				Smells Like Teen Spirit	Nirvana	1,97	118					98	
				Hung up	Madonna	2,1	126					98	
S1	13:12	17	0	Freed From Desire	Gala	2,15	129	Libre	0	10	non	205	

Tableau 99 : Programme détaillé des essais du matin du 23/01/2023 avec les S5



Figure 154 : Test S1 de danse libre des participants S5

L'après-midi, l'intégralité de la série de tests E a été réalisée mais en limitant le nombre de plaques de force à 3 (Tableau 100). Ceci est dû aux problèmes de mise en veille et d'enregistrement des plaques de force. Par la suite, des tests de la série F de sauts en musique ont été principalement réalisés autour de la fréquence engendrant la résonance de l'ouvrage à la seconde harmonique de l'excitation.

S5	14:00	PM	23/01/2023		Essais de groupe centrés							
Test	Fin	Actifs	Passifs	Source		f [Hz]	BPM	Activité	Plaque	Accél.	Amort.	[s]
E1	14:52	10	1	Métronome				Saut	3	10	non	240
						1,2	72					60
						1,3	78					60
						1,4	84					60
						1,5	90					60
E2	15:04	10	1	Métronome				Saut	3	10	non	180
						1,6	96					60
						1,7	102					60
						1,8	108					60
E3	15:16	10	1	Métronome				Saut	3	10	non	180
						1,9	114					60
						2	120					60
						2,1	126					60
E4	15:31	10	1	Métronome				Saut	3	10	non	180
						2,2	132					60
						2,3	138					60
						2,4	144					60
E5	15:44	10	1	Métronome				Saut	3	10	non	240
						2,5	150					60
						2,6	156					60
						2,7	162					60
						2,8	168					60
F1A	16:10	10	0	Jump Around	House Of Pain	1,78	107	Saut	3	10	non	214
F3B	16:21	10	0	Pump It	Black Eyed Peas	2,55	153	Saut	3	10	non	213
F2C	16:37	10	0	Everytime we touch	Cascada	2,38	143	Saut	3	10	non	197
F3C	16:49	10	0	Hey Ya	Outkast	2,65	159	Saut	3	10	non	235
F3A	17:01	10	0	Miss you	Oliver Tree	2,42	145	Saut	3	10	non	206
S2	17:12	10	0	International love	Pitbull	2	120	Libre	0	10	non	227

Tableau 100 : Programme détaillé des essais de l'après-midi du 23/01/2023 avec les S5

Ind.	D	R	P	A1 / A2		C1 / C2 / C3		S1		E1 à E5		F		Sexe	Age	M [kg]	H [m]	IMC	Ratio
				Accél	Plate	Accél	Plate	Accél	Plate	Accél	Plate	Accél	Plate						
1	6	N	2	1	1	1	sans	1	sans	1	1	1	1	F	21	57,0	170	20	normal
2	6	C	2	2	2	2	sans	2	sans	2	2	2	2	M	20	80,9	182	24	normal
3	6	S	2	3	3	3	sans	3	sans	3	3	3	3	F	20	48,6	162	19	normal
4	6	S	3	4	4	4	sans	4	sans	4	sans	4	sans	M	20	57,4	175	19	normal
5	7	S	1	5	5	5	sans	5	sans	5	sans	5	sans	F	20	61,9	170	21	normal
6	7	S	2	6	6	6	sans	6	sans	6	sans	6	sans	M	21	55,3	170	19	normal
7	7	C	2	7	7	7	sans	7	sans	7	sans	7	sans	F	20	86,5	173	29	surpoids
8	7	N	2	8	8	8	sans	8	sans	8	sans	8	sans	F	20	74,8	163	28	surpoids
9	7	N	1	9	9	9	sans	9	sans	9	sans	9	sans	F	20	58,6	165	22	normal
10	6	N	3	10	10	10	sans	10	sans	10	sans	10	sans	F	20	63,3	171	22	normal
11	6	C	3	sans	11	sans	sans	sans	sans	sans	sans			F	20	52,1	154	22	normal
12	7	C	1	sans	12	sans	sans	sans	sans					M	21	58,4	174	19	normal
13	7	N	3					sans	sans					F	20	55,0	167	20	normal
14	7	S	3					sans	sans					M	21	73,0	181	22	normal
15	7	C	3					sans	sans					F	20	62,0	174	20	normal
16	6	C	1					sans	sans					M	22	76,0	182	23	normal
17	6	S	1					sans	sans					M	20	82,0	180	25	surpoids
Moyenne				12		12		17		11		10		17	20	65	171	22	normal

Tableau 101 : Emplacements, instrumentation et caractéristiques des participants S5

5.2.1.3 Séries d'essais du 24/01/2023 avec les S3

Comme lors des tests précédents, l'acquisition simultanée avec 12 plaques de force n'a pu être réalisée pour les mêmes raisons. Mais le nombre de plaques de force a pu être augmenté. Par ailleurs, l'acquisition par accéléromètres COMETA a très bien fonctionné. Les essais ont débuté avec des tests au métronome pour le balancement et le saut (Tests des séries A/E) autour de la demi-fréquence propre du mode fondamental. Les tests de la matinée sont décrits au Tableau 102.

S3	9:00	AM	24/01/2023		Essais de groupe centrés							
Test	Fin	Actifs	Passifs	Source	f [Hz]	BPM	Activité	Plaque	Accél.	Amort.	[s]	
A1	11:21	10	2	Métronome			Balancement	5	10	non	240	
					1,2	72					60	
					1,3	78					60	
					1,4	84					60	
					1,5	90					60	
A5	11:34	10	2	Métronome			Balancement	5	10	non	240	
					2,5	150					60	
					2,6	156					60	
					2,7	162					60	
					2,8	168					60	
E5	12:01	10	2	Métronome			Saut	5	10	non	240	
					2,5	150					60	
					2,6	156					60	
					2,7	162					60	
					2,8	168					60	
E4	12:12	10	2	Métronome			Saut	5	10	non	180	
					2,2	132					60	
					2,3	138					60	
					2,4	144					60	
A4	12:20	10	2	Métronome			Balancement	5	10	non	180	
					2,2	132					60	
					2,3	138					60	
					2,4	144					60	

Tableau 102 : Programme détaillé des essais du matin du 24/01/2023 avec les S3



Figure 155 : Test S1 de danse libre des participants S3

L'après-midi a été consacrée à des essais en musique en balancement puis au saut (Tableau 103). Ce choix a été fait pour tenir compte du repas de midi qui ne favorise pas physiquement les sauts immédiatement à la suite comme observé la veille. L'intégralité des séries de tests C, F2 et F3 ont été réalisées. Des tests ludiques S ont été réalisés, un nommé S1 pour récompenser les participants et un autre nommé S2 pour leur montrer ce que peut donner une forte résonance.

S3	14:00	PM	24/01/2023		Essais de groupe centrés							
Test	Fin	Actifs	Passifs	Source		f [Hz]	BPM	Activité	Plaque	Accél.	Amort.	[s]
C1	14:19	10	2	Musiques				Balancement	6	10	non	300
				Survivor	Destiny's Child	1,35	81					100
				Boys don't cry	The Cure	1,42	85					100
				In da club	50 cent	1,5	90					100
C2	14:32	10	2	Musiques				Balancement	6	10	non	300
				Dancing Queen	ABBA	1,67	100					100
				Long way 2 go	Cassie	1,77	106					100
				Give it to me	Timbaland	1,85	111					100
C3	14:54	10	2	Musiques				Balancement	6	10	non	300
				Get lucky	Daft Punk	1,93	116					100
				Smells Like Teen Spirit	Nirvana	1,97	118					100
				Hung up	Madonna	2,1	126					100
C4	15:19	10	2	Musiques				Balancement	6	10	non	300
				Freed from desire	Gala	2,15	129					100
				Heads Will Roll	A-trak Remix	2,3	138					100
				Bande organisée	Jul	2,37	142					100
C5	15:30	10	2	Musiques				Balancement	6	10	non	300
				Du propre	Orelsan	2,5	150					100
				Pump It	Black Eyed Peas	2,55	153					100
				Happy	Pharrell Williams	2,67	160					100
F2C	15:45	10	2	Everytime we touch	Cascada	2,38	143	Saut	6	10	non	197
S1	15:57	13	0	Miss you	Oliver Tree	2,42	145	Saut	6	10	non	206
F3B	16:13	10	2	Pump It	Black Eyed Peas	2,55	153	Saut	6	10	non	213
F3C	16:28	10	2	Hey Ya	Outkast	2,65	159	Saut	6	10	non	235
F3A	16:43	10	2	Miss you	Oliver Tree	2,42	145	Saut	6	10	non	206
F2B	16:57	10	2	Memories	David Guetta	2,17	130	Saut	6	10	non	210
F2A	17:10	10	2	Mala Vida	Mano Negra	2,13	128	Saut	6	10	non	174
S2	17:38	16	0	Métronomie		2,50	150	Saut	0	0	non	30

Tableau 103 : Programme détaillé des essais de l'après-midi du 24/01/2023 avec les S3

Indiv.	Dalle	Rangée	Position	A / E / C / F2C		S1		F3 / F2B / F2A		Sexe	Age	M [kg]	H [m]	IMC	Indicateur
				Accél.	Plate	Accél.	Plate	Accél.	Plate						
1	6	N	2	1	10	1	10	1	10	F	20	61,3	163	23	normal
2	6	C	2	2	7	2	7	2	7	M	22	89,4	173	30	surpoids
3	6	S	2	3	3	3	3	3	3	F	22	67,7	161	26	surpoids
4	6	S	3	4	sans	4	sans	4	sans	F	19	55,7	170	19	normal
5	7	S	1	5	sans	5	sans	5	sans	M	28	64,7	170	22	normal
6	7	S	2	6	6	6	6	6	6	F	20	71,8	170	25	normal
7	7	C	2	7	sans	7	9	7	9	M	24	79,3	185	23	normal
8	7	N	2	8	8	8	8	8	8	F	20	55,7	159	22	normal
9	7	N	1	9	sans	9	sans	9	sans	F	19	56,7	162	22	normal
10	6	N	3	10	sans	10	sans	10	sans	M	20	79,9	178	25	surpoids
11	6	C	3	sans	sans	sans	sans	sans	sans	F	19	48,7	160	19	normal
12	7	C	1	sans	sans	sans	sans			M	20	71	182	21	normal
13	7	C	1					sans	sans	F	19	55,1	167	20	normal
	5	C	3			sans	sans								
Moyenne				12		13		12		M/F : 17	21	66	169	23	normal

Tableau 104 : Emplacements, instrumentation et caractéristiques des participants S3

5.2.2 Essais de foule

5.2.2.1 Caractéristiques physiques des participants

Les caractéristiques physiques ont été obtenues sur une base déclarative à l'aide d'une fiche de données personnelles remplie par chacun des participants. Les données détaillées sont en annexe.

Le poids des participants a été contrôlé par mesure sur balance à chaque journée d'essai. Cela permet de disposer du poids de l'individu le jour donné tenant compte de la tenue vestimentaire même s'il peut y avoir des légères variations entre tests (veste ou pull retiré, etc.). La masse moyenne autour de 61 kg est assez faible par rapport à ce que l'on peut retrouver a priori, à savoir 70 kg dans le guide du SETRA [33] ou même 80 kg dans le guide anglais pour les tribunes [27]. Cela peut s'expliquer d'une part par la jeunesse des participants qui statistiquement sont moins corpulents entre 18 et 25 ans que pour les classes d'âges supérieures [32]. D'autre part, la population féminine représente plus de 77% des participants et il est également à noter que le poids moyen de cette population sur cette tranche d'âge est plus faible d'une dizaine de kg par rapport au poids moyen de la population masculine [32].

Individus	N	Age	16-mars		13-avr		20-avr		Taille [cm]	IMC	Indicateur
			Nombre	Masse [kg]	Nombre	Masse [kg]	Nombre	Masse [kg]			
STATS	M/F	MAX	M/F	MAX	M/F	MAX	M/F	MAX	MAX	MAX	MAX
	131	34	104	88	97	102	112	102	197	31	obésité modérée
	F	MOY	F	MOY	F	MOY	F	MOY	MOY	MOY	MOY
	101	18,8	81	61,3	75	61,3	87	61,5	169	22	normal
	M	MIN	M	MIN	M	MIN	M	MIN	MIN	MIN	MIN
30	16	23	45	22	45	25	43	154	16	maigre	

Tableau 105 : Caractéristiques physiques générales des participants S2 pour les essais de foule

Données personnelles moyennes	16/03/2023	13/04/2023	20/04/2023
Nombre de personnes	102	97	108
Pratique la danse en club ou en association	19%	19%	17%
Pratique de la danse dans le cercle privé	65%	64%	65%
Niveau de danse (Pas bon : 0 / Moyen : 0,5 / Bon : 1)	0,5	0,5	0,5
Nombre de soirées par an	18,3	16,4	19,1
Nombre de concerts par an	3,1	2,5	3,3

Tableau 106 : Données personnelles moyennes des participants S2 par journée d'essai



Figure 156 : Participants S2 en amphithéâtre avant les essais du 20 avril

5.2.2.2 Journées d'essais

5.2.2.2.1 Essais du 16/03/2023 avec les participants S2

Pour se rapprocher au plus près des conditions réelles des concerts, les groupes de chaque dalle sont constitués par affinité. Sur chaque dalle, un leader s'est porté volontaire pour être instrumenté et coordonner la synthèse des ressentis du groupe à l'issue de chaque test. Les tests ont commencé avec la série de balancement au métronome. Afin d'être sûrs de disposer de mesures avec le même groupe excitant la structure à la résonance avec la seconde harmonique, les tests A5 et A6 ont été réalisés en priorité. En début d'après-midi, la série A a été achevée. Elle a été suivie de tests en musique avec excitation de type saut. Enfin un dernier test a été réalisé avec un saut coordonné au métronome à 2,7 Hz pour exciter la fréquence propre avec amortisseurs identifiée aux alentours de 5,4 Hz. Tous les essais ont été réalisés avec dalles de surcharge et amortisseurs. La table d'acquisition située initialement à l'extrémité Est a été déplacée au milieu de la travée sud de l'échafaudage en début d'après-midi car la densité de la foule parasitait la liaison sans fil des centrales d'acquisition respectives des capteurs COMETA (crânelage léger) et des plaques de force (échecs d'enregistrement).

S2	9:00	AM	16/03/2023		Essais de foule							
Test	Fin	Actifs	Passifs	Source	f [Hz]	BPM	Activité	Plaque	Accél.	Amort.	[s]	
A1	11:53	102	0	Métronome			Balancement	12	10	Oui	240	
					1,2	72					60	
					1,3	78					60	
					1,4	84					60	
					1,5	90					60	
A5	12:12	102	0	Métronome			Balancement	12	10	Oui	180	
					2,5	150					60	
					2,6	156					60	
					2,7	162					60	
					2,8	168					60	
A6	12:32	102	0	Métronome			Balancement	12	10	Oui	240	
					2,9	174					60	
					3	180					60	
					3,25	195					60	
					3,5	210					60	
S2	14:00	PM	16/03/2023		Essais de foule							
Test	Fin	Actifs	Passifs	Source	f [Hz]	BPM	Activité	Plaque	Accél.	Amort.	[s]	
A4	14:44	102	0	Métronome			Balancement	12	10	Oui	180	
					2,2	132					60	
					2,3	138					60	
					2,4	144					60	
A3	15:03	102	0	Métronome			Balancement	12	10	Oui	180	
					1,9	114					60	
					2	120					60	
					2,1	126					60	
A2	15:20	102	0	Métronome			Balancement	12	10	Oui	180	
					1,6	96					60	
					1,7	102					60	
					1,8	108					60	
F3A	15:46	102	0	Miss you	Oliver Tree	2,42	145	Saut libre	12	10	Oui	206
F3B	16:23	102	0	Pump It	Black Eyed Peas	2,55	153	Saut libre	12	10	Oui	213
F2B	16:43	102	0	Freed from desire	Gala	2,15	129	Saut libre	12	10	Oui	213
F1A	17:06	102	0	Jump Around	House Of Pain	1,78	107	Saut libre	12	10	Oui	232
F2C	17:30	102	0	Everytime we touch	Cascada	2,38	143	Saut libre	12	10	Oui	206
S	17:52	102	0	Métronome		2,70	162	Saut libre	12	10	Oui	140

Tableau 107 : Programme détaillé des essais du 16/03/2023 avec les participants S2

5.2.2.2.2 Essais du 13/04/2023 avec les participants S2

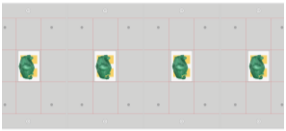




S2	9:00	AM	13/04/2023		Essais de foule						
Test	Fin	Actifs	Passifs	Source	f [Hz]	BPM	Activité	Plaque	Accél.	Amort.	[s]
G1	10:08	12	0	Métronome			Saut	12	10	Oui	240
					1,80	108					40
					2,00	120		40			
					2,20	132		40			
					2,40	144		40			
					2,60	156		40			
					2,80	168		40			
G2	11:37	33	0	Métronome			Saut	12	10	Oui	240
					1,80	108					40
					2,00	120		40			
					2,20	132		40			
					2,40	144		40			
					2,60	156		40			
					2,80	168		40			
G3	11:01	56	0	Métronome			Saut	12	10	Oui	240
					1,80	108					40
					2,00	120		40			
					2,20	132		40			
					2,40	144		40			
					2,60	156		40			
					2,80	168		40			
G4	11:20	76	0	Métronome			Saut	12	10	Oui	240
					1,80	108					40
					2,00	120		40			
					2,20	132		40			
					2,40	144		40			
					2,60	156		40			
					2,80	168		40			
G5	11:43	97	0	Métronome			Saut	12	10	Oui	240
					1,80	108					40
					2,00	120		40			
					2,20	132		40			
					2,40	144		40			
					2,60	156		40			
					2,80	168		40			
E1	12:21	97	0	Métronome			Saut	12	10	Oui	240
					1,7	102					60
					1,8	108		60			
					1,9	114		60			
					2	120		60			
E2	12:39	96	0	Métronome			Saut	12	10	Oui	240
					2,1	126					60
					2,2	132		60			
					2,3	138		60			
					2,4	144		60			
E3	12:59	96	0	Métronome			Saut	12	10	Oui	240
					2,5	150					60
					2,6	156		60			
					2,7	162		60			
					2,8	168		60			
E4	13:16	96	0	Métronome			Saut	12	10	Oui	240
					2,9	174					60
					3,1	186		60			
					3,3	198		60			
					3,5	210		60			

Tableau 108 : Programme détaillé des essais du matin du 13/04/2023 avec les S2

L'objectif était de réaliser la série G permettant d'étudier la capacité de coordination au saut suivant la taille du groupe ou de la foule jusqu'à 97 personnes. Pour gagner du temps, des balayages de fréquences de sauts par pas de 0,2 Hz entre 1,8 Hz et 2,8 Hz ont été réalisés pour ces premiers tests. Une fois les tests G terminés, des séquences de sauts au métronome E ont été effectuées mais dorénavant avec une résolution plus fine de 0,1 Hz et une plage de fréquences plus étendue comprises entre 1,7 Hz et 3,5 Hz. Il s'agissait de voir la capacité d'excitation d'un grand groupe notamment pour des fréquences relativement hautes puisqu'il existe encore des débats sur cette limite. Tous ces tests ont été réalisés avec amortisseur.

Les amortisseurs ont été déconnectés à la pause de midi pour réaliser la série H de sauts coordonnés au métronome identique à la série G mais sans amortisseurs. Cette séquence de tests a été clôturée avec un test de marche M1 en présence d'une cinquantaine de participants. De petits tests d'applaudissements ont été réalisés par la même occasion pour vérifier le comportement de l'ouvrage non amorti dans un cadre d'usages événementiels différent comme les défilés de mode.

S2	14:00	PM	13/04/2023			Essais de foule						
Test	Fin	Actifs	Passifs	Source	f [Hz]	BPM	Activité	Plaque	Accél.	Amort.	[s]	
H1	14:51	12	0	Métronome			Saut	12	10	Non	240	
					1,80	108					40	
					2,00	120					40	
					2,20	132					40	
					2,40	144					40	
					2,60	156					40	
					2,80	168					40	
H2	15:14	32	0	Métronome			Saut	12	10	Non	240	
					1,80	108					40	
					2,00	120					40	
					2,20	132					40	
					2,40	144					40	
					2,60	156					40	
					2,80	168					40	
H3	15:39	53	0	Métronome			Saut	12	10	Non	240	
					1,80	108					40	
					2,00	120					40	
					2,20	132					40	
					2,40	144					40	
					2,60	156					40	
					2,80	168					40	
H4	16:05	74	0	Métronome			Saut	12	10	Non	240	
					1,80	108					40	
					2,00	120					40	
					2,20	132					40	
					2,40	144					40	
					2,60	156					40	
					2,80	168					40	
H5	16:29	95	0	Métronome			Saut	12	10	Non	240	
					1,80	108					40	
					2,00	120					40	
					2,20	132					40	
					2,40	144					40	
					2,60	156					40	
					2,80	168					40	
M1	16:57	49	0	Aucune	Libre	Libre	Marche et appl.	0	10	Non	180	

Tableau 109 : Programme détaillé des essais de l'après-midi du 13/04/2023 avec les S2

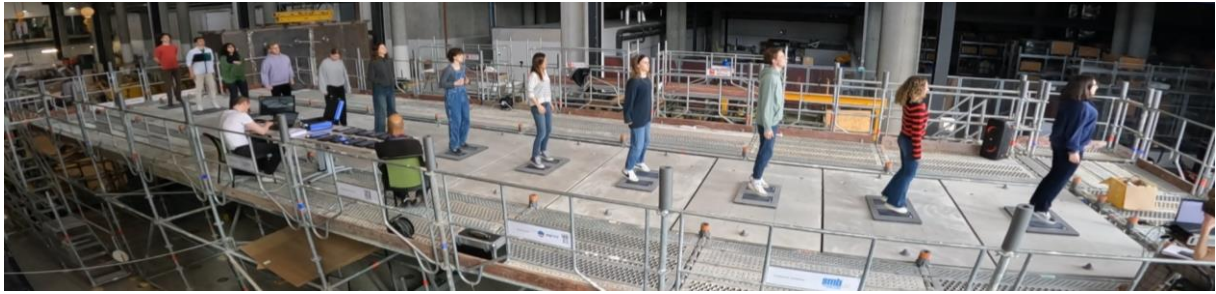


Figure 157 : Tests de coordination G1 à G5 avec les participants S2

5.2.2.2.3 Essais du 20/04/2023 avec les participants S2

Cette séquence de tests a permis de compléter les essais en musique du 16 mars au cours desquels des titres compris entre 2,1 Hz et 2,6 Hz avaient déjà été diffusés. Il s'agissait donc d'explorer des fréquences à la fois plus basses jusqu'à 1,7 Hz et plus hautes jusqu'à 3,5 Hz.

Les tests ont débuté avec des titres à faibles fréquences pour que les participants s'échauffent progressivement. Le test F1A a donc principalement valeur de mise en condition. Le test F1B a servi d'échauffement pour passer à des rythmes plus élevés et plus énergétiques dans l'esprit d'une première partie de concert.

Finalement, les titres de plus de 2,8 Hz n'ont pas été diffusés car il n'y avait pas un grand consensus de la part des participants sur l'appréciation des titres existants à ces pulsations et d'autre part car certains participants ne semblaient plus motivés pour exercer une action énergétique de type saut. Par chance, le test E4 du 13 avril avait déjà été réalisé pour caractériser cet aspect mais uniquement au métronome.

S2	14:00	PM	20/04/2023		Essais de foule							
Test	Fin	Actifs	Passifs	Source		f [Hz]	BPM	Activité	Plaque	Accél.	Amort.	[s]
F1A	15:00	108	0	Musiques				Libre	12	10	oui	672
				Policeman	Eva simons	1,75	105					194
				Give it to me	Timbalan	1,85	111					234
				Titi me pregunto	Bad bunny	1,85	111					244
F1B	15:25	108	0	Musiques				Libre	12	10	oui	734
				Get lucky	Daft Punk	1,93	116					248
				Black Betty	Ram Jam	1,95	117					237
				Femme like u	Kamaro	1,95	117					249
F3C	15:51	108	0	Musiques				Libre	12	10	oui	653
				Blitzkrieg	Kris Winther	2,13	128					185
				Somebody told me	Speedogang	2,58	155					222
				Partenaire particulier	Partenaire partic.	2,60	156					246
F4A	16:13	108	0	Musiques				Libre	12	10	oui	717
				Maniac	Michael Sembello	2,65	159					244
				I follow Rivers	Darren Styles	2,67	160					187
				Phonky Tribu	Funk Tribu	2,67	160					286
F1C	16:36	108	0	Musiques				Libre	12	10	oui	915
				Smells Like Teen Spirit	Nirvana	1,97	118					302
				Gimme! Gimme! Gimme!	ABBA	1,98	119					293
				One More Time	Daft Punk	2,05	123					320
F4B	16:58	108	0	Musiques				Libre	12	10	oui	643
				Good 4 U	Olivia Rodrigo	2,77	166					178
				Lonely Boys	The Black Keys	2,78	167					193
				Danza Dell'autunno rosa	Talco	2,85	171					272
CAR AA	17:21			Métronome				Saut	12	10	oui	320
		81	2			2,70	162					40
		70	2			2,70	162					40
		52	2			2,70	162					40
		52	2			2,00	120					40
		34	2			2,70	162					40
		34	2			2,00	120					40
		16	2			2,70	162					40
		16	2			2,00	120					40
CAR SA	17:36			Métronome				Saut	12	10	non	360
		81	2			2,60	156					60
		70	2			2,60	156					60
		52	2			2,60	156					60
		34	2			2,60	156					60
		16	2			2,60	156					60
		16	2			2,00	120					60

Tableau 110 : Programme détaillé des essais de l'après-midi du 20/04/2023 avec les S2

Il a enfin été possible de faire des essais complémentaires au métronome avec et sans amortisseurs au voisinage de la résonance ou à une fréquence d'excitation classique de 2 Hz avec des groupes de taille décroissante (Tests CAR du Tableau 110).



Figure 158 : Préparation du lancement de la série de tests F avec les participants S2



Figure 159 : Test F2B avec les participants S2

On notera dans le tableau de positionnement (annexe 4) la présence de 3 participants qui sont non repérés sur la dalle pour les tests. Cela s'explique par le fait que le nombre de participants dépassait la capacité de la dalle (108 participants maximum). Ces trois participants ont cependant joué un rôle dans les essais : le participant 111 était le photographe volant de la session, le participant 20 a servi de danseur de référence sur l'échafaudage sans pour autant imposer le mouvement et le participant 21 était observateur extérieur pour juger de l'adéquation de la musique à la réactivité du groupe.

5.2.2.3 Traitement des signaux

5.2.2.3.1 Mesure de l'action des individus

Sur les figures suivantes, on choisit de représenter l'action du leader 5 (participant 87 de 48,7 kg) situé sur la dalle 5 pendant le test F2B d'excitation libre en musique avec le titre *Freed from desire* de Gala. On choisit spécialement un secteur où l'on peut identifier une modification de l'action : entre 127 s et 130 s en observe une action de balancement et à partir de 130 s, une action de saut.

Les capteurs COMETA délivrent un signal d'accélération brut selon les 3 coordonnées locales du capteur. On recompose ainsi la norme du vecteur accélération qui est essentiellement vertical (Figure 160).

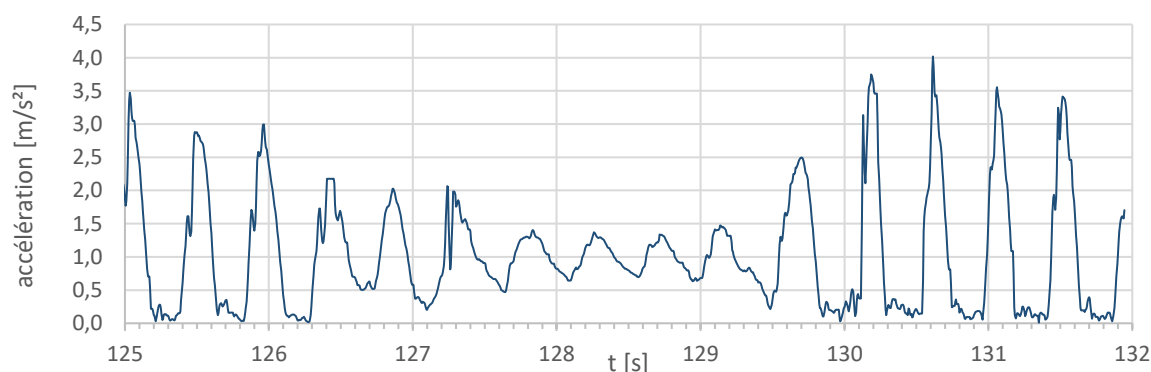


Figure 160 : Norme de l'accélération brute du capteur COMETA du leader 5 pour le test F2B

Le logiciel d'analyse COMETA permet de filtrer le signal avec un filtre passe bas Butterworth d'ordre 5 de fréquence de coupure 10 Hz. C'est ce qui est appliqué à tous les signaux des capteurs COMETA (Figure 161) en se référant à l'étude de McDonald et Zivanovic [4].

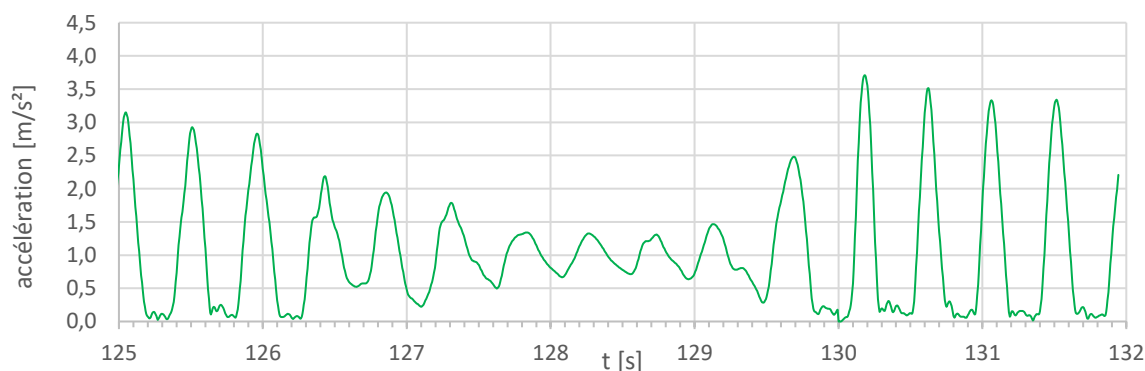


Figure 161 : Norme de l'accélération filtrée du capteur COMETA du leader 5 pour le test F2B

On peut comparer cette mesure indirecte par accéléromètre filtrée à la mesure directe par plaque de force (Figure 162). On observe une très bonne corrélation entre les deux signaux. On note de légers écarts en pointe des signaux au saut. Cela s'explique principalement par le fait que les personnes ne retombent pas tout le temps parfaitement sur les plaques de force (le pied déborde parfois sur le cadre en mousse).

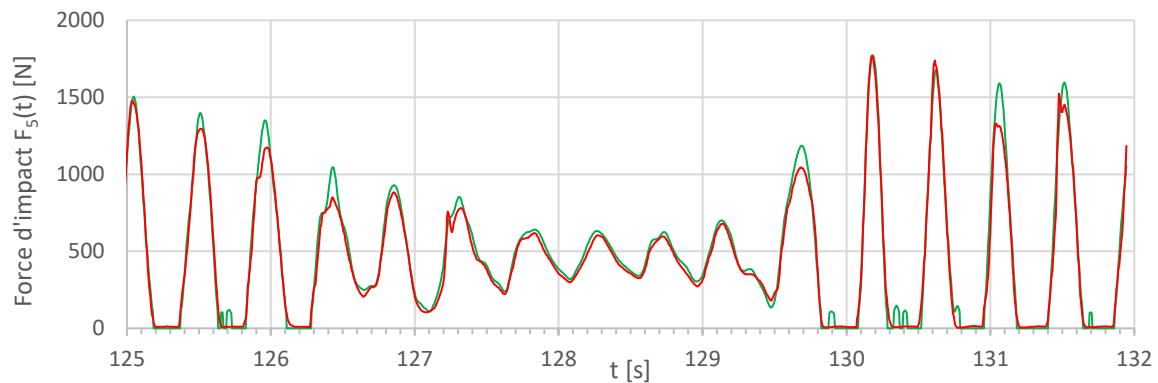


Figure 162 : Impact du leader 5 au test F2B via plaque de force (rouge) et accéléromètre (vert)

Aussi, là où la plaque de force donne un résultat certes direct, l'accéléromètre a l'avantage de pouvoir s'affranchir de la zone de retombée de la personne. Cela rend la mesure avec accéléromètre plus fiable d'autant plus que l'acquisition était synchrone entre accéléromètres pour les tests. Ce n'était pas le cas pour les plaques de force qui de plus avait bien plus de problèmes d'acquisition à l'usage. Par la suite, on ne se basera donc que sur les résultats issus de la mesure indirecte des accéléromètres tout en vérifiant systématiquement la correspondance avec le signal des plaques de force à disposition.

5.2.2.3.2 Acquisition de la réponse de la structure

Par précaution, une redondance a été réalisée au niveau de l'instrumentation du prototype. La principale information d'intérêt est l'accélération au centre du platelage. Elle peut être obtenue en dérivant deux fois le déplacement obtenu avec les capteurs LVDT, directement avec les accéléromètres LORD ou les deux capteurs COMETA disposés à côté des capteurs LORD pour synchroniser l'action.

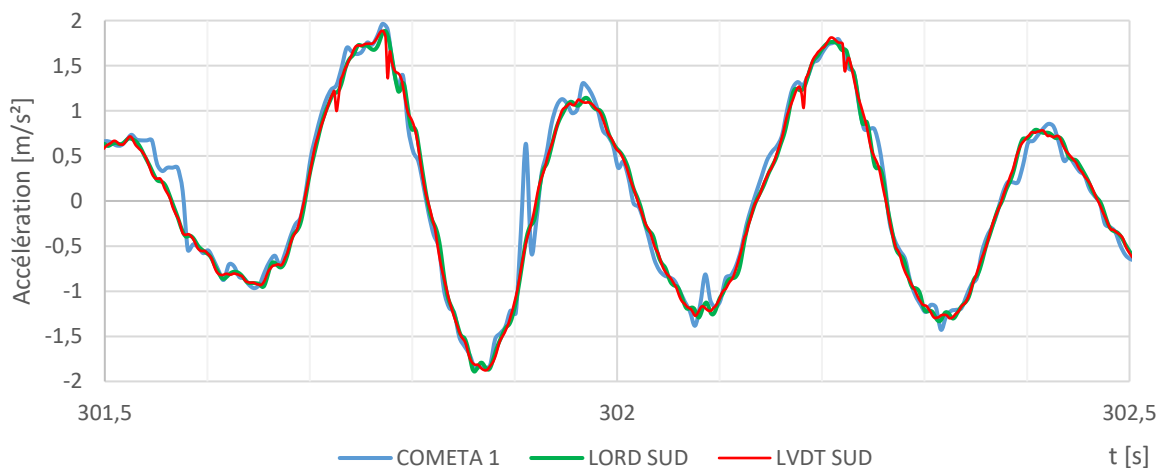


Figure 163 : Exemple d'accélération au centre issus des capteurs COMETA, Lord et LVDT

Les capteurs COMETA ont l'inconvénient de présenter un crénelage un peu plus marqué que les autres capteurs (Figure 163). La précision de l'acquisition étant plus fiable sur les capteurs LVDT filaires, on se basera donc sur ces derniers pour tous les résultats d'analyse. Les capteurs LORD non reliés en filaire correspondent néanmoins très bien au signal dérivé du capteur LVDT.

5.2.2.4 Synthèse de résultats

5.2.2.4.1 Séries A au balancement coordonné, E au saut coordonné et F en excitation libre

Sur la Figure 164 sont représentées les accélérations maximales atteintes pendant les trois grandes séries de tests réalisées avec la foule. Pour mémoire, les séries A, E et F ont été réalisées avec amortisseurs.

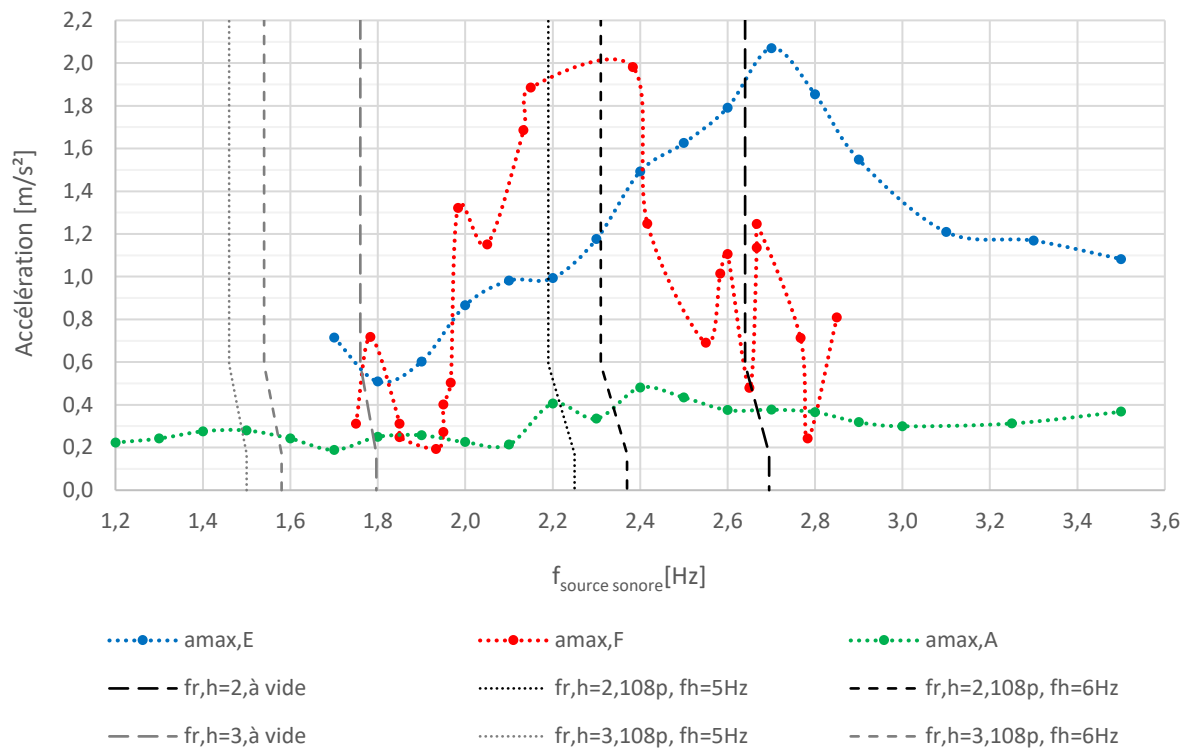


Figure 164 : Accélération maximales pics des séries E, F et A avec les S2 en fonction du tempo

La série E de saut au métronome laisse apparaître un pic d'accélération assez net aux alentours de 2,7Hz sur la Figure 164. Ce pic n'est pas éloigné de la fréquence du mode fondamental divisé par deux d'après les tests d'identification avec exciteur. La foule au saut ne semble donc pas modifier la fréquence propre du prototype à vide équipé d'amortisseurs.

En revanche si on examine les accélérations de la série A en balancement au métronome, on observe deux pics autour de 2,2Hz et 2,4Hz. On semble donc observer un décalage de la fréquence propre qui serait dû à la participation à la masse modale de la foule en contact. Comme on le présentera plus en détail au chapitre suivant, on peut estimer que la fréquence propre diminue effectivement dans cette tranche de fréquence. Sur la Figure 164, on repère la fréquence propre fondamentale estimée du système couplé divisée par deux pour deux fréquences propre hypothétiques des individus f_h : 5 Hz et 6 Hz. Mais la fréquence propre associée au système couplé foule-structure peut varier à chaque test selon la posture des participants qui peuvent en conséquence avoir une fréquence propre variable qui influe sur l'amortissement global équivalent et la fréquence propre du système couplé. Cela peut expliquer l'observation de plusieurs pics au lieu d'un pic unique.

La série F en excitation libre avec musique semblent constituer un entre-deux entre les séries E et A. On observe de multiples pics qui peuvent laisser penser à une variabilité de la fréquence propre du mode fondamental du système couplé suivant que la foule soit principalement en train de sauter ou

de se balancer sur l'ouvrage avec des situations hybrides. On observe ainsi des pics autour de 2,7 Hz et entre 2,2 Hz et 2,4 Hz. On note également un pic vers 1,8 Hz qui peut s'expliquer par la mise en résonance de la foule à la troisième harmonique pour une fréquence propre qui correspondrait à l'ouvrage à vide soit environ 5,4 Hz. Les autres fluctuations peuvent être liées à des fluctuations d'intensité de l'excitation suivant les musiques. C'est un phénomène beaucoup plus aléatoire que l'excitation au métronome au balancement ou au saut car les participants étaient alors assez réguliers en intensité.

Pour illustrer les facteurs d'impact des 10 leaders situés sur les dalles 2 à 11 (leader i sur dalle i), on construit trois valeurs pour chaque test :

- La moyenne des facteurs d'impact maximaux de chacun des 10 leaders (capteurs COMETA) :

$$k_{p,max,moy,10} = \frac{\sum_{i=2}^{11} k_{p,max,i}}{10} \quad (109)$$

With :

$$k_{p,max,i} = \frac{\max(F_i(t))}{G_i} \quad (110)$$

- La valeur maximale du facteur d'impact moyen équivalent à l'action simultanée de 10 leaders :

$$k_{p,moy,max,10} = \max(k_{p,moy,10}(t)) \quad (111)$$

Avec l'impact moyen défini par la somme des actions individuelles $F_i(t)$ divisée par la somme des poids G_i des 10 leaders pris en compte :

$$k_{p,moy,10}(t) = \frac{\sum_{i=2}^{11} F_i(t)}{\sum_{i=2}^{11} G_i} \quad (112)$$

- La valeur maximale de la valeur efficace sur $T = 10$ s de l'impact moyen majorée par $\sqrt{2}$. Cette valeur permet de donner l'allure de l'impact maximal lissé sur 10 s :

$$k_{p,eff,max,10} = \max(k_{p,eff,10}(t)) \quad (113)$$

Avec :

$$k_{p,eff,10}(t) = 1 + \sqrt{2} \sqrt{\int_{t-T/2}^{t+T/2} \frac{1}{T} (k_{p,moy,10}(t') - 1)^2 dt'} \quad (114)$$

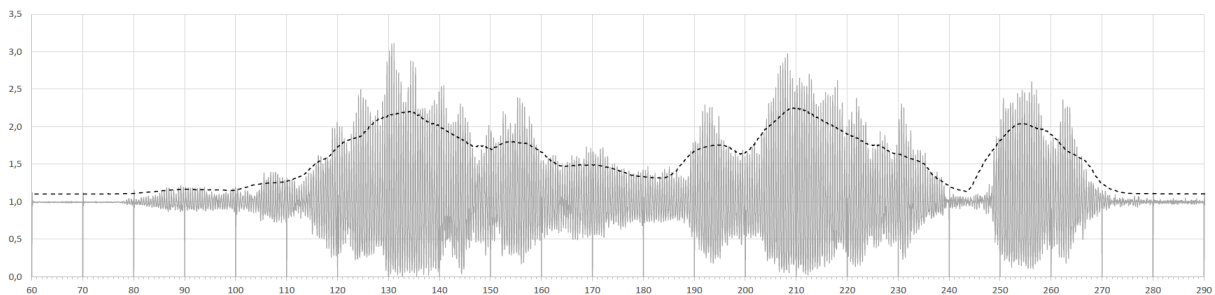


Figure 165 : $k_{p,moy,10}(t)$ en gris et $k_{p,eff,10}(t)$ en noir pour le test F2B (Freed from desire)

Sur la Figure 166, les facteurs d'impact pour les trois séries A, E et F sont représentés. On constate que la sollicitation pour la série de tests de balancement A est relativement constante avec la fréquence sonore. En revanche, pour la série de tests de saut E, on note que l'impact global est plus important aux alentours de 2,2 Hz. Cela peut traduire une facilité à exercer l'action de saut aux alentours de cette fréquence.

L'impact aux tests libres en musique F a une allure beaucoup plus erratique. Cela traduit les goûts musicaux des participants qui en fonction de la musique réagissent de manière très variable. Cela conduit à des impacts maximums de l'ordre de 4,7 soit un impact type saut normal correspondant à un ratio de contact de 0,33. Les impacts maximums de la série F sont supérieurs aux impacts maximums de la série E. Cela montre bien l'influence de la motivation associée à la source sonore : la musique les incite parfois à se dépenser plus que le métronome [70]. Les valeurs d'impacts les plus faibles de la série F peuvent parfois rejoindre les valeurs de la série de tests au balancement A. Cela signifie que même si certaines musiques ont été plus stimulantes que d'autres, aucune ne les a laissés de marbre.

Ces observations ne reflètent que le comportement des 10 leaders régulièrement répartis sensés représenter l'action des membres de leur groupe sur chacune des dallettes. L'analyse vidéo permet de valider au global l'extrapolation de cette interprétation établie sur un échantillon de participants.

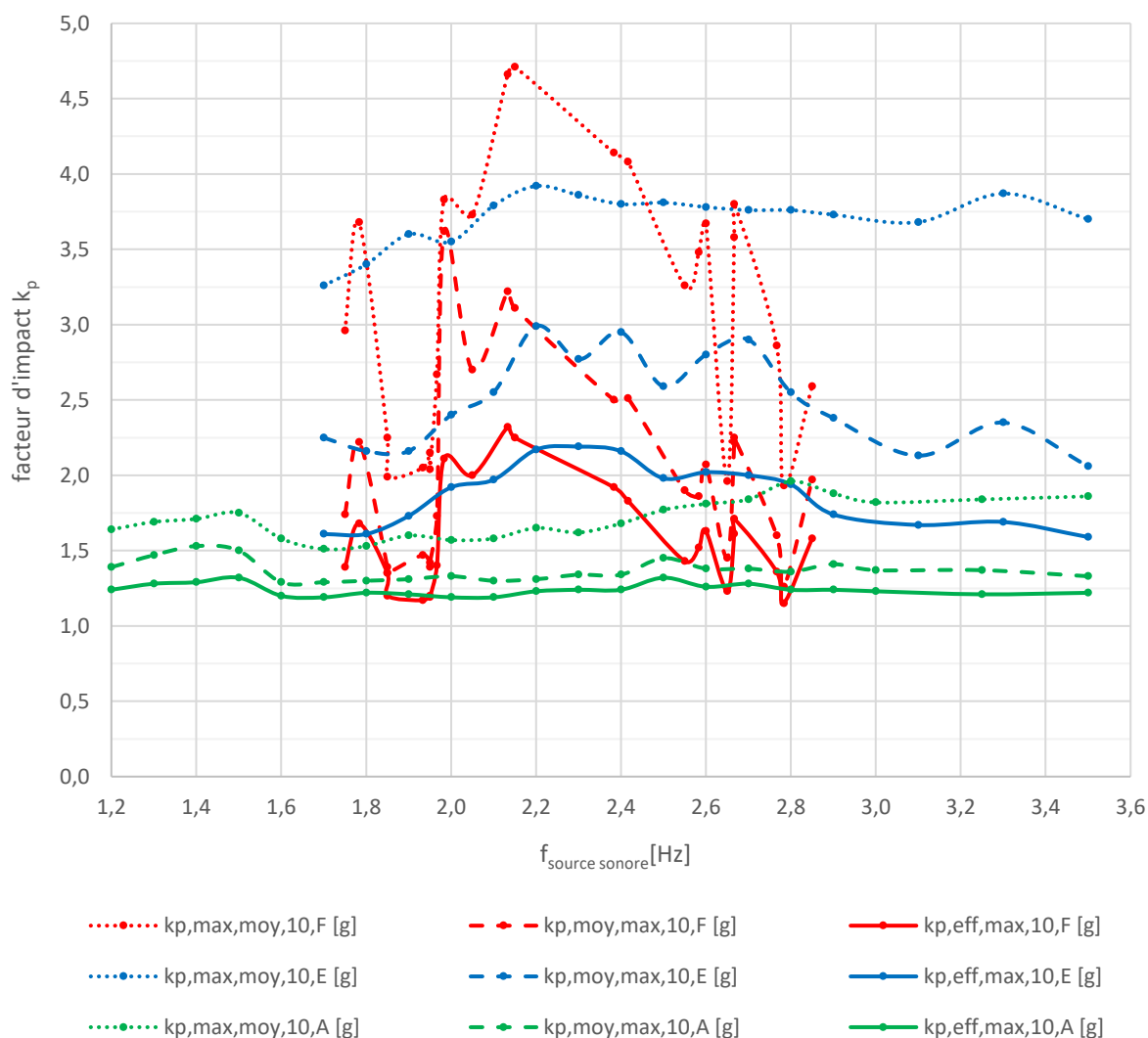


Figure 166 : Facteur d'impact des séries de tests E, F et A en fonction du tempo [Hz]

5.2.2.4.2 Série G de saut coordonné à effectif croissant avec amortisseurs

Sur la Figure 167 sont exposés les résultats d'accélération maximum au centre du prototype avec croissance des effectifs au saut coordonné au métronome et avec amortisseurs. On observe bien l'effet de la perte de coordination entre les individus avec la croissance des effectifs. En effet, l'accélération maximale n'augmente pas proportionnellement à la taille du groupe. On observe toujours un pic autour de 2,6 - 2,7 Hz ce qui concorde avec une mise en résonance à la seconde harmonique. Si on compare le test G5 et la série E, on constate que le test G5 donne des accélérations un peu supérieures. Le test G5 précède la série E et cela peut traduire une fatigue lors des essais E correspondant à une légère baisse d'intensité d'excitation et de coordination. On observe également un phénomène intéressant au passage des tests G2 à G3, c'est-à-dire en passant de 32 personnes à 55 personnes. Autour de 2,6 Hz, l'accélération est la même. Pourtant l'intensité de l'action de la foule estimée via les 10 leaders Figure 168 et l'analyse vidéo ne semble pas varier sensiblement. Ainsi, le fait de presque doubler les effectifs serait compensé par le manque de coordination.

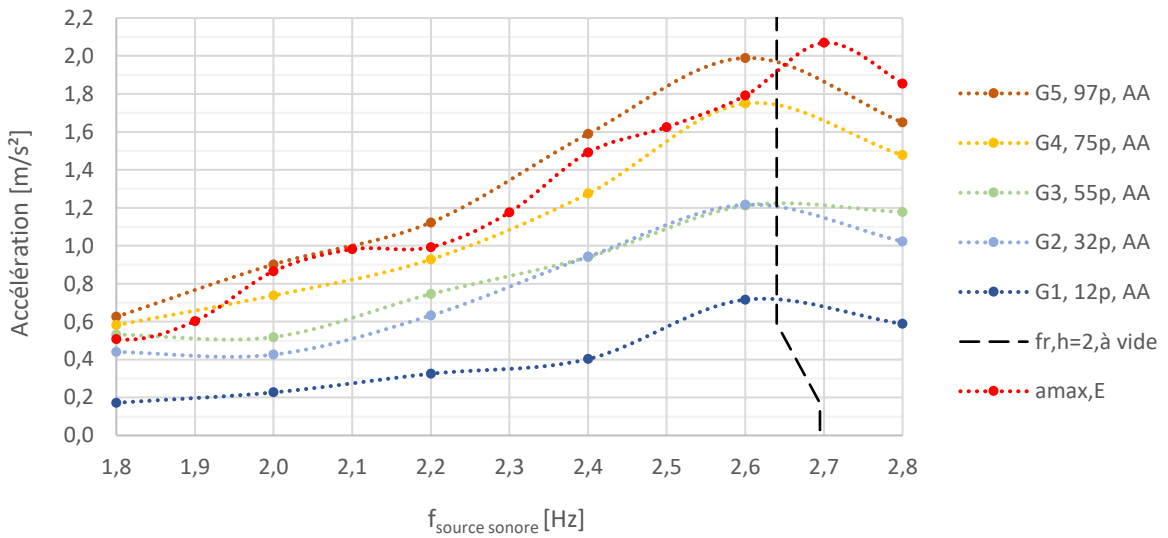


Figure 167 : Accélération maximales pics [m/s²] de la série de tests G en fonction du tempo [Hz]

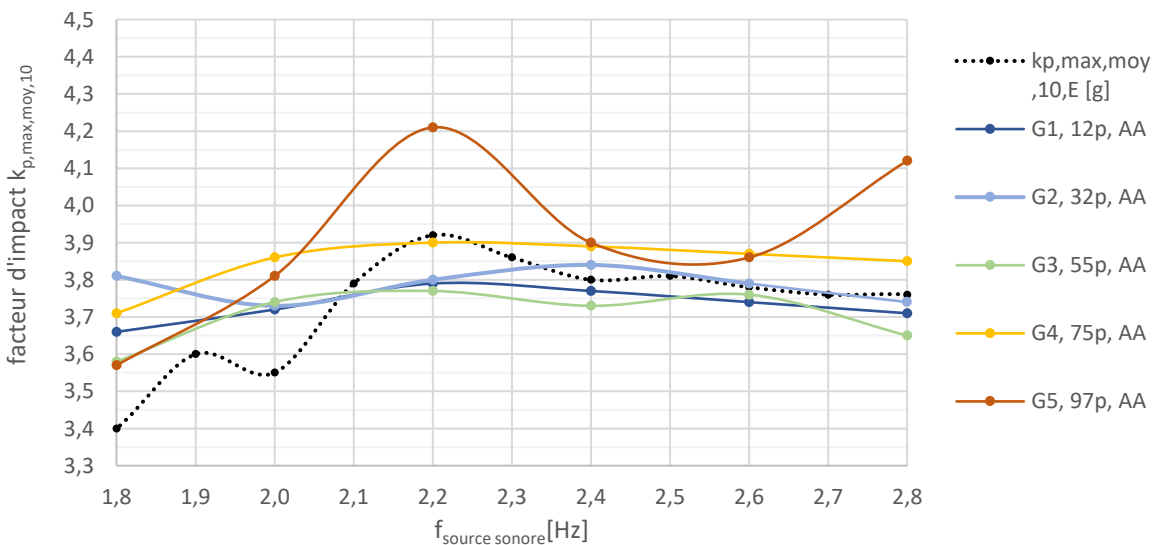


Figure 168 : Facteur d'impact $k_{p,max,moy,10}$ de la série de tests G en fonction du tempo [Hz]

5.2.2.4.3 Série H de saut coordonné à effectif croissant sans amortisseurs

Sur la Figure 169 sont présentés les résultats d'accélération maximum au centre du prototype avec croissance des effectifs au saut coordonné au métronome et sans amortisseurs. On observe que l'évolution de l'accélération est plus erratique. A distance de la résonance, la croissance de l'accélération pic avec le nombre de participants est bien observée. C'est au voisinage de la résonance que l'on peut obtenir des accélérations plus importantes avec un nombre plus faible de personnes. On observe sur la Figure 170 que l'impact est plus élevé au voisinage de la résonance, cela peut s'expliquer par la participation de l'accélération du support qui dépasse parfois les 0,4 g pour les tests H4 et H5. En effet, le facteur d'impact se base sur la mesure de l'accélération absolue de la personne via les capteurs COMETA. L'aspect chaotique des résultats vers la résonance peut s'expliquer par l'importance de l'interaction entre le mouvement du plancher et celui des individus. L'étude spécifique de ce phénomène est récente [34] et pose des questions de compréhension et de modélisation particulièrement complexes.

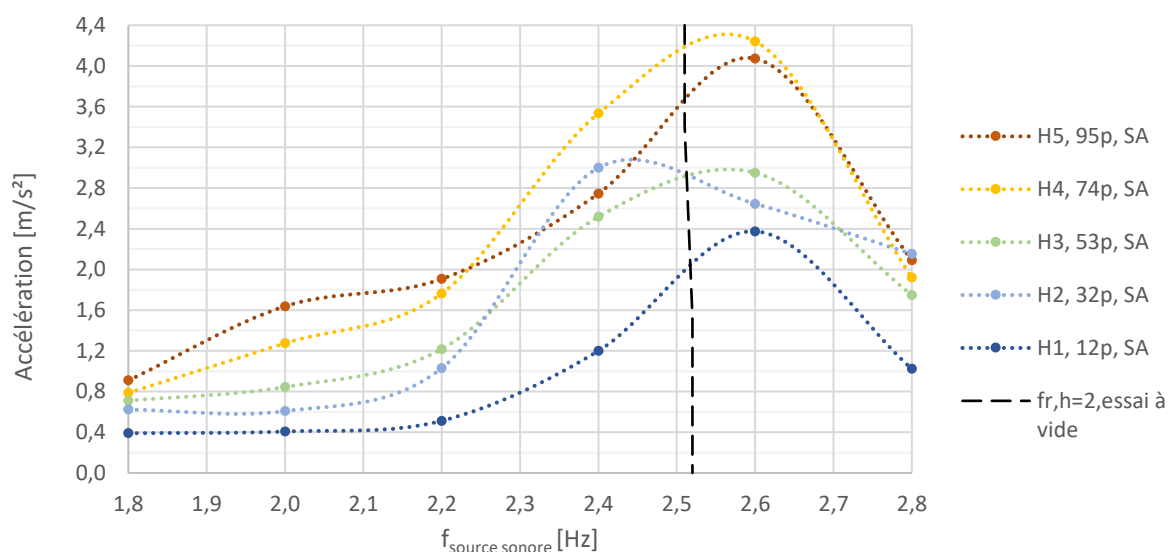


Figure 169 : Accélération maximales pics [m/s^2] de la série de tests H en fonction du tempo [Hz]

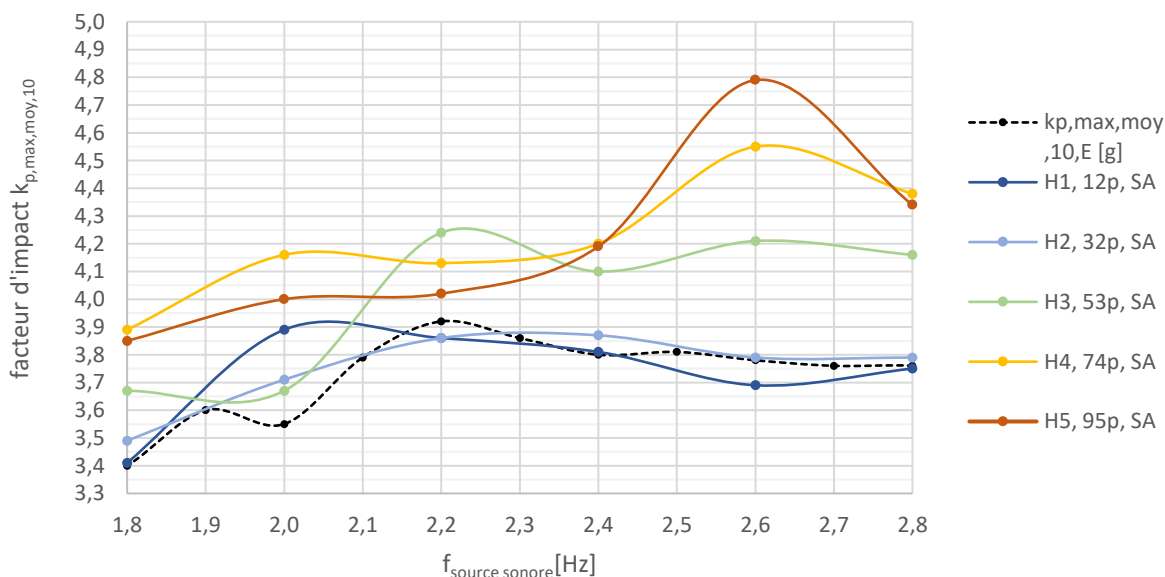


Figure 170 : Facteur d'impact $k_{p,max,moy,10}$ de la série de tests H en fonction du tempo [Hz]

Chapitre 6

Dans ce chapitre, on expose les résultats aux principaux objectifs fixés au chapitre 3 pour ce qui concerne l'interaction de la foule avec la structure. On aborde dans un premier temps la caractérisation de l'action d'une foule tenant compte de paramètres de contexte, de la vibration du support et du nombre de participants. Dans un deuxième temps, on traite de l'amortissement équivalent à la présence d'une foule selon le type de sollicitation.

6 Caractérisation de l'interaction foule-structure

6.1 Sensibilité de la sollicitation de la foule en configuration concert

L'action de la foule s'exprime comme la somme des N actions individuelles $F_i(t)$ que l'on représente usuellement sous la forme d'une décomposition en série de Fourier sur le modèle évoqué en 2.1.1.1

$$F_{tot}(t) = \sum_{i=1}^N F_i(t) \quad (115)$$

La littérature a tendance à généraliser la description de l'action individuelle. En effet, pour un individu donné, les coefficients de Fourier, les fréquences d'excitation et les phases sont en réalité dépendants de l'espace, du temps et de la source musicale. On omet souvent par simplification la part subjective associée à ces variables. La variable d'espace x désigne de manière objective la position mais doit se comprendre en relation avec la surface (*surf*) sur laquelle se déploie l'action mais aussi le contexte environnant (*env*). Le temps t désigne bien sûr l'instant mais il peut être étendu dans son acception à la durée de l'action (Δt) et au moment de la journée (*mom*). La source musicale de tempo ω_m est également à envisager selon le genre musical (*gen*) et la connaissance de cette référence (*hist*). Aussi, on peut définir des variables physiques globales contextualisées propres à l'individu i :

$$x_i(x, surf, env); t_i(t, \Delta t, mom); \omega_{m,i}(\omega_m, genr, hist)$$

Enfin, la réponse du support est un paramètre dont l'interprétation subjective par un individu induit potentiellement une dépendance de l'action à la réponse en accélération du support. La variable d'accélération subjective est ainsi notée : $\ddot{x}_i(x_i, t_i, \omega_{m,i})$

Ainsi on peut réécrire l'expression de l'excitation individuelle en introduisant ces paramètres d'influence subjectifs afin de synthétiser les liens de dépendance :

$$F_i(t) = G_i \left(1 + \sum_{h=1}^H \alpha_{h,i}(\omega_{m,i}, t_i, x_i, \ddot{x}_i) \sin(h\omega_i(\omega_{m,i}, t_i, x_i, \ddot{x}_i)t + \varphi_{h,i}(\omega_{m,i}, t_i, x_i, \ddot{x}_i)) \right) \quad (116)$$

G_i : Le poids de l'individu i

$\alpha_{h,i}, \varphi_{h,i}$: Coefficient de Fourier et phase de l'harmonique h pour l'individu i

ω_i : La pulsation de la première harmonique ($\omega_i = 2\pi f_i$)

Par commodité de calcul, on ramène souvent les calculs à un individu type moyen d'excitation descriptible par les coefficients de Fourier génériques α_h , les phases φ_h et la pulsation ω_p . Afin de représenter l'action de groupe, on y associe un coefficient de coordination C_h . Cette écriture pratique simplifiée ne doit pas pour autant évacuer la sensibilité au contexte. La variabilité subjective de l'action est donc homogénéisée et dispersée dans le coefficient de coordination, dans les coefficients de Fourier ainsi que la fréquence d'excitation :

$$F_{tot}(t) = N G_{moy} \left(1 + \sum_{h=1}^H C_h(N) \alpha_h \sin(h\omega_p t + \varphi_h) \right) \quad (117)$$

Aussi simple que soit l'écriture visant à l'appréhender, il faut donc garder en mémoire que l'excitation générale est potentiellement d'une grande complexité, sensibilité et donc variabilité.

6.1.1 Influence du contexte

6.1.1.1 Nature de la source musicale

6.1.1.1.1 Fréquence sonore et effet d'entraînement

Le prérequis principal à une action collective coordonnée lors d'un concert est la présence de musique. Or il en existe une grande variété. Dans notre cas, on peut étudier les sources musicales selon deux critères que sont les époques ou les genres. Pour le cas de l'étude à la fatigue évoqué au § 3.2.4 et reprise dans un article du CTICM [71], il a déjà été fait référence aux études de Ginty & al. [21] qui établissaient une base de tempos pour les années 60 (30 titres), 70 (30 titres), 80 (30 titres) et 90 (120 titres pour quatre genres musicaux à raison de 30 titres par genre). Une distribution type de fréquences toutes époques et genres confondus a été construite sur cette base de référence.

6.1.1.1.2 Genres et tempos

En préalable à la construction et l'analyse de distributions fréquentielle de titres musicaux, il est important de rappeler quelques éléments de repères. Le Tableau 111 donne les principales plages de tempos observables pour les principaux genres. Les plages de fréquences sont non limitatives car certains titres peuvent parfois sortir exceptionnellement de la plage donnée.

La musique que l'on pourrait usuellement retrouver dans une boîte de nuit courante serait plutôt de type house. Cela signifie que pour ce type de situation, on peut s'attendre à des tempos situés principalement entre 1,9 Hz et 2,2 Hz.

On note de manière plus globale que les genres musicaux les plus courants se situent entre 1,3 Hz et 2,2 Hz. Cependant il faut prendre garde aux situations où l'on pourrait avoir des musiques type punk rock qui peuvent avoir des tempos bien plus élevés, voire très exceptionnellement au-delà de 3,5 Hz avec des titres speedcore. Mais ces genres sont actuellement plus marginaux en raison de leur nature plutôt contestataire ou underground, ce qui restreint leur diffusion sociale par les canaux conventionnels. Mais il ne faut pas pour autant exclure que des manifestations ponctuelles portées exclusivement par ces genres musicaux puissent avoir lieu. De plus, les genres émergents et/ou contestataires peuvent devenir les classiques ou les bases de la musique future.

Néanmoins, il faut relativiser l'évolution des tendances à la lumière d'autres paramètres évoqués plus loin que sont notamment les aptitudes physiques des individus à suivre les rythmes.

Tempo	Largo Larghetto Adagio			Andante						Moderato		Allegro						Presto					Prestissimo					
BPM	60	66	72	78	84	90	96	102	108	114	120	126	132	138	144	150	156	162	168	174	180	186	192	198	204	210		
f [Hz]	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5		
Genre	Reggae / Dub			Hip hop						Latino						Rock pop / Folk						Heavy Metal					House	
				Techno						Electro						Dubstep					Drum and bass					Rock Punk		
																					Hardcore / Speedcore (et au-delà)							

Tableau 111 : Genres musicaux classés en fonction des tempos usuels

6.1.1.1.3 Distributions types courantes

Deux décennies s'étant écoulées depuis l'étude de référence [21], il est proposé d'actualiser les distributions fréquentielles par décennies. Les années 60 sont intégrées même si elles n'ont quasiment pas été citées directement par les sondages effectués auprès des participants âgés d'une vingtaine d'année (Figure 97). Par ailleurs le nombre de titres par décennie de Ginty & al. [21] était un peu faible et la taille des échantillons par décennie a donc été augmentée à 100 titres. Cela permet de construire une distribution moyenne sur 60 ans sur la base de 600 titres.

Afin de ne pas avoir de biais sur la sélection des musiques via des préférences ou des connaissances propres, on se propose d'utiliser les playlists de plateformes de streaming comme Spotify, qui comportait 489 millions d'utilisateurs actifs dans le monde en 2022 [72]. Pour la sélection des titres, on se base sur les playlists internationales sans influence nationale, de langue anglaise pour la majorité, et décrivant les grands titres ayant marqués les dernières décennies (playlist All Out). Il s'agit de playlists que l'on peut qualifier de mainstream susceptibles de représenter statistiquement les goûts d'un grand nombre de personnes et à minima les pays européens. Le détail des 100 titres retenus dans ces playlists sont en général les 100 premiers venus à l'exception des années 80 qui est un mélange entre deux playlists en raison d'une actualisation de la plateforme au moment de la réalisation de l'échantillonnage, ce qui n'a pas vraiment d'influence.

Les distributions par décennies sont les suivantes :

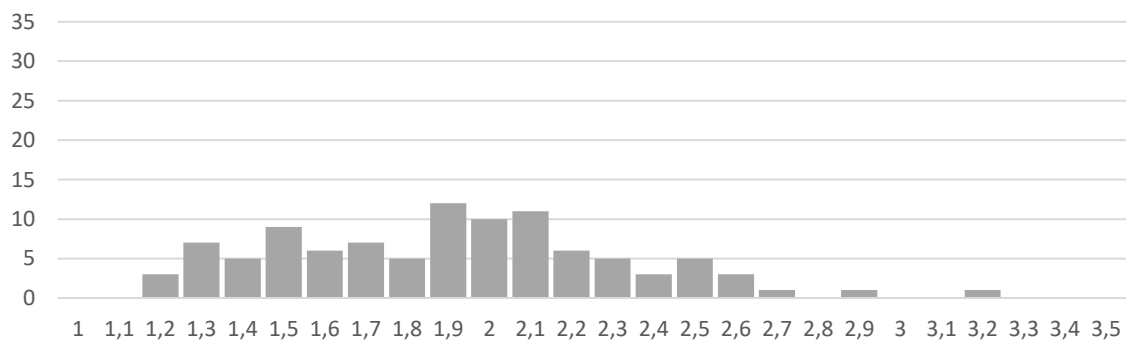


Figure 171 : Distribution fréquentielle [Hz] des années 60 (All out 60s / 100 titres)

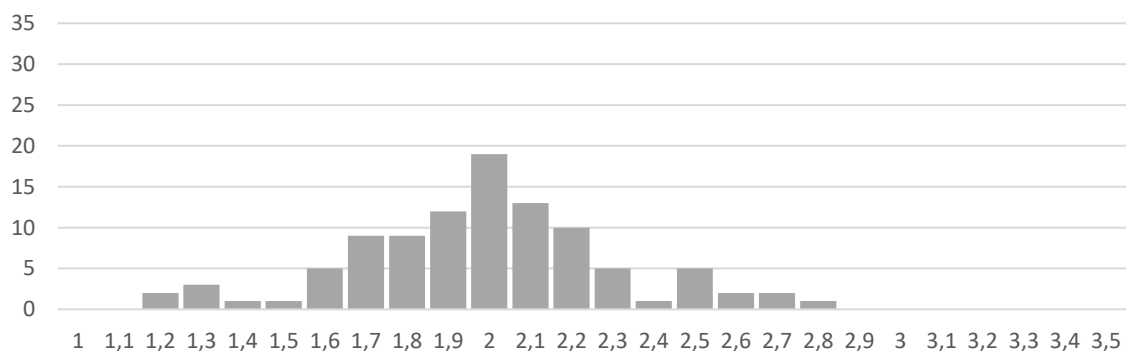


Figure 172 : Distribution fréquentielle [Hz] des années 70 (All out 70s / 100 titres)

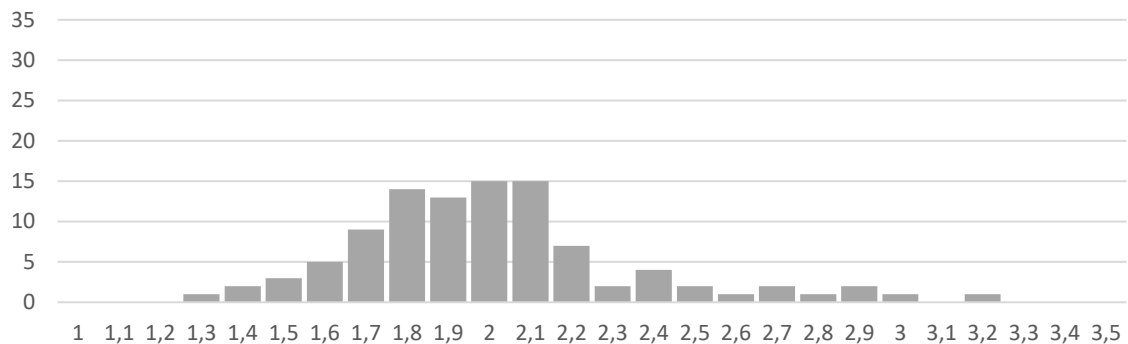


Figure 173 : Distribution fréquentielle [Hz] des années 80 (All out 80s / 100 titres)

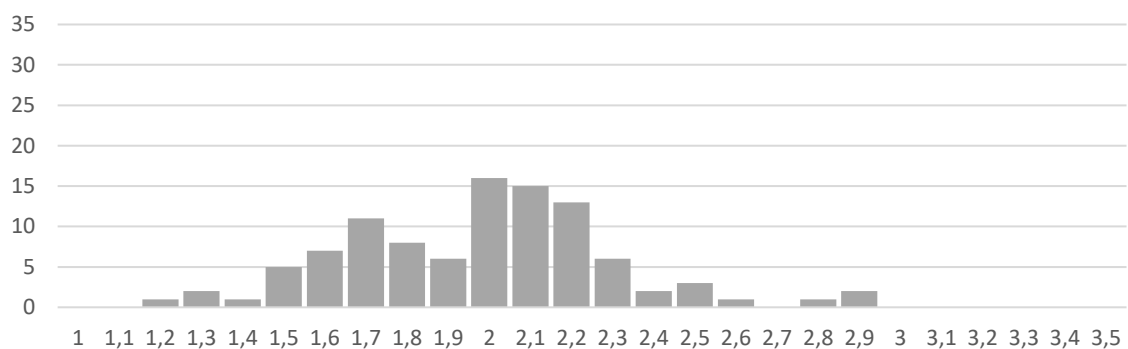


Figure 174 : Distribution fréquentielle [Hz] des années 90 (All out 90s / 100 titres)

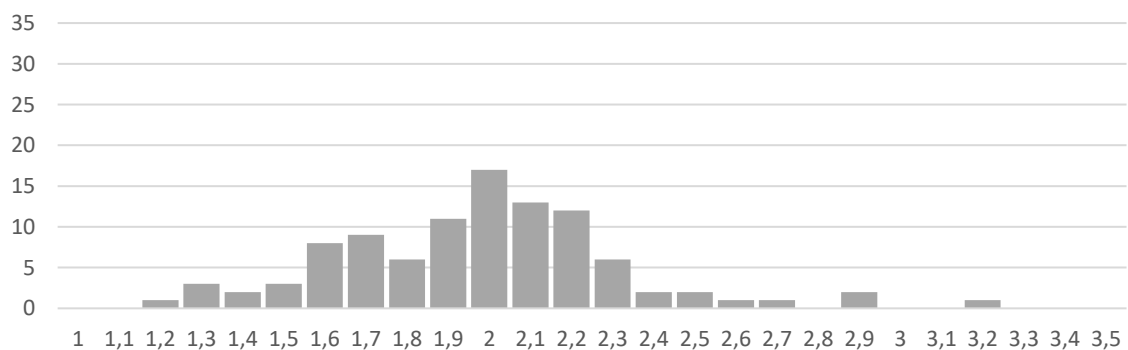


Figure 175 : Distribution fréquentielle [Hz] des années 2000 (All out 2000s / 100 titres)

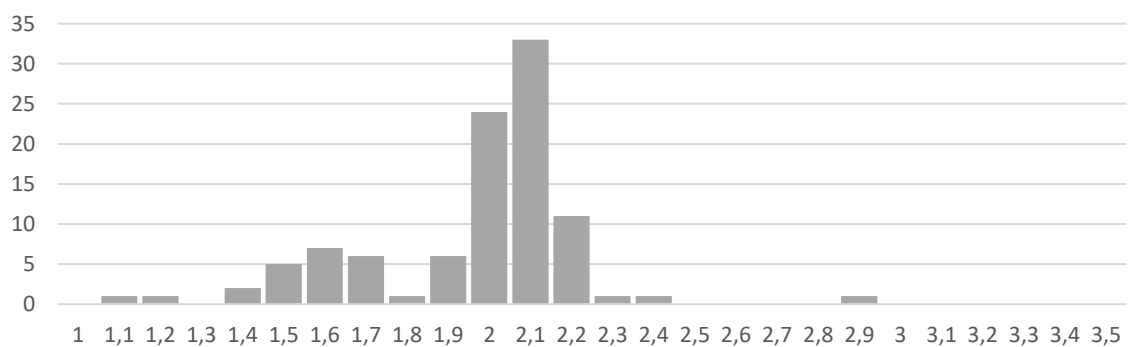


Figure 176 : Distribution fréquentielle [Hz] des années 2010 (All out 2010s / 100 titres)

Quelles que soient les décennies, on observe les tendances suivantes :

- Très peu de titres au-delà de 2,5 Hz (150 BPM).
- Une dominante de titres autour de 2 Hz (120 BPM) avec des pourcentages sensiblement similaires des années 70 à 2000.
- Un pic secondaire aux alentours de 1,7 Hz (100 BPM).
- Très peu de titres en-dessous de 1,5 Hz (90 BPM).

En revanche on note une dominante particulièrement marquée sur les fréquences aux alentours de 2,1 Hz dans les années 2010. Cela traduit une prédominance de type « dance » assez forte que l'on peut retrouver dans la playlist. A l'opposé, la distribution est beaucoup plus répartie dans les années 60 avec notamment des titres moins dansants.

Les genres musicaux ayant prédominés à des époques données se sont intervertis sur des plages de fréquences similaires. Ceci se traduit par une certaine stabilité des distributions à travers le temps. Les musiques dites dansantes en club oscillent généralement autour de 2 Hz que ce soit pour de la house ou du disco. Pour les fréquences plus basses, c'est le genre pop rock et le hip hop qui dominent généralement et qui occupent des fréquences similaires entre 1,6 Hz et 1,7 Hz. Cela peut donc expliquer la constance des pics principaux et secondaires avec les époques.

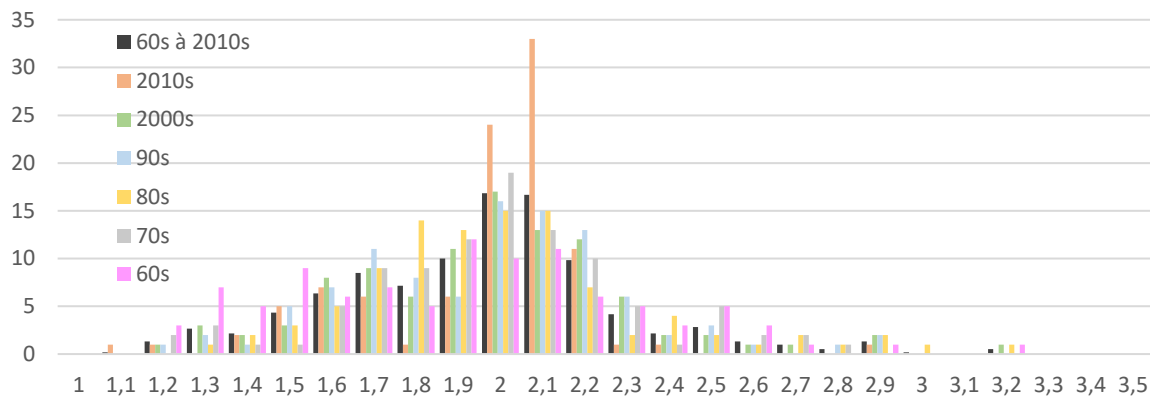


Figure 177 : Comparaison des distributions fréquentielles [Hz] et moyenne sur 60 ans

Sur le Tableau 112, on observe bien les tendances relevées précédemment en les comparant à la moyenne, toutes époques confondues.

Tempo	Largo Larghetto Adagio			Andante						Moderato			Allegro						Presto					Prestissimo		
	60	66	72	78	84	90	96	102	108	114	120	126	132	138	144	150	156	162	168	174	180	186	192	198	204	210
[BPM]	60	66	72	78	84	90	96	102	108	114	120	126	132	138	144	150	156	162	168	174	180	186	192	198	204	210
[Hz]	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5
2010s	0	1	1	0	2	5	7	6	1	6	24	33	11	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2000s	0	0	1	3	2	3	8	9	6	11	17	13	12	6	2	2	1	1	0	2	0	0	1	0	0	0
90s	0	0	1	2	1	5	7	11	8	6	16	15	13	6	2	3	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0
80s	0	0	0	1	2	3	5	9	14	13	15	15	7	2	4	2	1	2	1	2	1	0	1	0	0	0
70s	0	0	2	3	1	1	5	9	9	12	19	13	10	5	1	5	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0
60s	0	0	3	7	5	9	6	7	5	12	10	11	6	5	3	5	3	1	0	1	0	0	1	0	0	0
Moy	0	0	1	3	2	4	6	9	7	10	17	17	10	4	2	3	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0
Corr.	0,1	0,2	1,3	2,7	2,2	4,3	6,2	8,3	7,1	10,0	16,7	16,7	9,8	4,2	2,2	2,8	1,3	1,0	0,5	1,3	0,2	0,1	0,5	0,1	0,1	0,1

Tableau 112 : Distributions par décennies, moyenne sur 60 ans et moyenne corrigée

L'objectif est de définir une distribution statistique de référence indépendante de l'époque et mélangeant tous les genres. Ainsi, une probabilité de 0% sur une plage de 1 Hz à 3,5 Hz n'est pas satisfaisante étant donné la possibilité d'avoir au moins un titre sur des fréquences marginales. Sur la plage de référence de 1 Hz à 3,5 Hz, on corrige à 0,1% minimum la distribution moyenne aux dépens des fréquences doublées pour les basses fréquences, et des fréquences divisées par 2 pour les hautes fréquences. Cette correction a un impact mineur. On obtient ci-dessous une distribution actualisée plus nette que la distribution compilée de Ginty & al. [21] à la Figure 23.

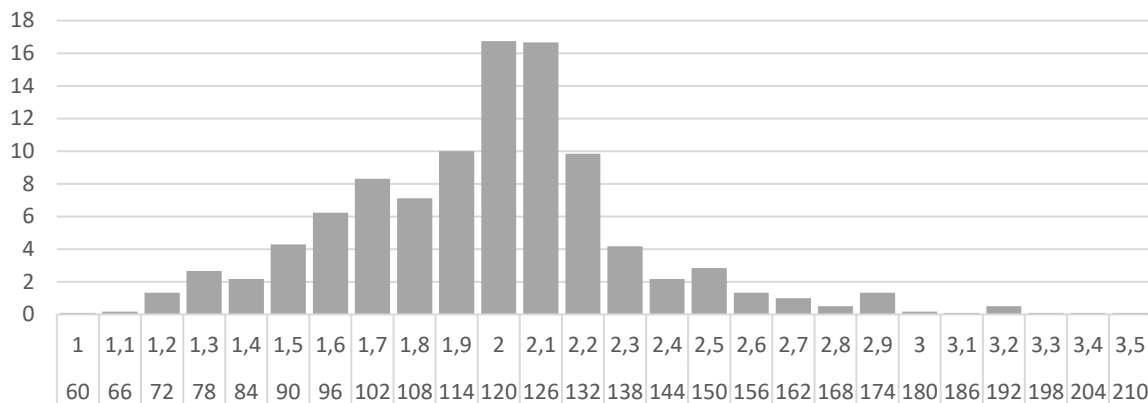


Figure 178 : Distribution fréquentielle [Hz - BPM] moyenne sur 60 ans corrigée

On peut également comparer cette distribution à la distribution des musiques obtenues par sondage avec les étudiants S3 et S5 (380 titres pour 38 étudiants Figure 96). On constate un effet de report de 2 Hz à 2,1 Hz limité à 5% chez les étudiants. Par ailleurs, la playlist des étudiants S3 - S5 comporte un nombre plus important de titres au-delà de 2,2 Hz. Cela peut s'expliquer par la consigne de transmettre des titres qui les font danser en soirée, en festival ou en concert et ceci dans tous les genres. Une fréquence plus élevée étant associée à une excitation plus intense à hauteur de saut donnée (Figure 12), cela peut expliquer la légère surreprésentation de titres au-delà de 2 Hz. Malgré ces écarts, la correspondance en tendance est assez proche.

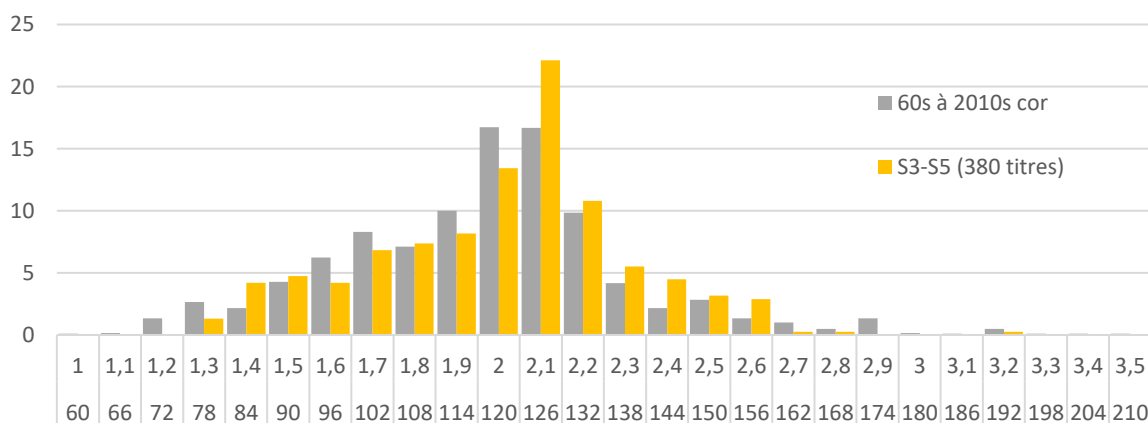


Figure 179 : Comparaison de la distribution référence avec la distribution des étudiants S3-S5

La distribution obtenue traduit d'un autre point de vue que l'on peut s'attendre à un comportement variable suivant la fréquence de la musique diffusée. La fréquence dominante de l'ordre de 2,1 Hz (126 BPM) s'explique par le fait qu'il est physiquement plus aisé ou naturel de se mouvoir à cette fréquence.

6.1.1.1.4 Influence de la musique sur l'action

Il est intéressant d'étudier comment la composition musicale peut influencer le comportement. Prenons pour l'exemple une des musiques ayant eu le plus de succès pendant les essais : *Freed from Desire* de Gala (F2B) au tempo de 2,15 Hz ayant engendré une accélération pic de 1,9 m/s².

Sur la Figure 180, on représente l'accélérogramme au centre de l'ouvrage calé temporellement avec le spectrogramme de la bande son. Sur ce dernier, on peut lire l'intensité relative des fréquences constituant le signal sonore. L'intensité est croissante du bleu vers le jaune en passant par le rouge. On peut déjà identifier en ordonnée une plage de fréquence caractérisée par le Beat (ou Kick) autour de 75 Hz. C'est ce qui va donner la fréquence de saut quand celui-ci se produit. Un peu plus haut, autour de 312 Hz, on retrouve la voix de la chanteuse. Ce sont les deux principaux repères sonores qui permettent la coordination des individus avec la source musicale.

Le drop est le moment où l'on observe un changement de rythme de la musique. Il se produit en général à la suite d'un break ou d'une montée. Le titre musical comporte trois drops repérés en rouge Figure 180. Pour les deux premiers drops, on observe une première phase de montée se traduisant par une légère augmentation de l'accélération vers 1 m/s². Cette première phase est interrompue par le break. On constate que les accélérations maximales de l'ordre de 1,9 m/s² sont enregistrées juste après les drops.

Même si l'intensité sonore et le rythme sont maintenus, on observe que l'accélération décroît progressivement à partir du pic de vibration qui apparaît très soudainement. La durée d'observation des accélérations maximales après les drops est de l'ordre de 10 à 20 secondes avant que l'amplitude maximale ne soit divisée par 2. Ainsi, pour un calcul à la fatigue, il semble pertinent de compter le nombre de drops moyen pour estimer le nombre de cycles à intensité vibratoire élevée. En effet, même si une chanson est au bon tempo par rapport à un mode propre, il demeure une variation d'intensité de l'excitation au cours du morceau qui a tendance à modérer les étendues de contraintes attendues a priori.

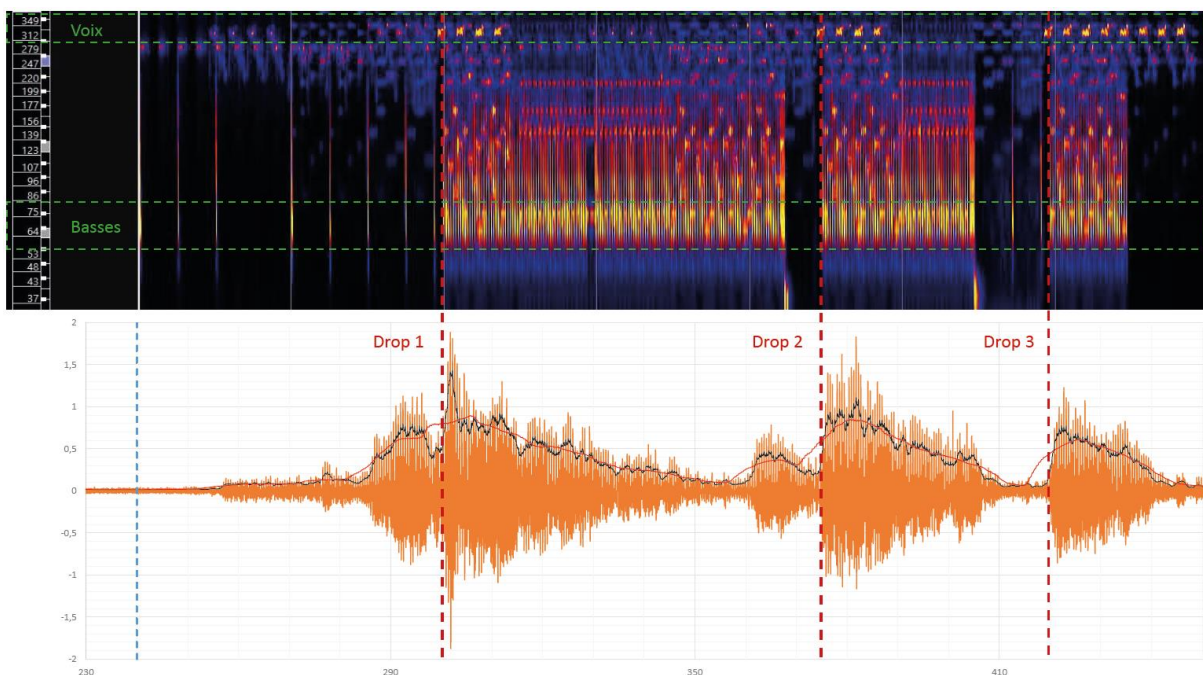


Figure 180 : Spectrogramme du signal sonore F2B en [Hz] et accélérogramme [m/s²] à mi-portée

La troisième reprise de la chanson avant la fin du morceau est isolée (Figure 181). On représente de manière synchrone :

- le spectrogramme du signal sonore (obtenu via le logiciel *Sonic Visualiser*).
- l'accélérogramme en m/s^2 du prototype au centre (obtenu par capteur LVDT, en orange).
- le facteur d'impact moyen $k_{p,moy,10}$ des 10 leaders situés sur les dalles 2 à 11 (en gris).

$$k_{p,moy,10}(t) = \frac{\sum_{i=2}^{11} F_i(t)}{\sum_{i=2}^{11} G_i} \quad (118)$$

A cette échelle, on distingue mieux les basses donnant le tempo à l'action de foule. Le facteur d'impact des 10 leaders $k_{p,moy,10}$ ne représente qu'approximativement l'action globale de la foule mais il permet de constater que dès que les basses s'arrêtent, l'action diminue alors très vite. L'arrêt de l'action de foule est progressive avec une décroissance sur 5 secondes environ. L'action des 10 leaders est relativement stable sur les 10 premières secondes de la reprise, la diminution de l'accélération après le pic peut se traduire par une moins bonne coordination ou par des personnes autres que les leaders modérant leur action avec le temps, ce que ne permet pas de voir $k_{p,moy,10}(t)$.

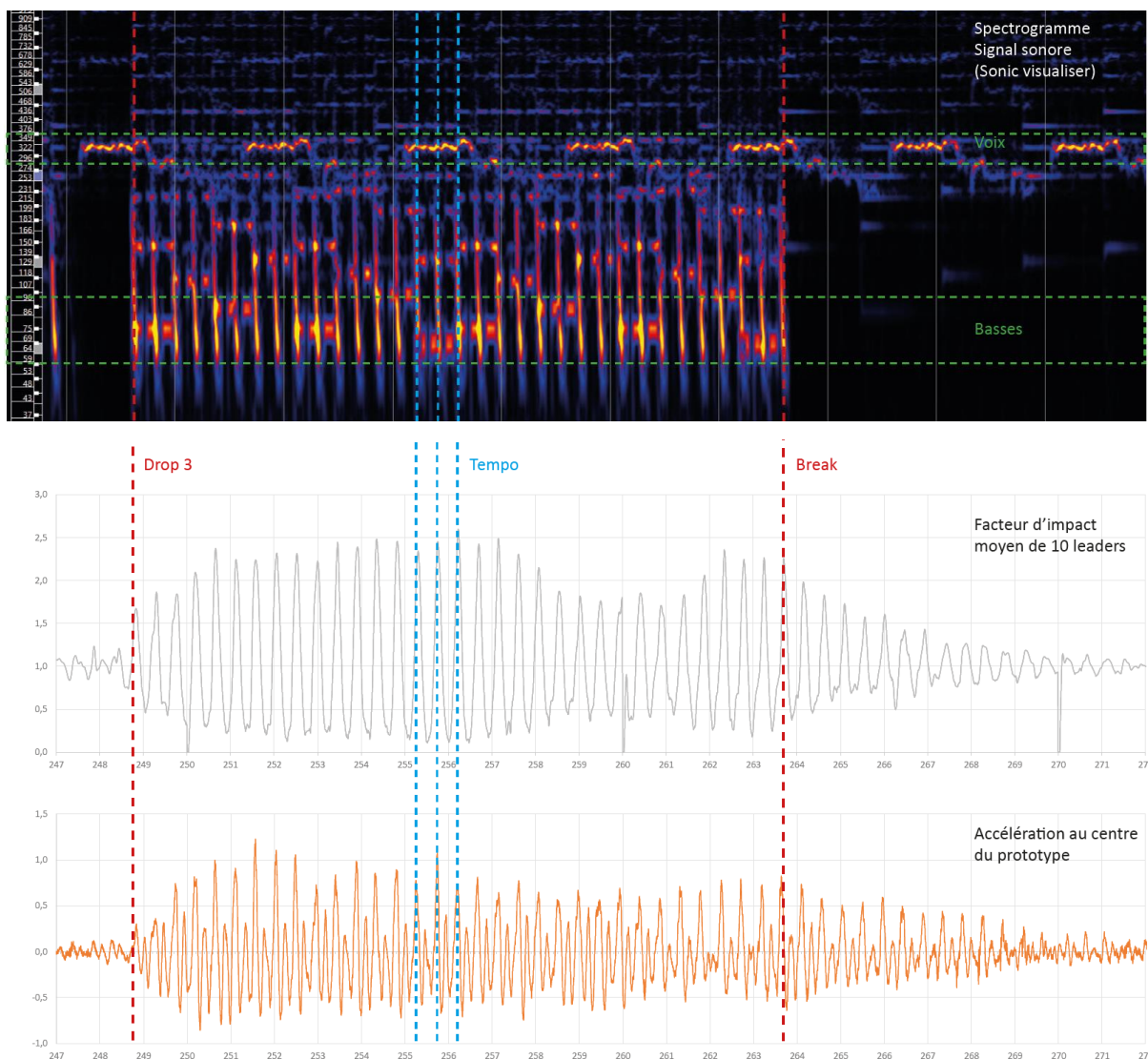


Figure 181 : Spectrogramme sonore, $k_{p,moy,10}(t)$ et accélération à mi-portée [g] du test F2B

6.1.1.2 Espace-temps et contexte social

Au-delà de l'élément moteur central qu'est la musique, l'environnement est un paramètre très important dans le cadre de l'étude d'une action de groupe [73].

Le lieu peut fortement influencer le comportement par son acoustique [74]. En effet, lorsque la musique manquait de puissance, le degré d'investissement baissait, engendrant des discussions qui elles-mêmes induisent une diminution de la perception du signal sonore. Dans le cadre de nos essais, la puissance des installations d'amplification était juste adaptée au volume du lieu. Une autre caractéristique importante est la densité de participants, il aurait été intéressant de pousser les essais jusqu'à 6 personnes/m² pour identifier une éventuelle perte d'impact avec la gêne éventuelle que peut induire une telle densité. Néanmoins il est entendu qu'une telle densité est usuellement locale et pas générale.

Le fait de se retrouver avec un groupe d'amis ou de connaissances peut aussi favoriser un effet d'entraînement, c'est pourquoi les essais ont été construits de sorte à ce que les participants puissent se regrouper par affinités. Pour les essais de groupe avec les S3, il a été constaté l'effet moteur et coordinateur d'un leader auquel chacun des participants se réfère. Dans notre cas, on a potentiellement un effet de connivence plus fort que pour un concert conventionnel puisqu'il s'agit d'élèves d'une même promotion. Néanmoins, aucune musique diffusée ne rentrait dans le cadre d'une reconnaissance à une appartenance commune (hymne de promotion par exemple). D'autre part, nous avons veillé à contrôler le nombre d'observateurs extérieurs pour éviter de perturber les participants aux essais. L'action devait être la plus naturelle possible.

La lumière d'ambiance pourrait également avoir un impact très fort de même que la sensation d'être noyé dans la foule. En effet, les personnes les plus introverties peuvent alors envisager des comportements différents, potentiellement plus énergétiques. Mais la lumière d'ambiance d'une salle de concert, au-delà de son potentiel de désinhibition peut également avoir un effet sur la coordination de par sa synchronisation éventuelle sur le signal sonore. Ce paramètre n'a pas pu être étudié pour ces essais car ces derniers ne pouvaient s'organiser que de jour pour des questions administratives.

Le moment pendant lequel l'action est réalisée exerce aussi une influence. On peut facilement imaginer que l'effet d'entraînement le matin est moindre comme le signalent certains participants. C'est pourquoi les essais en musique ont principalement été réalisés dans l'après-midi avec suffisamment d'écart avec le déjeuner.

L'âge est également un paramètre important à prendre en compte. Celui-ci traduit généralement un stade de développement personnel même si ce n'est pas parfaitement égal entre les participants. Les participants étaient jeunes et encore dans une période d'évolution très rapide. Là où certains seront amenés à se désinhiber avec les années, d'autres s'assagissent. Aussi il est assez difficile d'établir une corrélation claire entre l'âge et une intensité de sollicitation de groupe. D'autre part, l'âge peut également traduire une capacité physique moyenne plus ou moins grande qui dépend elle-aussi de la sportivité des individus. Il y a donc au moins deux dimensions liées à l'âge : la motivation et la capacité physique. En revanche, on peut noter une influence de l'âge sur la réactivité à la source sonore. Le référentiel culturel propre à une tranche d'âge donnée fait que la réaction globale à certains genres ou titre musicaux peut être modifiée. Il ne faut également pas sous-estimer les effets de mode ou de tendance musicales à l'échelle de quelques mois ou d'un groupe spécifique de personnes.

Aussi, la plupart des mesures de la littérature étant réalisées en laboratoire, il apparaît utile de passer à présent à des essais en configuration réelle tenant compte du lieu, de l'âge des participants, de leur degré de sociabilisation antérieure, de leur aptitude à la danse mais aussi de l'année. Les résultats d'essais sont toujours à contextualiser et certaines observations passées peuvent être à actualiser.

6.1.2 Influence de la réponse vibratoire du support sur l'action

6.1.2.1 Niveaux de confort en accélération pour des individus statiques

6.1.2.1.1 Premier test de groupe statique de 40 personnes (Test 3bis)

Lors des essais avec excitateur, un test de ressenti avec 40 personnes statiques regroupées au plus proche du centre de l'ouvrage a été réalisé (Figure 182). L'excitateur mécanique était positionné au centre et l'accélération mesurée au même endroit. Des vibrations harmoniques ont été imposées à des niveaux différents de manière aléatoire. On a tenu compte de l'excentrement des participants en multipliant l'accélération mesurée au centre par le coefficient de forme modale associé au mode 1 (mode 1 de forme sinusoïdale normalisé à 1 au centre) permettant de traduire l'accélération ressentie par la personne à sa position.



Figure 182 : Test 3bis de ressenti à 40 personnes statiques

Pour chaque test, un questionnaire a été donné aux participants pour obtenir l'intensité de la vibration ressentie sur une échelle de 1 à 8 (8 étant le maximum et 1 le minimum). Ce dernier permettait également de qualifier le niveau de confort. Aucune indication sur le niveau de vibration réellement produit n'était donnée aux participants.



Questions :	Oui	Non	Commentaires :	
Je perçois la vibration mais tout va bien		<input checked="" type="checkbox"/>		Surtout désagréable temps prolongé
Cela me perturbe un peu mais c'est supportable		<input checked="" type="checkbox"/>		
Cela me gêne beaucoup	<input checked="" type="checkbox"/>			
J'ai envie de quitter la dalle	<input checked="" type="checkbox"/>			

Figure 183 : Questionnaire type de ressenti rempli à chaque test par un individu

On a ensuite traduit le confort de 1 (Je perçois la vibration mais tout va bien) à 4 (j'ai envie de quitter la dalle) dans le Tableau 113.

Niveaux de confort	
1	Je perçois la vibration mais tout va bien
2	Cela me perturbe un peu mais c'est supportable
3	Cela me gêne beaucoup
4	J'ai envie de quitter la dalle

Tableau 113 : Niveaux de confort

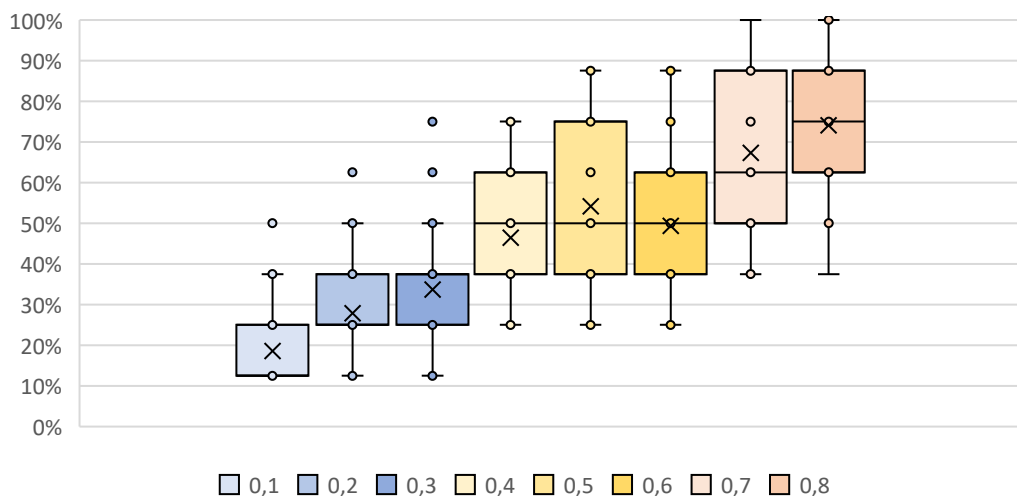
Le Tableau 114 résume la perception globale du groupe pour les différents tests dont on précise l'ordre. On y donne :

- $a_{pic,centre}$: l'accélération pic au centre (Valeur RMS $\times \sqrt{2}$)
- $a_{pic,moy}$: l'accélération moyenne ressentie par les participants selon leur position
- L'intensité de vibration moyenne ressentie sur l'échelle de 1 à 8 ramenée en % (8 = 100%)
- L'indice de confort moyen s'échelonnant de 1 à 4

Heure	Ordre	$a_{pic,centre}$ [m/s ²]	$a_{pic,moy}$ [m/s ²]	Intensité	Confort	Ressenti du groupe
12H04	8	0,86	0,8	74%	2,7	Perturbant mais supportable
11H58	6	0,77	0,7	67%	2,6	
11H45	1	0,65	0,6	49%	2,0	
11H52	4	0,53	0,5	54%	2,1	
12H01	7	0,43	0,4	46%	1,9	Perception de la vibration mais tout va bien
11H47	2	0,32	0,3	34%	1,4	
11H56	5	0,23	0,2	28%	1,3	
11H49	3	0,13	0,1	19%	1,1	

Tableau 114 : Synthèse des résultats des essais de ressenti statique à 40 individus

Sur la Figure 184, il est observé que les individus arrivent très bien à identifier l'intensité relative entre les tests malgré le caractère aléatoire des niveaux d'accélération testés. Seul le premier test à 0,6m/s² laisse dénoter une première prise de repère par les participants. Le diagramme de boîte à moustache représente bien la tendance à une identification assez juste en moyenne (croix) du niveau de vibration.

Figure 184 : Boîtes à moustache de l'intensité ressentie en fonction de $a_{pic,moy}$ [m/s²]

Sur la Figure 185, la moyenne (croix) des confort est finement corrélée à l'augmentation du niveau objectif de vibration ; mis à part le premier point d'acquisition donnant un premier repère à $0,6 \text{ m/s}^2$ et conduisant à une légère sous-estimation de l'inconfort par rapport à la tendance globale issue de l'essai. On voit clairement que la vibration devient perturbante pour plus des $\frac{3}{4}$ des participants pour une accélération pic de plus de $0,5 \text{ m/s}^2$. Cela rejoint les conclusions de l'état de l'art du Tableau 15. On constate néanmoins que certains individus commencent à manifester leur envie de quitter la dalle à partir de $0,4 \text{ m/s}^2$.

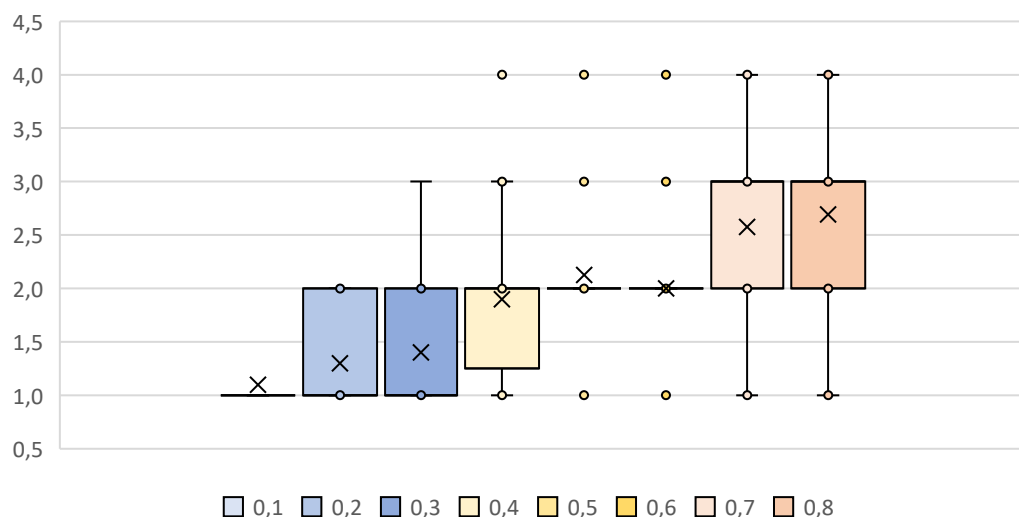


Figure 185 : Distribution de l'indice de confort en fonction de $a_{pic,moy}$ [m/s^2]

6.1.2.1.2 Second test de groupe statique de 18 personnes (Test 5)

Le test précédent à 40 personnes statiques ayant été réalisé pour des accélérations assez faibles, il a été décidé d'en réaliser un second par pas de $0,2 \text{ m/s}^2$ afin de doubler le niveau d'accélération maximal.

Le protocole est identique au test précédent, les participants étant regroupés au centre de l'ouvrage (Figure 186). Le nombre de participants est réduit mais ces tests se déroulent la même journée avec les mêmes personnes que pour le test à 40 individus. Seules deux personnes supplémentaires n'ayant pas participé à l'essai précédent sont présentes pour cet essai.



Figure 186 : Test 5 de ressenti à 18 personnes statiques

Heure	Ordre	$a_{pic,centre}$ [m/s ²]	$a_{pic,moy}$ [m/s ²]	Intensité	Confort	Ressenti du groupe
14H39	8	1,56	1,5	84%	3,1	Cela me gêne beaucoup
14h28	2	1,37	1,3	62%	2,3	Perturbant mais c'est supportable
14H37	7	1,18	1,2	69%	2,8	
14H32	4	0,99	1,0	49%	2,0	
14H26	1	0,8	0,8	45%	1,7	Perception de la vibration mais tout va bien
14h35	6	0,6	0,6	44%	1,9	
14H33	5	0,4	0,4	35%	1,6	
14h30	3	0,23	0,2	21%	1,4	

Tableau 115 : Synthèse des résultats des essais de ressenti statique à 18 individus

Sur le Tableau 115, une bonne corrélation entre les intensités ressenties et l'augmentation objective du niveau d'accélération est observée. En revanche les participants sont plus tolérants. Les vibrations deviennent perturbantes à partir de 1 m/s² et deviennent vraiment gênantes à partir de 1,5 m/s². Des personnes ne commencent à ressentir le besoin de quitter la dalle qu'à partir de 0,8 m/s².

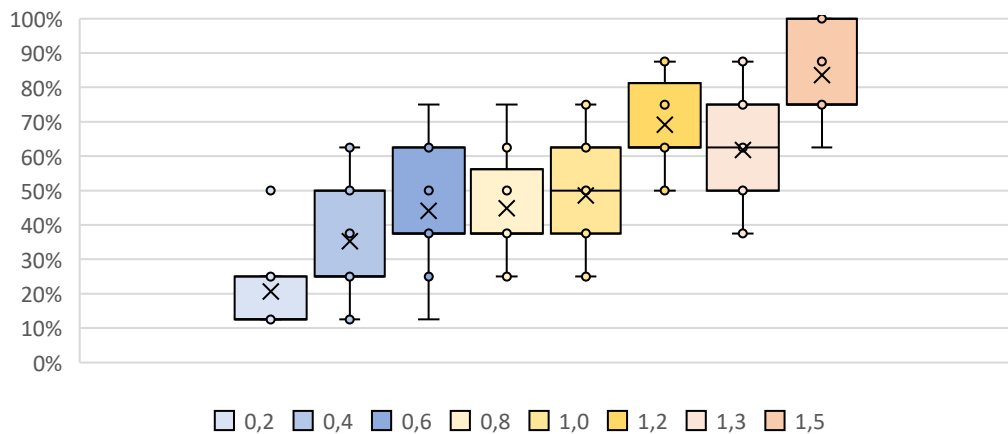


Figure 187 : Distribution de l'intensité ressentie en fonction de $a_{pic,moy}$ [m/s²]

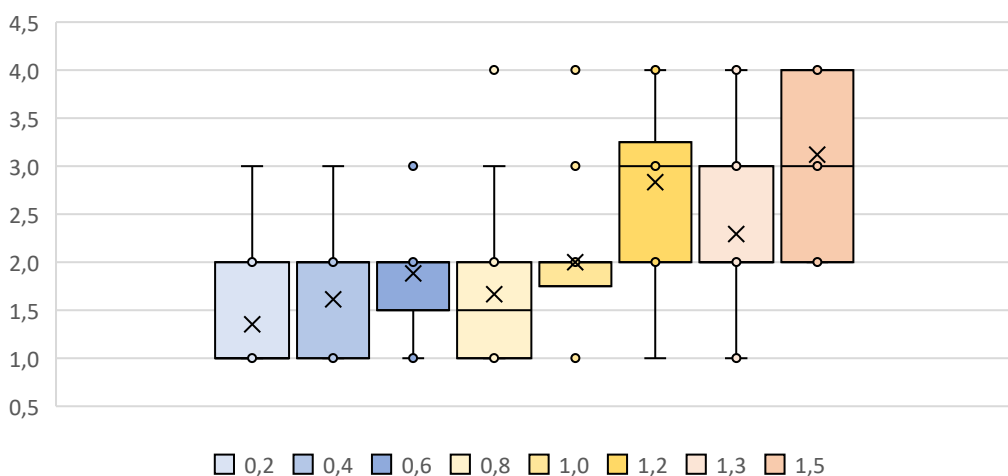


Figure 188 : Distribution de l'indice de confort en fonction de $a_{pic,moy}$ [m/s²]

6.1.2.1.3 Comparaison et observations

D'après les tests 3bis et 5 précédents, on peut postuler un effet d'accoutumance à la vibration. En outre, ces participants n'avaient très probablement jamais été confrontés à ce phénomène de manière consciente auparavant. La première série de tests 3bis du matin les a peut-être surpris même si l'accélération n'allait pas aussi haut en intensité que la seconde série de tests 5. Etant donné que les groupes n'étaient pas identiques, on ne retient que les données des 16 participants ayant participé aux deux tests à 40 personnes (boîte à moustache encadrée noir) et à 18 personnes (boîte à moustache encadrée rouge). On compare les intensités (Figure 189) et le confort (Figure 190) pour la plage commune d'accéléérations testées entre $0,2 \text{ m/s}^2$ et $0,8 \text{ m/s}^2$.

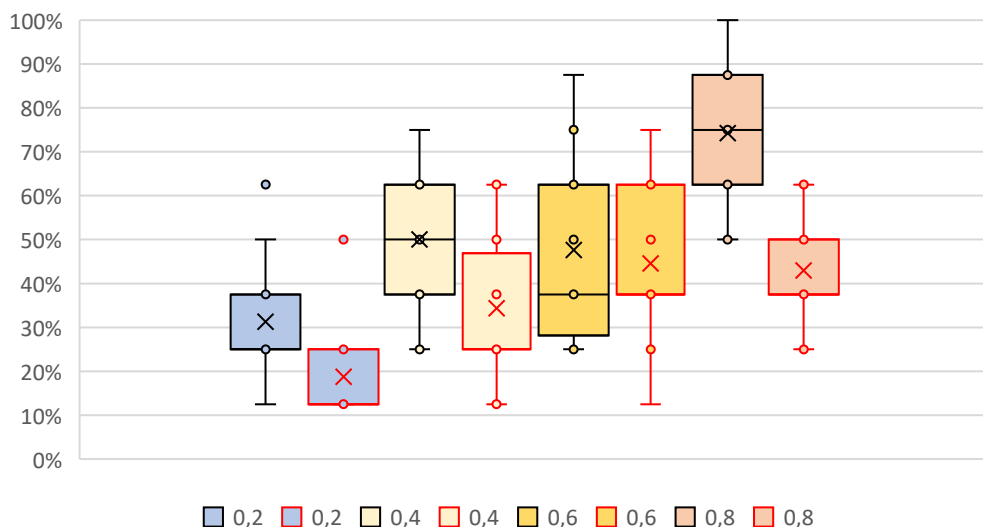


Figure 189 : Comparaison de l'intensité ressentie en fonction de $a_{pic,moy} [m/s^2]$

On observe que les moyennes de confort pour le deuxième test à 18 personnes sont systématiquement inférieures aux moyennes du premier test à 40 individus. On peut donc envisager une accoutumance mais aussi une forme de relativisme lié à la découverte d'un niveau d'accélération proche de $1,3 \text{ m/s}^2$ dès la deuxième valeur testée pendant l'essai à 18 personnes.

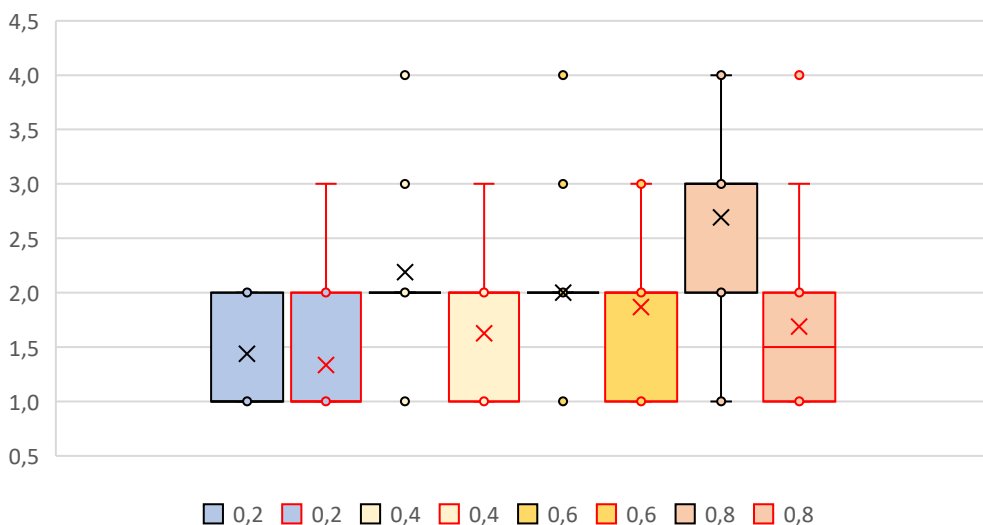


Figure 190 : Comparaison de l'indice de confort en fonction de $a_{pic,moy} [m/s^2]$

6.1.2.2 Impressions des participants actifs lors des essais de foule

Jusqu'à présent, les ressentis de personnes statiques sans musique ont été évoqués. Il est important d'étudier comparativement les ressentis de personnes en activité avec métronome et en musique. On gardera en mémoire que les tests sont faits ici pour une foule répartie sur toute la surface de l'ouvrage. Par conséquent l'accélération ressentie dépend de la position de l'individu sur l'ouvrage.

En adoptant une forme modale sinusoïdale le long de l'ouvrage $\Psi(x)$ (Tableau 116), on peut estimer l'accélération le long de l'ouvrage $a(x, t)$ à partir de l'accélération mesurée au centre $a_{pic}(t)$:

$$a(x, t) = \Psi(x) a_{pic}(t) \quad (119)$$

Dallettes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
x [m]	0,5	2,0	3,5	5,0	6,6	8,1	9,6	11,2	12,7	14,2	15,7	17,3
$\Psi(x)$	0,1	0,3	0,6	0,8	0,9	1,0	1,0	0,9	0,8	0,6	0,3	0,1

Tableau 116 : Coefficient de forme modale normalisé au centre de chaque dalle

6.1.2.2.1 Essais coordonnés au métronome

Pour chaque essai du Tableau 117, l'accélération pic ainsi que des indications sur le confort ressenti en moyenne par les participants sont données : l'échelle d'intensité de la vibration de 1 à 8 ramenée en pourcentage du niveau maximum et le niveau de confort en pourcentage de participants.

Indices objectifs de vibration	Balancement avec amortisseurs						Saut avec amortisseurs			
	16 mars	16 mars	16 mars	16 mars	16 mars	16 mars	13 avr	13 avr	13 avr	13 avr
Date de l'essai	16 mars	16 mars	16 mars	16 mars	16 mars	16 mars	13 avr	13 avr	13 avr	13 avr
Numéro d'essai	A1	A2	A3	A4	A5	A6	E1	E2	E3	E4
Fréquence de la musique [Hz]	1,2 à 1,5	1,6 à 1,8	1,9 à 2,1	2,2 à 2,4	2,5 à 2,8	2,9 à 3,5	1,7 à 2,0	2,1 à 2,4	2,5 à 2,8	2,9 à 3,5
Déplacement pic à pic mesuré [mm] (Catman)	1,2	0,8	0,8	1,3	1,3	1,1	2,8	4,8	5,3	3,9
Accélération pic au centre [m/s ²] (Catman)	0,28	0,25	0,26	0,48	0,43	0,37	0,87	1,49	2,07	1,55
Facteur d'impact kp maximal moyen (10 leaders)	1,78	1,62	1,63	1,73	2	1,97	3,7	4,02	3,95	4,02

Indice de confort	A1	A2	A3	A4	A5	A6	E1	E2	E3	E4
Nombre de participants	102	102	102	102	102	102	97	96	96	96
Intensité de la vibration	15%	18%	16%	16%	17%	22%	35%	34%	32%	34%
Rien à signaler	100%	99%	97%	87%	87%	75%	72%	70%	59%	57%
J'ai perçu la vibration mais tout va bien	0%	1%	3%	13%	13%	25%	28%	30%	40%	41%
Cela m'a perturbé un peu mais c'était supportable	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	2%
Cela m'a beaucoup gêné	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
J'ai eu envie de quitter la dalle	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tableau 117 : Ressenti des participants aux tests de balancements et de sauts au métronome

Contrairement aux tests statiques, la tolérance des participants est assez importante en balancement. Une explication est qu'environ 30% des participants au voisinage des rives vont ressentir l'accélération au centre divisée au moins par 2. Mais bien qu'en contact avec le support en permanence et pour des

accélération pics proches de 0,5 m/s², aucun participant n'est perturbé. Moins de 25% des participants détectent la vibration.

Pour les essais de saut, les participants sont encore moins gênés par la vibration comme en témoigne les écarts d'accélération à ressenti identique entre les essais A6 et E1. En E3, pour des accélérations atteignant 2 m/s², 40% des participants détectent la vibration et moins de 2% sont perturbés. Les individus estiment l'intensité de la vibration à un niveau relatif de l'ordre de 35%.

Les seuils de confort sont donc bien plus élevés pour des personnes avec une activité physique que pour des personnes statiques. Cette sensibilité à la vibration diminue d'autant plus au saut occasionnant une perte de contact permanent avec le support.

Indices objectifs de vibration	Coordination au saut avec amortisseurs					Coordination au saut sans amortisseurs				
	13 avr	13 avr	13 avr	13 avr	13 avr	13 avr	13 avr	13 avr	13 avr	13 avr
Numéro d'essai	G1	G2	G3	G4	G5	H1	H2	H3	H4	H5
Fréquences de sollicitation guides [Hz]	1,8 à 2,8	1,8 à 2,8	1,8 à 2,8	1,8 à 2,8	1,8 à 2,8	1,8 à 2,8	1,8 à 2,8	1,8 à 2,8	1,8 à 2,8	1,8 à 2,8
Déplacement pic à pic mesuré [mm] (Catman)	1,6	2,6	3,0	4,4	5,1	4,9	6,4	6,4	9,8	9,9
Accélération pic au centre [m/s ²] (Catman)	0,74	1,22	1,21	1,75	1,99	2,37	3	2,95	4,24	4,07
Facteur d'impact kp maximal moyen (10 leaders)	4,01	4,19	3,94	4,08	4,54	4,03	4,05	4,5	4,8	4,93

Indice de confort	G1	G2	G3	G4	G5	H1	H2	H3	H4	H5
Nombre de sujets	12	32	55	75	97	12	32	53	73	95
Dalletes	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Intensité de la vibration	28%	30%	31%	32%	32%	33%	34%	41%	44%	51%
Rien à signaler	92%	81%	100%	75%	64%	33%	6%	19%	11%	8%
J'ai perçu la vibration mais tout va bien	8%	19%	0%	24%	35%	33%	47%	34%	41%	48%
Cela m'a perturbé un peu mais c'était supportable	0%	0%	0%	0%	1%	33%	38%	47%	47%	43%
Cela m'a beaucoup gêné	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%
J'ai eu envie de quitter la dalle	0%	0%	0%	1%	0%	0%	9%	0%	0%	0%

Tableau 118 : Ressenti des participants aux test de sauts G et H au métronome

La série de tests à nombre de participants croissants G (Tableau 118) confirment la tendance de la série E. La série H sans amortisseurs permet d'examiner le confort pour des accélérations allant jusqu'à plus de 4 m/s². On pourrait s'attendre d'après l'état de l'art (Tableau 15) à une envie de quitter la dalle pour le test H4 ou H5. En réalité un peu moins de la moitié des participants est juste perturbée par la vibration. On peut donc dire que l'hypothèse qui consisterait à dire que les personnes s'arrêteraient d'exciter l'ouvrage pour une accélération dépassant 3 m/s² ne peut pas être validée.

Il est également à préciser que la perception de la vibration au saut est variable selon le niveau d'activité au sein du test lui-même. Les participants sont parfois plus surpris par le niveau de vibration en fin d'action collective, au moment où l'ouvrage se calme. Sans amortisseurs, l'amortissement est beaucoup plus faible, la vibration beaucoup plus forte mais aussi plus lente en décroissance à la fin de l'excitation. On revient à ce moment dans un régime de perception statique à la différence près que celui qui perçoit la vibration en est la cause. Ce qui est surprenant, c'est la différence de perception quasi-instantanée qui s'opère au moment de l'arrêt de l'activité. On observe un effet de surprise très important, un effet « waouh » (Figure 191), au moment où la consigne de s'immobiliser est donnée.



Figure 191 : Pendant et après le saut à 16 personnes sans amortisseurs (CAR SA) $a_{pic} = 3,4m/s^2$

6.1.2.2.2 Essais libres en musique

On analyse également le ressenti pour les tests en musique au Tableau 119. Lorsqu'un test comporte une série de titres, on donne le nom du titre sur les trois morceaux ayant occasionné la plus grande accélération. En plus de l'indice de confort, on donne un indice de la motricité qui renseigne sur la motivation des individus et la perception qu'ils ont de leur propre activité.

Pour des accélérations proches de $2 m/s^2$ comme pour les tests F2B et F2C, environ 70% des participants déclarent avoir perçu la vibration alors que ce taux était de 40% pour le test E3 de saut coordonné contrôlé par métronome conduisant à la même accélération (Tableau 117).

Cela renforce le constat que l'activité influe beaucoup sur le niveau de ressenti. C'est-à-dire que dans le cas d'une sollicitation musicale avec un comportement libre, on observe des phases successives où les gens varient la nature et l'intensité de leur activité en fonction de la musique. Dans les refrains, on a des phases de saut qui suivent les basses et dans les transitions des balancements. Parfois, il existe des moments d'excitation modérée avec une décroissance progressive de l'accélération pouvant conduire à une perception de la vibration dont on est la cause. D'autre part certains individus peuvent s'arrêter avant d'autres ou se reposer en restant en contact avec l'ouvrage. Cela peut aussi expliquer cette augmentation moyenne de la sensibilité à la vibration entre les séries E et F.

Dans un concert libre, on peut en déduire qu'une accélération pic au centre de l'ouvrage inférieure à $2 m/s^2$ ne pose pas de problèmes pour une population jeune.

D'autre part, pour des accélérations atteignant $2 m/s^2$ (test F2C), 11% maximum des participants peuvent se dire perturbés (cf. indice de confort Tableau 119) tandis que 9% des personnes, mais pas forcément les mêmes, vont alors commencer à dire qu'ils ont été gênés par la vibration pour se mouvoir (cf. indice de motricité Tableau 119). Moins de 1% des participants a exprimé une modification de son action en raison de la vibration pour une accélération inférieure à $1,32 m/s^2$ (test F1C) et une très faible proportion se dit perturbé (3% au pire pour le test F3A et 0% pour les autres tests). On peut donc supposer qu'il n'y a pas d'interaction structure/foule pour des accélérations strictement inférieures à $1,4 m/s^2$ à condition que les individus soient impliqués dans l'action.

Pour aller plus loin, il faudrait faire des essais en situation réelle (salle de concert ou discothèque) pour des accélérations dépassant $2 m/s^2$, par exemple jusqu'à minimum $4 m/s^2$ pour voir si la foule limite son action naturellement et/ou perd nettement en synchronisation.

Indices objectifs de vibration	Policeman	Jump around	Black Betty	Gimme!	Gala	Cascada	Miss You	Pump it	Partenaire particulier	Phonky tribu	Danza Dell' autunno rosa
Date de l'essai	20 avr	16 mars	20 avr	20 avr	16 mars	16 mars	16 mars	16 mars	20 avr	20 avr	20 avr
Numéro d'essai	F1A	F1A	F1B	F1C	F2B	F2C	F3A	F3B	F3C	F4A	F4B
Fréquence de la musique [Hz]	1,75	1,78	1,95	1,98	2,15	2,38	2,42	2,55	2,6	2,67	2,85
Déplacement pic à pic mesuré [mm] (Catman)	1,0	3,2	1,0	4,6	6,4	5,2	3,7	1,8	3,2	3,6	2,1
Accélération pic au centre [m/s ²] (Catman)	0,31	0,72	0,40	1,32	1,9	1,98	1,25	0,69	1,11	1,25	0,81
Facteur d'impact kp maximal moyen (10 leaders)	3,0	3,7	2,2	3,8	4,7	4,1	4,08	3,26	3,67	3,80	2,59

Indice de confort	F1A	F1A	F1B	F1C	F2B	F2C	F3A	F3B	F3C	F4A	F4B
Nombre de sujets	108	102	108	108	102	102	102	102	108	108	108
Intensité de la vibration	17%	26%	16%	16%	31%	30%	20%	20%	19%	20%	22%
Rien à signaler	99%	45%	100%	28%	27%	25%	63%	70%	49%	31%	33%
J'ai perçu la vibration mais tout va bien	1%	55%	0%	72%	72%	64%	34%	30%	51%	69%	64%
Cela m'a perturbé un peu mais c'était supportable	0%	0%	0%	0%	1%	11%	3%	0%	0%	0%	3%
Cela m'a beaucoup gêné	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
J'ai eu envie de quitter la dalle	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Indice de motricité	F1A	F1A	F1B	F1C	F2B	F2C	F3A	F3B	F3C	F4A	F4B
Je connais la musique diffusée	83%	90%	99%	100%	100%	98%	92%	99%	89%	67%	73%
J'aime la musique diffusée	52%	38%	84%	100%	96%	75%	83%	67%	89%	34%	41%
Le signal sonore m'a donné envie de bouger	69%	32%	81%	98%	100%	89%	100%	51%	99%	82%	54%
J'ai eu envie de me balancer	78%	63%	81%	99%	85%	82%	60%	77%	96%	85%	43%
Je me suis balancé	86%	92%	95%	100%	85%	91%	75%	93%	100%	94%	87%
J'ai eu envie de sautiller	21%	38%	40%	90%	98%	91%	75%	66%	98%	81%	58%
J'ai sautillé	43%	90%	44%	92%	100%	92%	75%	85%	100%	94%	81%
J'ai eu envie de sauter	10%	45%	19%	70%	92%	85%	99%	24%	84%	54%	37%
J'ai sauté	33%	94%	16%	85%	94%	92%	100%	43%	93%	81%	58%
J'ai bougé naturellement sans avoir à me concentrer	90%	54%	89%	92%	98%	92%	99%	76%	98%	100%	80%
Je suis bien arrivé à suivre le tempo de la source sonore	88%	86%	92%	92%	97%	97%	97%	69%	98%	94%	80%
J'ai été gêné par la vibration du support dans mon mouvement	0%	1%	0%	1%	8%	9%	0%	0%	0%	0%	0%
J'ai le sentiment d'avoir été coordonné avec l'action du groupe	40%	79%	69%	79%	93%	68%	62%	75%	96%	81%	70%
Je suis fatigué à la fin du test	1%	28%	2%	6%	37%	55%	11%	11%	9%	1%	16%

Tableau 119 : Synthèse des ressentis pour les essais de foule en musique

6.1.2.3 Conclusions sur l'interaction de la structure sur la foule

Hors cas individuels particuliers, on peut regrouper les observations synthétiques suivantes :

Ressenti pour des personnes statiques :

- Quand les individus sont statiques, on retrouve le seuil de fin de confort de $0,5 \text{ m/s}^2$ et le seuil de début d'inconfort de $1,5 \text{ m/s}^2$ relevé en moyenne dans l'état de l'art du Tableau 15.
- Un effet d'accoutumance à la vibration est observé entre deux séries de tests de ressentis de vibrations avec les mêmes individus statiques : le seuil de fin de confort monte alors à 1 m/s^2 .

Seuil de confort pour des individus actifs en concert :

- On peut considérer un seuil de fin de confort en concert à $1,4 \text{ m/s}^2$ pic.

Seuil d'influence sur la motricité :

- On peut considérer une absence d'influence de la vibration sur l'action des personnes pour une accélération strictement inférieure à $1,4 \text{ m/s}^2$ pic.

Seuil de panique ou de fuite :

- L'hypothèse d'un seuil d'inconfort pouvant conduire à des départs vers 3 à 4 m/s^2 pic est à vérifier avec des expérimentations plus ciblées. Dans cette hypothèse, l'effet positif peut être une atténuation de l'accélération du support mais l'effet négatif peut être un mouvement de panique.

Observations générales du ressenti suivant la nature de l'activité :

- Les individus qui se balancent ressentent moins l'accélération qu'en position statique.
- Les individus qui sautent ressentent moins l'accélération qu'au balancement vertical.
- Un groupe de personnes coordonnées au saut sera moins sensible à la vibration qu'un groupe en excitation libre. Cela signifie que l'on peut imaginer qu'une foule particulièrement excitée puisse repousser son seuil d'inconfort pour deux raisons : sa motivation initiale à exciter l'ouvrage et son excitation majoritaire de type saut qui réduit sa sensibilité. Cet aspect très précis mériterait une étude plus détaillée en s'appuyant sur plusieurs populations différentes afin d'établir un seuil d'inconfort conduisant à un arrêt de l'action suffisamment fiable. En effet si le seuil d'accélération pour lequel la foule est susceptible de modifier son action est repoussé, alors on pourrait avoir une excitation maintenue pour de très hauts niveaux d'accélération ($> 4 \text{ m/s}^2$). Si le seuil d'inconfort est atteint, alors la foule commence à s'arrêter de sauter, l'action globale diminue et l'amortissement peut augmenter notablement. Ce seuil pourrait donc être assez critique dans une logique de vérification de la sécurité du dimensionnement pour des ouvrages peu amortis.
- Le ressenti est différent lorsque les gens sont libres de leur action et qu'ils ne sont pas guidés dans un cadre expérimental plus cadré (métronome et consigne d'action). Cela renforce l'idée que les mesures doivent à présent être confrontées à des contextes réels (moment, lieu, lumière, son, motivation) pour fiabiliser les ressentis et l'impact sur la motricité.

6.1.3 Coordination au saut en fonction du nombre de participants

6.1.3.1 Principe de détermination des coefficients de coordination

L'expérimentation consiste à étudier une foule active au saut uniformément répartie. On se base donc sur les équations du paragraphe 2.2.2.1.3 et l'équation (52) donnant l'expression de la coordonnée généralisée en régime permanent (déplacement négatif vers le bas) :

$$z(t) = - \iint \frac{g(x,y)\psi(x,y)}{k^*} dx dy \left(1 + \sum_{h=1}^H C_h(N) \alpha_h A_h^* \sin(h2\pi f_p t + \varphi_h + \theta_h^*) \right) \quad (120)$$

Sur la base de l'hypothèse d'un poids uniformément répartie en moyenne, on définit la constante Z :

$$Z = \frac{N}{S} G_{moy} \frac{\iint \psi(x,y) dx dy}{k^*} \quad (121)$$

En se plaçant au centre de la structure, soit $\psi = 1$, on en déduit l'accélération :

$$\ddot{u}(t) = \sum_{h=1}^H Z C_h(N) \alpha_h A_h^* (2\pi h f_p)^2 \sin(2\pi h f_p t + \varphi_h + \theta_h^*) \quad (122)$$

On procède ensuite à une analyse par FFT avec Matlab d'un motif périodisé (Figure 194) correspondant à l'accélération maximale observée d'un test de la série H ou G considéré à une fréquence donnée. On recherche les premiers coefficients de Fourier de l'accélération mesurée sous la forme :

$$\ddot{u}(t) = \sum_{h=1}^H \alpha_{h,FFT} \sin(2\pi h f_p t + \varphi_{h,FFT}) \quad (123)$$

Pour ne voir que le mode 1, on trace en rouge sur la Figure 192 la moyenne entre l'accélération nord et sud à mi-portée. On trace ensuite la périodisation du signal sur la base du motif maximum (Figure 193).

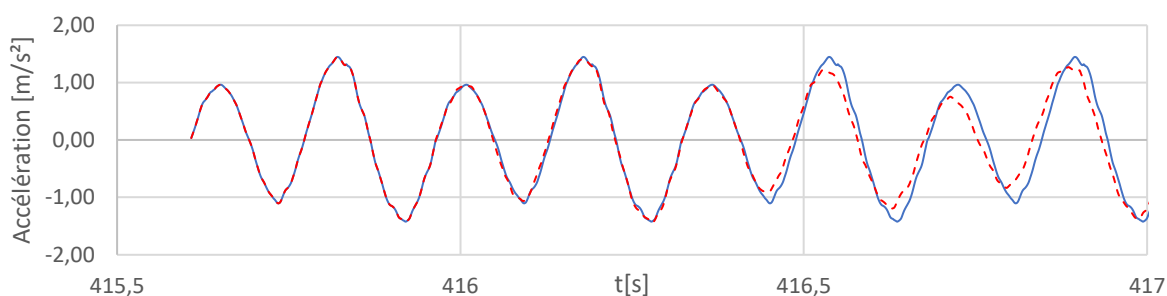


Figure 192 : Test G5 2,8 Hz : Accélération réelle (rouge) et périodisation du motif maximum (bleu)

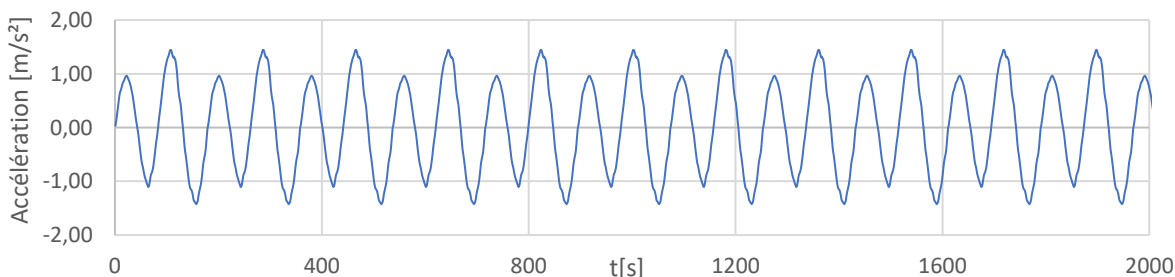


Figure 193 : Test G5 2,8 Hz : Signal d'accélération maximale périodisée

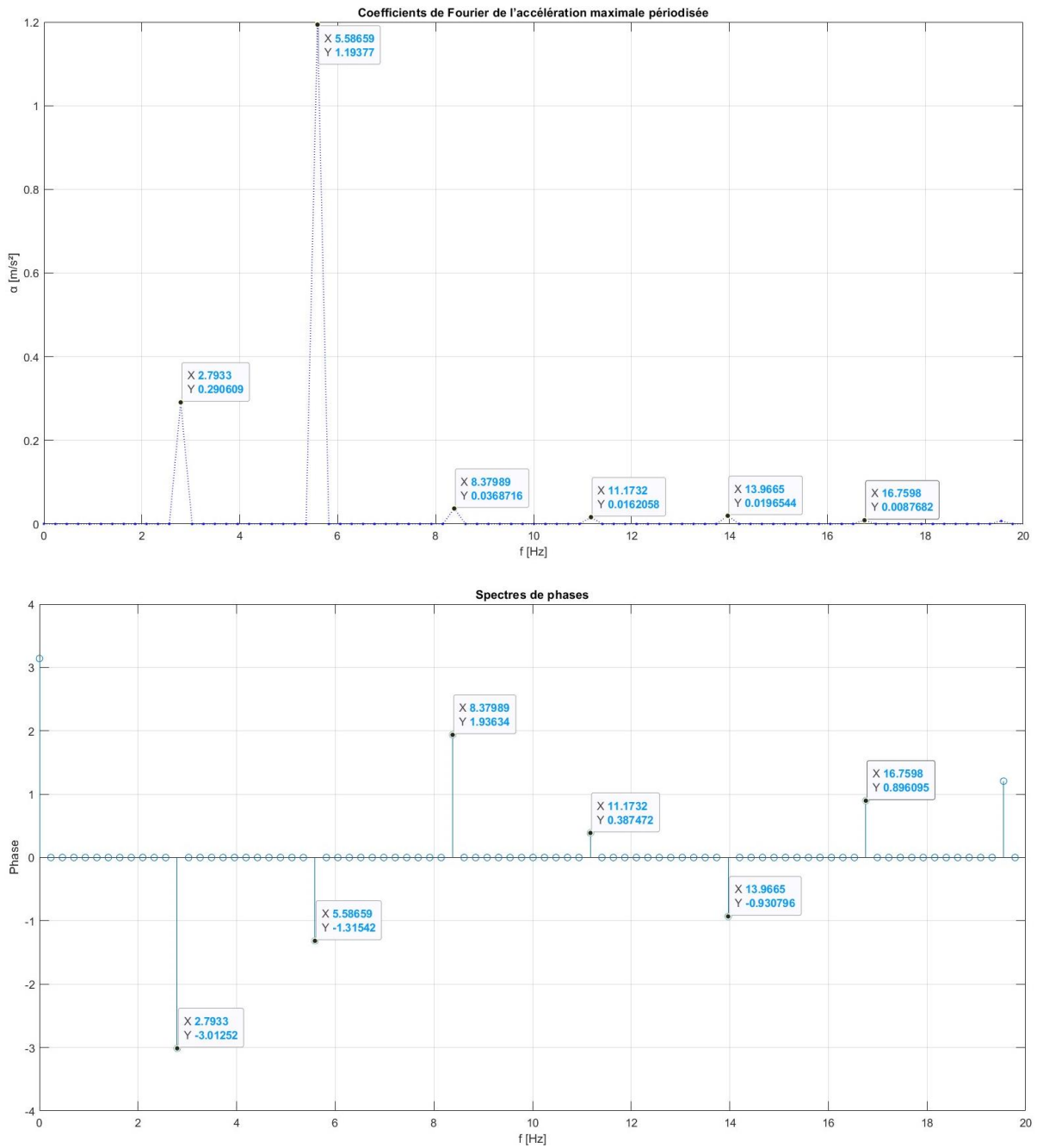


Figure 194 : Test G5 2,8 Hz : Coefficients de Fourier et phases du signal périodisé (Matlab)

En se limitant à 6 harmoniques, on reconstitue bien le signal périodisé (Figure 195).

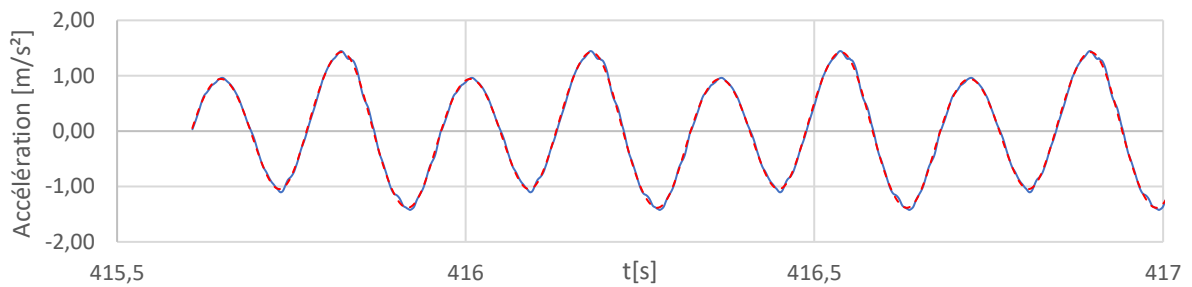


Figure 195 : Test G5 2,8 Hz : Comparaison du signal reconstitué (rouge) avec l'original (bleu)

On procède ensuite par identification pour déterminer le coefficient de coordination et les phases :

$$C_h(N) = \frac{\alpha_{h,FFT}}{Z \alpha_h A_h^* (2\pi h f_p)^2} \quad (124)$$

$$\varphi_h = \varphi_{h,FFT} - \theta_h^* \quad (125)$$

La fréquence propre f_p , $\alpha_{h,FFT}$ et $\varphi_{h,FFT}$ se déterminent par FFT à partir du motif d'accélération maximale périodisé.

La détermination du coefficient d'amplification dynamique A_h^* et du déphasage θ_h^* se base sur la mesure de la fréquence propre fondamentale à vide et de l'amortissement avec et sans amortisseurs obtenus lors de la campagne d'identification modale avec excitateur à vide de public.

Les coefficients de Fourier α_h individuels sont calculés sur la base de la moyenne des coefficients d'impact maximaux des 10 leaders $k_{p,max,moy,10}$. Cela permet de calculer un ratio de contact individuel moyen et donc d'en déduire l'ordre de grandeur des coefficients de Fourier individuels.

La déformation Z est calculée sur la base de l'approximation ci-dessous pour laquelle la raideur statique linéique k_{lin} est le rapport entre la résultante d'une charge surfacique uniformément répartie q sur la surface du platelage et la déformée correspondante au centre de l'ouvrage δ_q :

$$\frac{k^* S}{\iint \psi(x, y) dx dy} \approx k_{lin} = \frac{q S}{\delta_q} \quad (126)$$

En remontant aux 6 premiers coefficients de Fourier de groupe $C_h(N)$ α_h et aux phases associés φ_h , on peut reconstituer l'impact $k_{p,moy,global}$ (pointillés noirs courts) au droit du prélèvement du motif d'accélération maximal (pointillés noirs longs) sur la Figure 196. On peut comparer l'allure de l'impact $k_{p,moy,global}$ à celle du facteur d'impact $k_{p,moy,10}$ représentant l'action des 10 leaders uniquement.

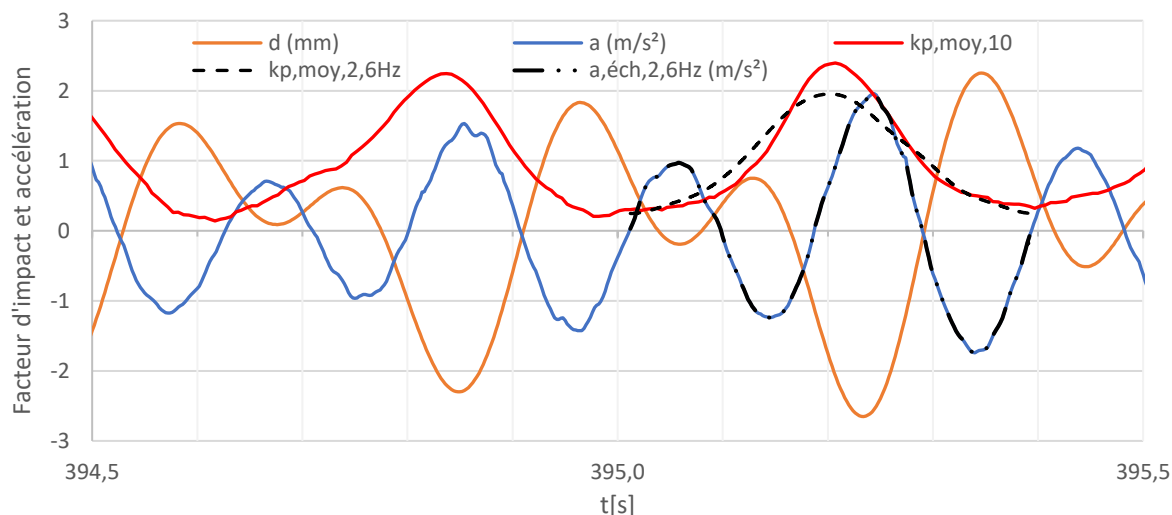
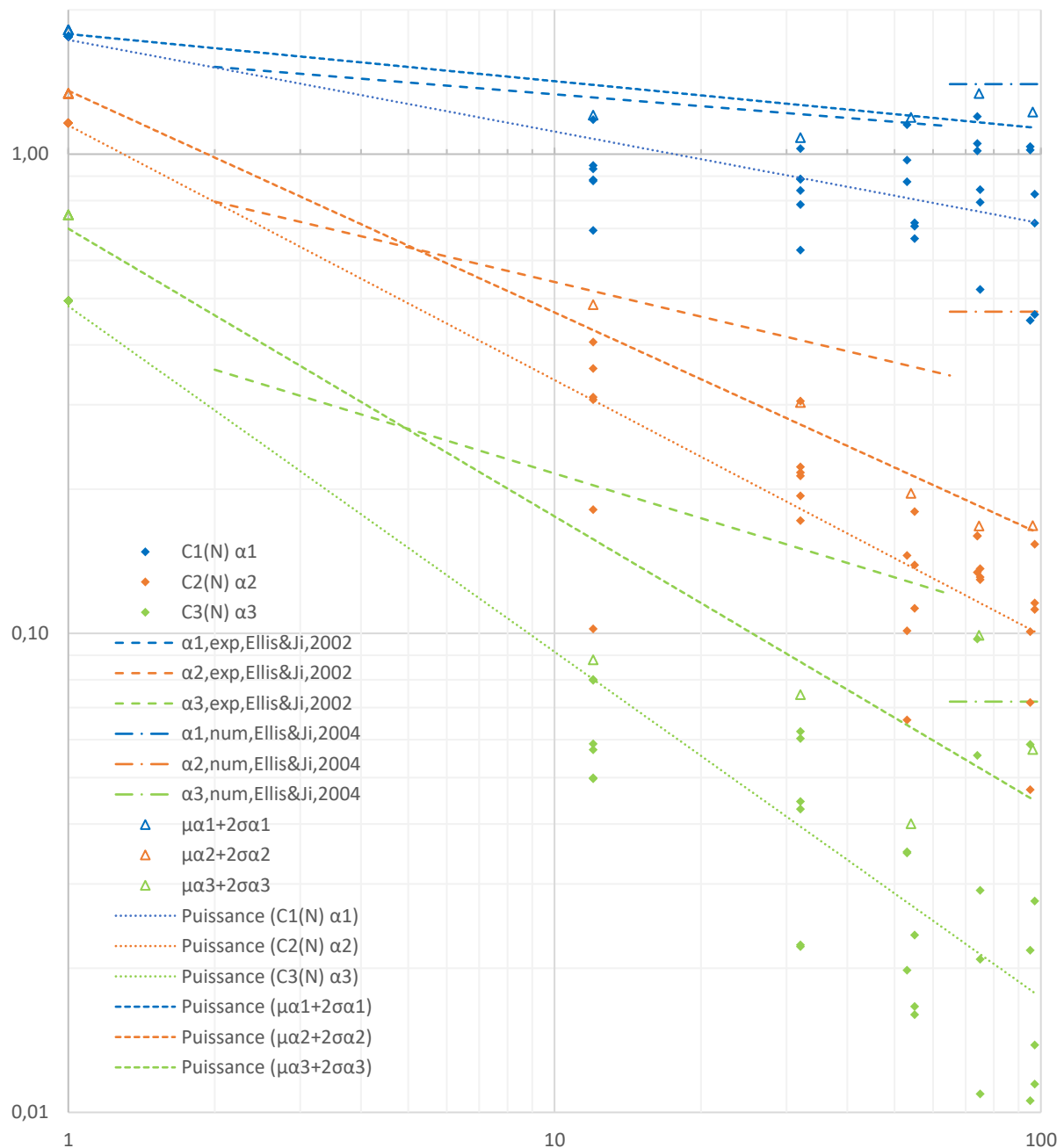


Figure 196 : Test G5 2,6 Hz : Facteurs d'impact $k_{p,moy,10}$, $k_{p,moy,global}$ et accélération [m/s²]

Sur l'exemple de la Figure 196, le facteur d'impact $k_{p,moy,global}$ de l'individu moyen pour le groupe complet est bien inférieur au facteur d'impact moyen du groupe des 10 leaders $k_{p,moy,10}$. Le pic est plus large témoignant d'un défaut de coordination globale. On donne l'allure du déplacement d autour de la position d'équilibre statique à titre indicatif. On constate ici que l'impact accompagne le mouvement de descente de l'ouvrage. Les personnes redécollent quand l'ouvrage est au point haut.

6.1.3.2 Tableau de synthèse des essais de coordination au saut

Sur la Figure 197, on trace pour chaque série de tests H1 à H5 et G1 à G5 les coefficients de Fourier de groupe correspondant au saut pour les fréquences de 2,4 Hz, 2,6 Hz et 2,8 Hz. On choisit cette plage de fréquences car il s'agit de celle occasionnant les problématiques de résonance les plus notables dans notre cas et de manière générale puisque l'on visera toujours en pratique d'avoir des structures de fréquence propre fondamentale de minimum 5 Hz conformément aux Eurocodes fixant cette exigence minimale. Cela permet de constituer 6 points de mesure par nombre N d'individus donnés. On mesure que la moyenne du ratio de contact pour l'impact maximal des 10 leaders sur l'ensemble des tests est de 0,37. Le ratio de contact minimal moyen de 10 leaders pour un seul test est de 0,32 (soit l'impact maximal).

Figure 197 : Coefficients de Fourier de groupe $C_h(N)\alpha_h$

Sur la Figure 197, on trace la courbe en tendance en puissance. Pour un individu, les coefficients de Fourier ont une pondération de 30 pour fixer le départ de la courbe en tendance moyenne. Les équations pour les trois premières harmoniques sont :

$$\begin{aligned} C_{1,moy}(N)\alpha_{1,moy} &= 1,73 N^{-0,19} \quad (R^2 = 0,90) \\ C_{2,moy}(N)\alpha_{2,moy} &= 1,15 N^{-0,53} \quad (R^2 = 0,99) \\ C_{3,moy}(N)\alpha_{3,moy} &= 0,48 N^{-0,72} \quad (R^2 = 0,99) \end{aligned} \quad (127)$$

On trace également la valeur moyenne des 6 mesures plus deux-écarts types pour estimer l'enveloppe des résultats d'essais par excès. Pour un individu, les coefficients de Fourier ont une pondération de 5 pour fixer le départ de la courbe en tendance. On obtient les équations enveloppes suivantes :

$$\begin{aligned} C_{1,max}(N)\alpha_{1,95\%} &= 1,78 N^{-0,10} \quad (R^2 = 0,88) \\ C_{2,max}(N)\alpha_{2,95\%} &= 1,36 N^{-0,46} \quad (R^2 = 0,99) \\ C_{3,max}(N)\alpha_{3,95\%} &= 0,70 N^{-0,60} \quad (R^2 = 0,99) \end{aligned} \quad (128)$$

On observe que la courbe enveloppe de la première harmonique correspond bien à la tendance expérimentale de Ellis et Ji [75] rappelés dans le Tableau 7. En revanche, nos courbes expérimentales enveloppes pour les 2^{ème} et 3^{ème} harmoniques présentent une décroissance plus rapide que les courbes de tendances expérimentales d'Ellis et Ji [75]. On peut considérer que les courbes expérimentales de Ellis and Ji ont une tendance plus enveloppe que moyenne vis-à-vis de l'expérimentation.

Si on se base sur les coefficients de Fourier obtenus numériquement par Ellis et Ji [11], les coefficients de Fourier pour un grand nombre de personnes (triplet : 1,40 / 0,469 / 0,072) apparaissent déjà comme enveloppes des relevés expérimentaux pour 100 personnes. On observe même un facteur supérieur à 2 entre la valeur de la seconde harmonique estimée numériquement pour un grand groupe par Ellis et Ji [11] et la valeur maximale expérimentale.

En résumé, la présente expérimentation donne des résultats qui permettent de compléter l'étude expérimentale de référence [75] limitée à 64 personnes jusqu'à 97 personnes. Elle montre que la coordination expérimentale d'Ellis and Ji pour la seconde et la troisième harmoniques est potentiellement surestimée. En tous cas, la coordination obtenue numériquement à la seconde harmonique pour un grand nombre de personnes ($N > 400$) [11] est probablement nettement surévaluée puisque la coordination n'a a priori pas tendance à s'améliorer avec l'augmentation du nombre de participants toutes conditions égales par ailleurs. Néanmoins, la présente expérimentation n'est valable que pour un groupe d'étudiants donnés sollicités au métronome. D'autres expérimentations ultérieures dans d'autres contextes sont appelées à nuancer ou compléter les présentes observations.

De manière synthétique, on donne dans le Tableau 120 les coefficients de coordination moyens et enveloppes obtenus sur la base des courbes de tendance en puissance identifiées ($C_h(N) = N^{-j}$) :

N	12	32	54	75	97
$C_{1,max}(N)$	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6
$C_{2,max}(N)$	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1
$C_{3,max}(N)$	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
$C_{1,moy}(N)$	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4
$C_{2,moy}(N)$	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1
$C_{3,moy}(N)$	0,2	0,1	0,1	0,04	0,04

Tableau 120 : Coefficients de coordination maximums et moyens de l'expérimentation

Test	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
n°	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5
f _m [Hz]	2,40	2,60	2,80	2,40	2,60	2,80	2,40	2,60	2,80	2,40	2,60	2,80	2,40	2,60	2,80

f _p [Hz]	2,42	2,58	2,69	2,49	2,58	2,73	2,40	2,55	2,70	2,43	2,56	2,75	2,46	2,62	2,79
Nombre N	12	12	12	32	32	32	55	55	55	75	75	75	97	97	97
G _{moy} [N]	632	632	632	616	616	616	611	611	611	604	604	604	601	601	601
k _{p,max,moy,10}	4,01	4,01	4,01	4,19	4,19	4,19	3,94	3,94	3,94	4,08	4,08	4,08	4,54	4,54	4,54

ξ	6,10%	6,10%	6,10%	6,10%	6,10%	6,10%	6,10%	6,10%	6,10%	6,10%	6,10%	6,10%	6,10%	6,10%	6,10%
f*	5,28	5,28	5,28	5,28	5,28	5,28	5,28	5,28	5,28	5,28	5,28	5,28	5,28	5,28	5,28
k _{lin} [N/m]	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7
Z [mm]	0,19	0,19	0,19	0,50	0,50	0,50	0,85	0,85	0,85	1,14	1,14	1,14	1,47	1,47	1,47

a _{max} [m/s ²]	0,38	0,69	0,57	0,79	1,01	0,96	0,83	1,09	1,06	1,07	1,51	1,36	1,53	1,93	1,43
α _{1,FFT}	0,05	0,06	0,07	0,16	0,13	0,13	0,18	0,19	0,23	0,28	0,31	0,24	0,32	0,43	0,29
α _{2,FFT}	0,32	0,64	0,53	0,65	0,91	0,88	0,68	0,90	0,83	0,76	1,17	1,18	1,26	1,46	1,19
α _{3,FFT}	0,03	0,02	0,02	0,02	0,04	0,06	0,03	0,04	0,03	0,03	0,05	0,06	0,04	0,08	0,04
α _{4,FFT}	0,01	0,00	0,01	0,01	0,03	0,03	0,03	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02
α _{5,FFT}	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,02
α _{6,FFT}	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01
φ _{1,FFT}	0,74	0,00	-1,37	1,27	1,26	1,88	0,70	2,70	1,38	0,88	1,19	1,63	1,07	4,62	-1,44
φ _{2,FFT}	-0,05	3,16	0,21	-0,16	-0,22	-0,02	-0,27	3,26	-0,22	-0,34	-0,11	-0,24	-0,23	0,28	0,26
φ _{3,FFT}	3,77	-0,06	3,98	4,24	0,73	-0,17	2,03	-0,62	-0,46	-1,24	-0,81	0,06	1,43	2,64	3,51
φ _{4,FFT}	3,50	1,15	2,19	0,37	1,51	0,75	1,93	0,12	1,38	4,48	-1,11	0,06	3,36	0,33	1,96
φ _{5,FFT}	2,77	0,20	0,11	3,07	2,31	-0,26	2,44	-0,66	3,41	1,26	3,67	3,01	2,07	0,89	0,64
φ _{6,FFT}	2,36	-1,43	-0,65	0,19	1,81	1,05	2,21	-0,81	3,12	0,66	0,13	-0,24	-0,76	2,08	2,47

C ₁ (N) α ₁	0,88	0,88	0,95	1,03	0,78	0,63	0,72	0,67	0,71	0,84	0,79	0,52	0,72	0,82	0,46
C ₂ (N) α ₂	0,36	0,41	0,31	0,21	0,22	0,22	0,18	0,14	0,11	0,14	0,13	0,13	0,15	0,11	0,12
C ₃ (N) α ₃	0,06	0,05	0,06	0,02	0,04	0,06	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,01	0,03	0,01
C ₄ (N) α ₄	0,025	0,010	0,020	0,009	0,037	0,046	0,019	0,009	0,000	0,008	0,009	0,013	0,007	0,004	0,008
C ₅ (N) α ₅	0,023	0,011	0,037	0,006	0,031	0,015	0,016	0,006	0,025	0,005	0,009	0,011	0,013	0,015	0,010
C ₆ (N) α ₆	0,013	0,030	0,005	0,010	0,029	0,020	0,008	0,009	0,007	0,005	0,010	0,003	0,003	0,010	0,005
φ ₁ (N)	0,81	0,08	-1,29	1,34	1,34	1,96	0,77	2,78	1,46	0,95	1,27	1,72	1,14	4,70	-1,35
φ ₂ (N)	0,55	4,36	2,07	0,64	0,97	2,07	0,30	4,32	1,72	0,29	1,02	1,91	0,49	1,71	2,57
φ ₃ (N)	6,72	2,92	6,99	7,21	3,72	2,84	4,98	2,36	2,55	1,72	2,17	3,07	4,40	5,63	6,52
φ ₄ (N)	6,55	4,21	5,25	3,42	4,57	3,82	4,97	3,18	4,44	7,53	1,95	3,13	6,41	3,39	5,03
φ ₅ (N)	5,85	3,28	3,19	6,15	5,39	2,82	5,51	2,43	6,50	4,34	6,75	6,09	5,15	3,97	3,73
φ ₆ (N)	5,45	1,66	2,45	3,28	4,91	4,15	5,30	2,28	6,22	3,75	3,23	2,86	2,33	5,18	5,57

Tableau 121 : Hypothèses de calcul et coefficients de Fourier de l'excitation pour la série G

Test	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
n°	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5
f _m [Hz]	2,40	2,60	2,80	2,40	2,60	2,80	2,40	2,60	2,80	2,40	2,60	2,80	2,40	2,60	2,80

f _p [Hz]	2,50	2,55	2,56	2,48	2,60	2,58	2,45	2,56	2,56	2,45	2,58	2,69	2,46	2,51	2,65
Nombre N	12	12	12	32	32	32	53	53	53	74	74	74	95	95	95
G _{moy} [N]	625	625	625	621	621	621	615	615	615	606	606	606	600	600	600
k _{p,max,moy,10}	4,03	4,03	4,03	4,05	4,05	4,05	4,50	4,50	4,50	4,80	4,80	4,80	4,93	4,93	4,93

ξ	0,34%	0,43%	0,33%	0,45%	0,43%	0,42%	0,43%	0,44%	0,40%	0,88%	1,00%	0,41%	0,44%	1,00%	0,40%
f*	5,04	5,04	5,04	5,04	5,04	5,04	5,04	5,04	5,04	5,02	5,02	5,04	5,04	5,02	5,04
k _{lin} [N/m]	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7	4,E+7
Z [mm]	0,19	0,19	0,19	0,50	0,50	0,50	0,82	0,82	0,82	1,13	1,13	1,13	1,44	1,44	1,44

a _{max} [m/s ²]	1,16	2,28	1,01	2,71	2,39	1,99	2,37	2,58	1,66	3,39	3,62	1,78	2,64	3,74	1,72
α _{1,FFT}	0,06	0,08	0,05	0,13	0,16	0,16	0,30	0,25	0,28	0,36	0,48	0,48	0,46	0,50	0,25
α _{2,FFT}	1,11	2,28	0,99	2,59	2,39	1,93	2,08	2,38	1,56	2,91	3,27	1,49	2,17	3,37	1,57
α _{3,FFT}	0,02	0,03	0,03	0,02	0,04	0,05	0,05	0,03	0,05	0,12	0,19	0,02	0,06	0,15	0,03
α _{4,FFT}	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,03	0,01	0,06	0,04
α _{5,FFT}	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,00	0,01	0,02	0,02	0,08	0,03	0,01	0,07	0,01
α _{6,FFT}	0,01	0,03	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03	0,01
φ _{1,FFT}	0,78	0,52	2,57	4,13	-0,87	2,05	-1,03	0,13	2,06	0,93	-1,40	1,68	1,02	-1,53	-1,19
φ _{2,FFT}	-0,05	3,17	-0,01	0,05	0,08	-0,05	3,08	3,21	-0,07	-0,05	0,20	-0,26	-0,19	0,19	0,19
φ _{3,FFT}	3,24	2,51	1,82	4,41	4,70	3,42	1,80	0,80	3,47	-0,30	4,18	1,89	-0,12	4,41	3,95
φ _{4,FFT}	2,64	2,84	2,49	3,16	1,47	3,78	0,49	4,31	4,36	4,24	4,23	4,31	3,97	4,68	-0,40
φ _{5,FFT}	3,31	1,00	3,30	-0,95	0,11	4,31	4,06	2,53	4,38	2,75	-0,04	4,26	0,88	-0,31	2,77
φ _{6,FFT}	1,64	4,25	1,90	1,23	1,65	-0,17	3,98	4,17	-1,04	-1,25	1,64	-1,31	0,94	1,39	1,53

C ₁ (N) α ₁	0,93	1,18	0,69	0,84	0,89	0,89	1,15	0,88	0,97	1,02	1,20	1,05	1,02	1,04	0,45
C ₂ (N) α ₂	0,10	0,31	0,18	0,19	0,30	0,17	0,15	0,10	0,07	0,13	0,16	0,16	0,07	0,05	0,10
C ₃ (N) α ₃	0,05	0,08	0,08	0,02	0,04	0,06	0,03	0,02	0,03	0,06	0,10	0,01	0,02	0,06	0,01
C ₄ (N) α ₄	0,028	0,039	0,050	0,019	0,010	0,048	0,015	0,014	0,029	0,015	0,006	0,018	0,004	0,029	0,020
C ₅ (N) α ₅	0,014	0,012	0,031	0,018	0,030	0,035	0,004	0,011	0,024	0,013	0,062	0,022	0,008	0,042	0,006
C ₆ (N) α ₆	0,031	0,123	0,021	0,028	0,024	0,012	0,013	0,020	0,008	0,011	0,014	0,011	0,013	0,020	0,007
φ ₁ (N)	0,78	0,53	2,57	4,13	-0,87	2,05	-1,03	0,14	2,06	0,94	-1,38	1,69	1,02	-1,52	-1,19
φ ₂ (N)	0,35	5,98	2,95	0,29	3,09	2,90	3,23	6,10	2,84	0,31	2,98	2,82	0,00	1,87	3,25
φ ₃ (N)	6,37	5,64	4,96	7,54	7,83	6,55	4,93	3,93	6,60	2,82	7,30	5,03	3,01	7,53	7,08
φ ₄ (N)	5,77	5,98	5,62	6,30	4,61	6,92	3,62	7,45	7,50	7,37	7,36	7,44	7,11	7,81	2,74
φ ₅ (N)	6,45	4,14	6,43	2,19	3,24	7,45	7,20	5,67	7,52	5,88	3,09	7,40	4,02	2,82	5,91
φ ₆ (N)	4,78	7,39	5,03	4,37	4,79	2,96	7,12	7,31	2,10	1,89	4,77	1,83	4,08	4,53	4,67

Tableau 122 : Hypothèses de calcul et coefficients de Fourier de l'excitation pour la série H

6.2 Evaluation de la contribution des personnes à l'amortissement

6.2.1 Modélisation de l'amortissement apporté par un groupe statique

6.2.1.1 Principe de modélisation du système foule/plancher

Dans le cas d'un plancher de salle de concert, il est intéressant d'étudier une configuration d'excitation généralisée, plus conforme à l'usage. On propose une approche à deux degrés de liberté mais dont l'excitation reviendrait aux excitations dynamiques classiques appliquées uniquement à la structure (Figure 198). Cela permet de travailler en deux temps :

- Etape 1 : Déterminer l'amortissement intrinsèque équivalent du système foule-structure
- Etape 2 : Effectuer un calcul dynamique sur un système généralisé à un degré de liberté avec le taux d'amortissement du système calculé préalablement à l'étape 1.

L'idée est donc de pouvoir exploiter dans un premier temps les formules analytiques des amortisseurs dynamiques dits accordés (ce qui n'est pas le cas de la foule ici sauf pur hasard) pour déterminer l'amortissement équivalent via le calcul du facteur d'amplification dynamique maximal.

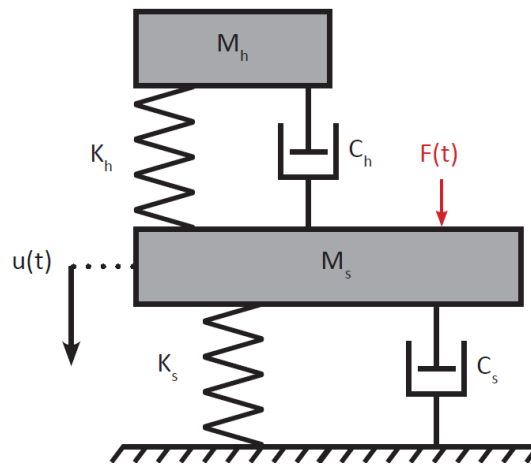


Figure 198 : Variante de modélisation à deux degrés de liberté du système foule-structure

On peut déterminer le facteur d'amplification dynamique du système à deux degrés de liberté sur la base d'un amortissement structurel ξ_s non nul et d'une excitation harmonique de pulsation ω par l'expression suivante tirée du travail de thèse de A. Allani [76] :

$$A(\beta) = \frac{\sqrt{(\alpha^2 - \beta^2)^2 + (2\xi_h\beta\alpha)^2}}{\sqrt{[(\beta^2 - \alpha^2)(1 - \beta^2) + \mu\beta^2\alpha^2 + 4\alpha\xi_s\xi_h\beta^2]^2 + [2\xi_h\alpha\beta(\beta^2 + \mu\beta^2 - 1) + 2\xi_s\beta(\beta^2 - \alpha^2)]^2}} \quad (129)$$

$$A(\beta) = \frac{u_{dyn}}{u_{stat}} ; \alpha = \frac{\omega_h}{\omega_s} ; \beta = \frac{\omega}{\omega_s} ; \mu = \frac{M_h}{M_s} ; \quad (130)$$

On remarquera que pour $\xi_s = 0$, on retrouve la solution de Den Hartog rappelée dans le guide du SETRA [33]. On détermine l'amortissement équivalent approché du système couplé ramené à un oscillateur à un degré de liberté de pulsation $\omega_{eq} = \omega_s \beta_{A_{MAX}}$ et de masse $M_{eq} = M_h + M_s$ par la formule suivante :

$$\xi_{eq} = \frac{1}{2 \max(A(\beta))} \quad (131)$$

6.2.1.2 Etude expérimentale sur la base des essais sur prototype

6.2.1.2.1 Essai avec 40 personnes statiques :

On propose de vérifier la validité de la modélisation type amortisseur non accordé précédente dans le cas du test 3 lors des essais avec 40 individus statiques (Tableau 90).

FRF	a_{\max} [m/s ²]	Amortissement [%]	Fréquence [Hz]	Masse modale [t]
03_250mg	0,441	3,26	4,91	27,0

Tableau 123 : Rappel des propriétés modales avec dallettes et 40 individus statiques

On avait obtenu une accélération proche de 0,5 m/s², ce qui permet également de rappeler les propriétés modales obtenues à vide avec dallettes pour ce niveau d'accélération. On retiendra une fréquence propre de 5,04 Hz (contre 5,11 Hz lors des tests) pour tenir compte de l'endommagement lié aux tests réalisés entre temps.

FRF	a_{\max} [m/s ²]	Amortissement [%]	Fréquence [Hz]	Masse modale [t]
01_23mg	0,551	0,27	5,11	26,6

Tableau 124 : Rappel des propriétés modales avec dallettes à vide

On constate en pratique que la présence de personnes sur l'ouvrage engendre un amortissement additionnel de l'ordre de 3%.

On rappelle donc ci-dessous les propriétés modales utiles de la structure support à vide. Etant donné les légères fluctuations d'estimation aux essais et pour la bonne cohérence relative, seule la masse modale est calculée via logiciel aux éléments finis. Elle représente 46,4% de la masse totale. L'amortissement et la première fréquence propre sont repris des essais :

Masse totale de la structure	$M_{\text{tot},s}$ [kg]	55 454
Masse généralisée de la structure	M_s [kg]	25 730
Taux d'amortissement critique	ξ_s	0,27%
Amortissement	C_s [kg/s]	4 400
Fréquence propre de la structure	f_s [Hz]	5,04
Pulsation propre de la structure	ω_s [rad/s]	32

Tableau 125 : Propriétés de la structure

Il s'agit ensuite de caractériser physiquement la foule comme un amortisseur « non accordé » en se basant sur les paramètres des essais du Tableau 89 et sur la littérature évoquée au § 2.2.2.2.2. A partir d'une forme modale en sinusoïde, on détermine la masse modale globale apportée par les participants dont on connaît la disposition et donc la contribution modale. Pour le reste on travaille avec des caractéristiques modales moyennes pour chaque participant, soit 22% d'amortissement pour les personnes et une fréquence propre prise par hypothèse à 5,67 Hz.

Masse moyenne d'une personne	m_h [kg]	66,4
Aire de platelage	S [m ²]	48
Nombre de personnes statiques sur l'ouvrage	N	40
Densité de personnes statiques sur l'ouvrage	d [pers/m ²]	0,8
Masse globale de personnes	$M_{tot,h}$ [kg]	2656
Masse généralisée de personnes	M_h [kg]	1480
Taux d'amortissement critique	ξ_h	22%
Amortissement	C_h [kg/s]	23 212
Fréquence propre d'une personne	f_h [Hz]	5,67
Pulsation propre des personnes	ω_h [rad/s]	36

Tableau 126 : Propriétés du groupe de participants

On en déduit les paramètres relatifs du système couplé. On donne pour ordre de grandeur la fréquence et l'amortissement optimaux pour amortir l'ouvrage selon le modèle de Den Hartog qui ne prend pas en compte l'amortissement propre à la structure qui est d'ailleurs très faible :

Rapport de masse groupe / structure	μ	6%
Rapport de pulsation propres groupe / structure	α	113%
Fréquence d'amortissement accordé optimale selon Den Hartog	$f_{h,opt}$ [Hz]	4,8
Amortissement optimal selon Den Hartog	$\xi_{h,opt}$ [Hz]	13,5%

Tableau 127 : Paramètres relatifs pour le modèle d'amortissement

Sur la Figure 199 sont déterminés les facteurs d'amplification dynamique dans trois situations :

- Sans présence du public ($M_h = 0$, formule classique de l'oscillateur à un degré de liberté)
- Avec du public mais sans amortissement propre de la structure ($\xi_s = 0$, Den Hartog)
- Avec du public et avec amortissement propre de la structure selon le § 6.2.1.1

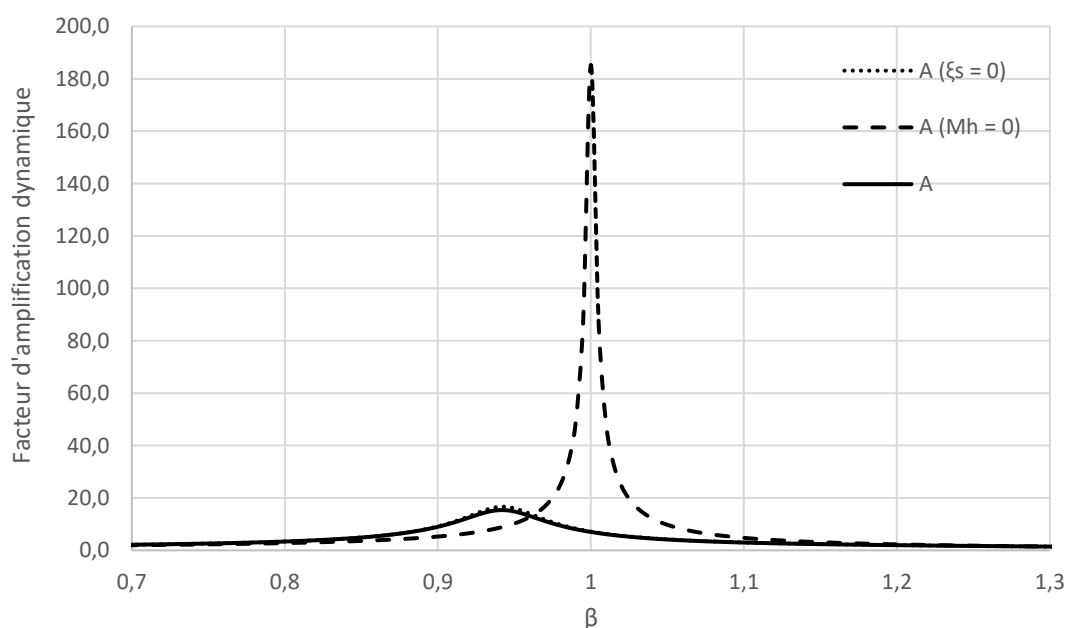


Figure 199 : Amplification dynamique selon présence de public et de l'amortissement structurel

Maximum d'amplification sans la foule	$A_{\max} (M_h = 0)$	185,2
Amortissement de la structure seule	ξ_s	0,27%

Tableau 128 : Amortissement de la structure seule sans public

Maximum d'amplification avec la foule	$A_{\max} (\xi_s = 0)$	16,6
Décalage de la première fréquence propre	$\beta_{A_{\max}}$	0,94
Première fréquence propre avec foule	f_{pic} [Hz]	4,74
Amortissement équivalent de la foule	ξ_{heq}	3,02%

Tableau 129 : Amortissement équivalent attribuable à la foule pour une structure non amortie

Maximum d'amplification avec la foule	A_{\max}	15,3
Décalage de la première fréquence propre	$\beta_{A_{\max}}$	0,94
Première fréquence propre avec foule	f_{pic} [Hz]	4,74
Amortissement équivalent du système couplé	ξ_{eq}	3,26%

Tableau 130 : Amortissement équivalent du système couplé avec une structure amortie

On observe peu d'écart entre l'amortissement équivalent de Den Hartog et l'amortissement prenant en compte l'amortissement de la structure. On obtient bien l'amortissement global expérimental pour des hypothèses d'amortissement de 22% et de fréquence de 5,67 Hz pour les personnes. La fréquence propre équivalente du système couplé estimée est de l'ordre de 4,74 Hz, soit 6% plus faible que la fréquence déduite par essais.

Néanmoins ces paramètres individuels sont susceptibles de varier légèrement en pratique selon la morphologie et la posture des personnes. Aussi il est toujours utile de tracer la courbe d'amortissement en fonction de la fréquence propre des personnes en balayant entre 2,3 Hz et 6 Hz et en se fixant le paramètre d'amortissement à 22% étant donné qu'il est d'après la littérature peu variable suivant l'activité d'une personne se tenant debout. Sur la Figure 200, il est observé qu'une diminution de la fréquence propre des personnes exerce une influence théoriquement non négligeable. Si les personnes s'assouplissent, la fréquence propre va baisser et conduire à une augmentation de l'amortissement jusqu'au seuil de 4,7 Hz à partir duquel l'amortissement va diminuer.

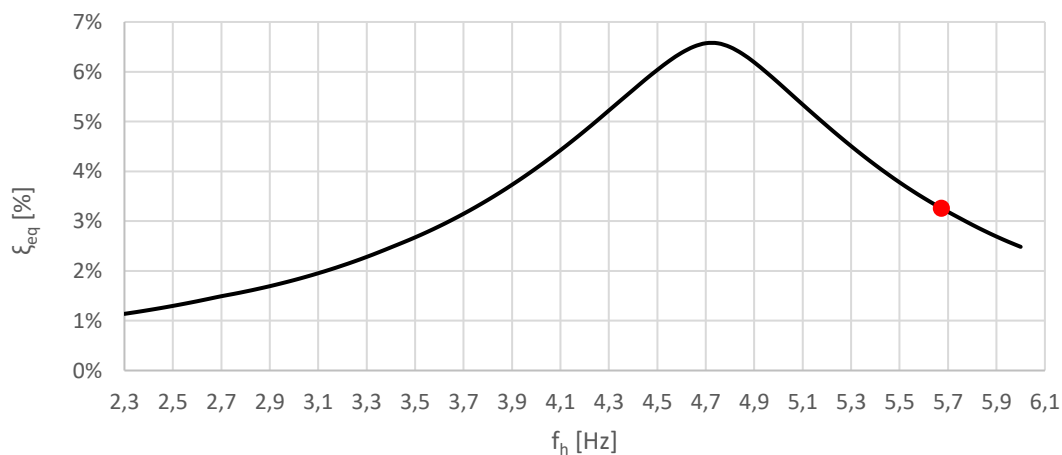


Figure 200 : Amortissement global équivalent selon la fréquence individuelle des personnes

6.2.1.2.2 Essai avec 18 personnes statiques :

On procède pour vérification à l'étude de l'amortissement équivalent que l'on obtient pour 18 personnes statiques positionnées de manière centrée comme présenté au Tableau 93.

FRF	a_{\max} [m/s ²]	Amortissement [%]	Fréquence [Hz]	Masse modale [t]
01_394mg	1,154	1,99	4,95	28,3

Tableau 131 : Rappel des propriétés modales avec dallettes et 18 individus statiques

Pour ce niveau d'accélération, on se base sur les propriétés modales obtenues à vide avec dallettes encadrant ce niveau d'accélération (Rappel du Tableau 73) :

FRF	a_{\max} [m/s ²]	Amortissement [%]	Fréquence [Hz]	Masse modale [t]
01_23mg	0,551	0,27	5,11	26,6
02_92mg	1,614	0,40	5,08	29,3

Tableau 132 : Rappel des propriétés modales avec dallettes à vide

On déduit les paramètres modaux de calcul du prototype (amortissement et fréquence) par interpolation linéaire. On conserve néanmoins une fréquence propre de 5,04 Hz pour tenir compte de l'endommagement lors des essais mécaniques précédents :

Masse totale de la structure	$M_{\text{tot},s}$ [kg]	55 454
Masse généralisée de la structure	M_s [kg]	25 730
Taux d'amortissement critique	ξ_s	0,34%
Amortissement	C_s [kg/s]	5 541
Fréquence propre de la structure	f_s [Hz]	5,04
Pulsation propre de la structure	ω_s [rad/s]	32

Tableau 133 : Propriétés de la structure

Masse moyenne d'une personne	m_h [kg]	66
Aire de platelage	A	48
Nombre de personnes statiques sur l'ouvrage	N	18
Densité de personnes statiques sur l'ouvrage	d [pers/m ²]	0,4
Masse globale de personnes	$M_{\text{tot},h}$ [kg]	1188
Masse généralisée de personnes	M_h [kg]	1141
Taux d'amortissement critique	ξ_h	22%
Amortissement	C_h [kg/s]	19 384
Fréquence propre d'une personne	f_h [Hz]	6,15
Pulsation propre des personnes	ω_h [rad/s]	39

Tableau 134 : Propriétés du groupe de participants

Rapport de masse groupe / structure	μ	4%
Rapport de pulsation propres groupe / structure	α	122%
Fréquence d'amortissement accordé optimale selon Den Hartog	$f_{h,\text{opt}}$ [Hz]	4,8
Amortissement optimal selon Den Hartog	$\xi_{h,\text{opt}}$ [Hz]	12,1%

Tableau 135 : Paramètres relatifs pour le modèle d'amortissement

On en déduit l'amortissement du système couplé qui correspond à l'amortissement mesuré pour une hypothèse de fréquence propre des individus de 6,15 Hz et un amortissement de 22% (Figure 201).

Première fréquence propre avec foule	f_{pic} [Hz]	4,84
Amortissement équivalent du système couplé	ξ_{eq}	1,99%

Tableau 136 : Amortissement équivalent du système couplé avec une structure amortie

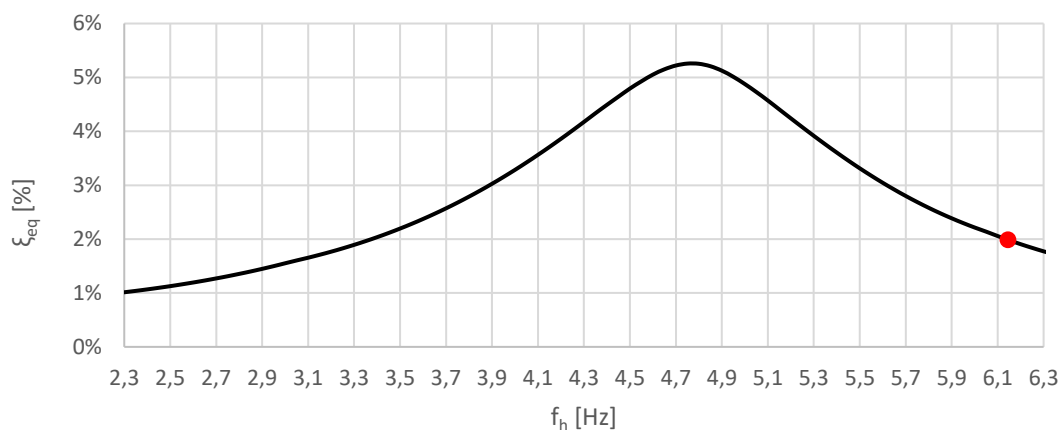


Figure 201 : Amortissement équivalent selon la fréquence individuelle pour $\xi_h = 22\%$

A noter que l'on fait une hypothèse sur l'amortissement en se basant sur la littérature. On retrouve parfois chez certains auteurs des valeurs plus fortes jusqu'à plus de 60% [30]. On obtient dans ce cas la courbe Figure 202 :

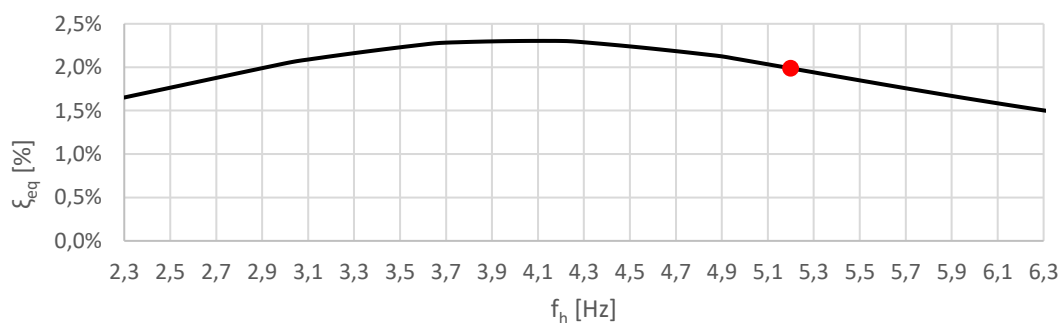


Figure 202 : Amortissement équivalent selon la fréquence individuelle pour $\xi_h = 60\%$

On observe une augmentation de la fréquence propre apparente du système couplé. On note également un lissage global de l'amortissement. Les recherches futures devront préciser la valeur d'amortissement individuel.

Fréquence propre d'une personne	f_h [Hz]	5,20
Taux d'amortissement critique d'une personne	ξ_h	60%
Première fréquence propre avec foule	f_{pic} [Hz]	4,91
Amortissement équivalent du système couplé	ξ_{eq}	1,99%

Tableau 137 : Résultats avec modifications des paramètres modaux des individus

6.2.1.3 Variabilité des paramètres individuels et abaques de calcul

Tout paramètre fixé par ailleurs, on peut tracer les abaques Figure 203 et Figure 204 donnant l'amortissement global équivalent pour les deux situations d'essais en fonction de la fréquence propre des individus et l'amortissement individuel. En l'absence d'essais, cela permet d'évaluer les incertitudes sur la fréquence propre et l'amortissement des individus correspondant au modèle simplifié adopté pour cette étude.

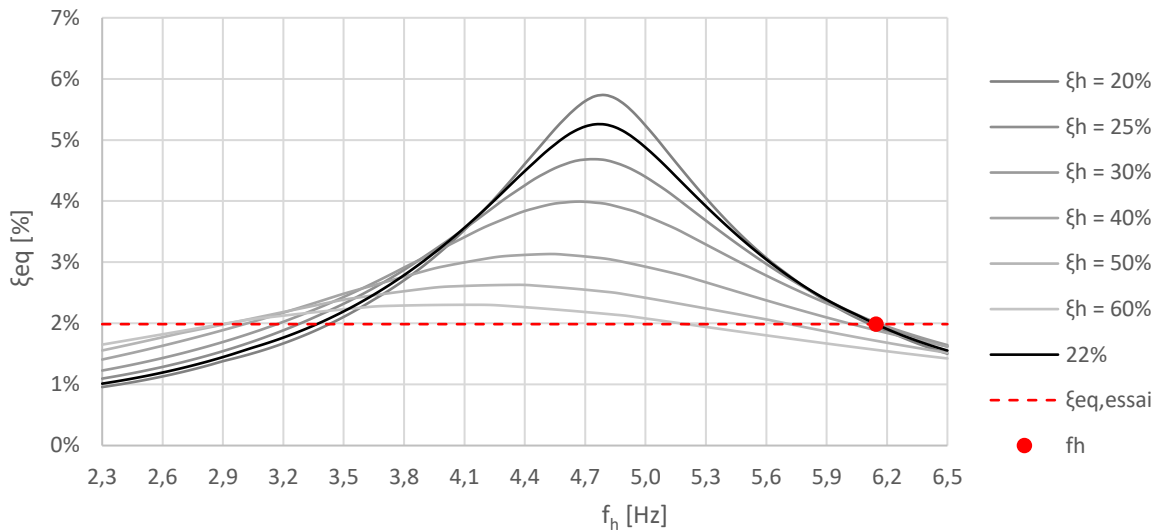


Figure 203 : Abaque des paramètres individuels pour les essais avec 18 personnes statiques

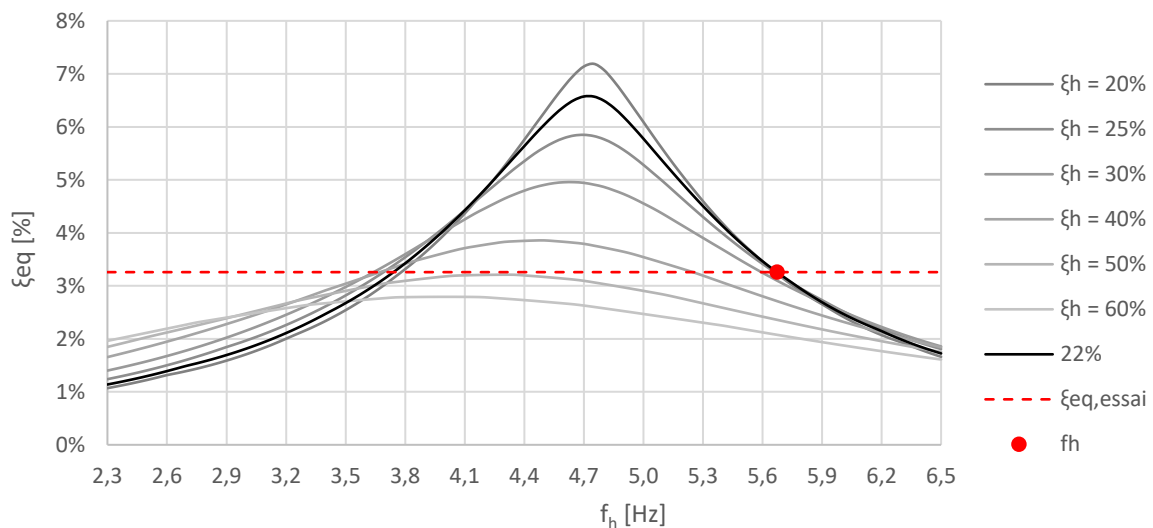


Figure 204 : Abaque des paramètres individuels pour les essais avec 40 personnes statiques

Etant donné les amortissements équivalents mesurés et le fait qu'une personne se tenant debout sans bouger ait une fréquence propre comprise environ entre 5 Hz et 7 Hz voir un peu au-delà, on constate sur l'abaque à 40 personnes qu'il est peu probable en pratique que l'amortissement individuel moyen soit supérieur à 40%.

6.2.2 Cas de personnes en situation de marche

L'amortissement équivalent dû au groupe en situation de marche est vérifié en se basant sur les mesures du test 4 avec excitateur et avec des personnes en situation de marche (Tableau 91) :

FRF	a_{\max} [m/s ²]	Amortissement [%]	Fréquence [Hz]	Masse modale [t]
03_250mg	0,684	2,34	5,09	25,4

Tableau 138 : Rappel des propriétés modales avec dallettes et 40 individus mobiles

Sur le même principe que précédemment, on donne ci-dessous les paramètres d'hypothèses retenus :

Masse totale de la structure	$M_{\text{tot},s}$ [kg]	55 454
Masse généralisée de la structure	M_s [kg]	25 730
Taux d'amortissement critique	ξ_s	0,28%
Fréquence propre de la structure	f_s [Hz]	5,04

Tableau 139 : Propriétés de la structure

Masse globale de personnes	$M_{\text{tot},h}$ [kg]	2656
Masse généralisée de personnes	M_h [kg]	1251
Taux d'amortissement critique	ξ_h	25%
Fréquence propre d'une personne	f_h [Hz]	3,44

Tableau 140 : Propriétés du groupe de participants

En faisant l'hypothèse d'une fréquence propre des personnes de 3,44 Hz, on retrouve l'amortissement équivalent mesuré de 2,34% ainsi que la fréquence propre :

Première fréquence propre avec foule	f_{pic} [Hz]	5,09
Amortissement équivalent du système couplé	ξ_{eq}	2,34%

Tableau 141 : Amortissement équivalent du système couplé avec une structure amortie

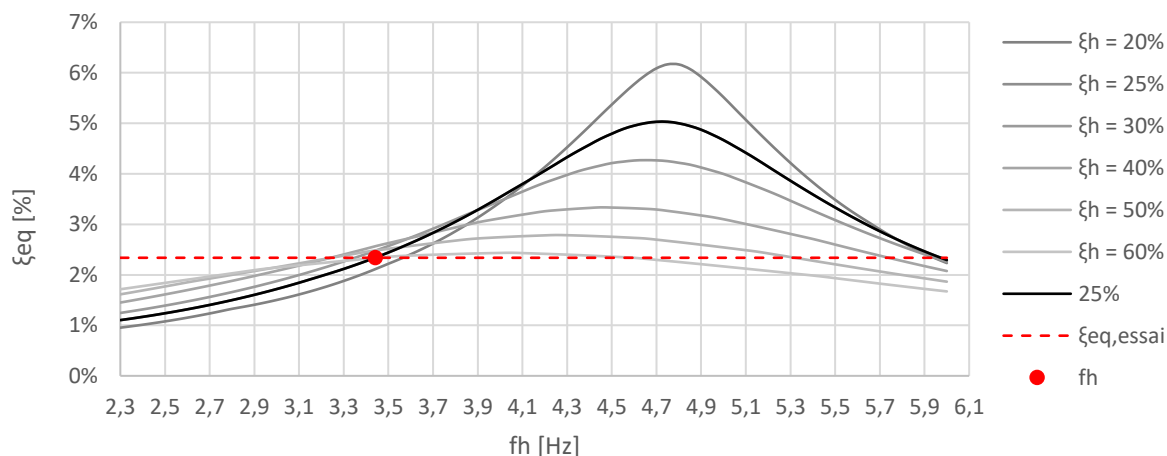


Figure 205 : Abaque des paramètres individuels pour les essais avec 40 personnes en marche

6.2.3 Estimation de l'amortissement apporté par une foule dansant sur place

6.2.3.1 Cas du plancher de référence avec une foule dense

On cherche à vérifier l'ordre de grandeur des valeurs d'amortissement du Tableau 24 basé sur la littérature. Une valeur de 1,8% était proposée pour un public actif assistant à un concert avec une densité de 0,8 p/m² et 3,6% pour une densité de 3 p/m². On se base sur la modélisation précédente vérifiée pour une foule statique en considérant cette fois-ci les paramètres associés à une foule active stationnant sur place comme proposé au Tableau 12.

Les paramètres dynamiques de la structure sont fixés dans un premier temps. L'amortissement propre de la structure mixte est pris par hypothèse selon le Tableau 20, le reste des valeurs étant calculées :

Masse totale de la structure	$M_{tot,s}$ [kg]	327 819
Masse généralisée de la structure	M_s [kg]	141 880
Taux d'amortissement critique	ξ_s	0,60%
Amortissement	C_s [kg/s]	43 432
Fréquence propre de la structure	f_s [Hz]	4,06
Pulsation propre de la structure	ω_s [rad/s]	26

Tableau 142 : Paramètres dynamiques propres de la structure

On définit à la suite les paramètres dynamiques propres au groupe de personnes supposé debout et actif dans une configuration de type danse avec contact permanent et une densité de 0,8 p/m² :

Masse moyenne d'une personne	m_h [kg]	75
Aire de platelage	A	238
Nombre de personnes statiques sur l'ouvrage	N	190
Densité de personnes statiques sur l'ouvrage	D [p/m ²]	0,8
Masse globale de personnes	$M_{tot,h}$ [kg]	14 274
Masse généralisée de personnes	M_h [kg]	6 178
Taux d'amortissement critique	ξ_h	25%
Amortissement	C_h [kg/s]	44 639
Fréquence propre d'une personne	f_h [Hz]	2,3
Pulsation propre des personnes	ω_h [rad/s]	14

Tableau 143 : Paramètres dynamiques propres du groupe

On en déduit au Tableau 144 les paramètres relatifs d'intérêt pour le système couplé. On peut notamment estimer la fréquence d'amortissement accordé optimale, ce qui permet de situer l'efficacité de la foule :

Rapport de masse groupe / structure	μ	4%
Rapport de pulsation propres groupe / structure	α	57%
Fréquence d'amortissement accordé optimale selon Den Hartog	$f_{h,opt}$ [Hz]	3,9
Amortissement optimal selon Den Hartog	$\xi_{h,opt}$ [Hz]	12,0%

Tableau 144 : Paramètres dynamiques relatifs du système couplé

On obtient ensuite l'amplification dynamique Figure 206:

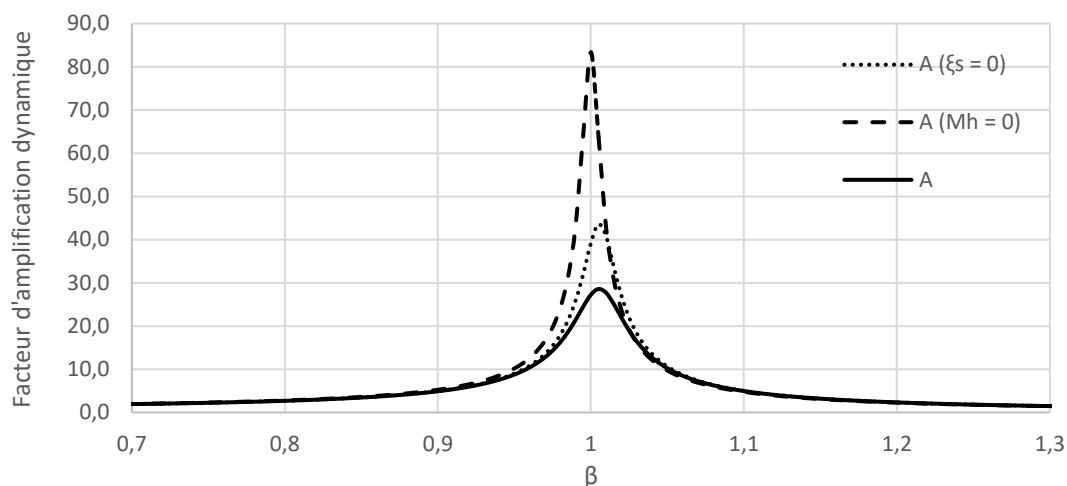


Figure 206 : Facteurs d'amplification dynamique selon couplage

On note que la foule amortit nettement l'ouvrage doté d'un amortissement structurel relativement faible. La prise en compte de l'amortissement de l'ouvrage en complément de celui apporté par l'interaction foule-structure n'est pas pour autant négligeable. On en déduit l'amortissement global équivalent Tableau 145.

Maximum d'amplification avec la foule	A_{\max}	28,7
Décalage de la première fréquence propre	β_{\max}	1,01
Première fréquence propre avec foule	f_{pic} [Hz]	4,08
Amortissement équivalent du système couplé	ξ_{eq}	1,8%

Tableau 145 : Détermination de l'amortissement équivalent

Néanmoins, il faut prêter attention à la sensibilité de l'amortissement équivalent à la valeur de la fréquence propre retenue pour le système représentant la foule. On a pu voir à travers la littérature [27] que la valeur recommandée est de 2,3 Hz mais il n'est pas impossible d'avoir des variations étant observé qu'une personne debout statique puisse avoir une fréquence supérieure à 5 Hz. Si on trace la courbe de l'amortissement entre 2,3 Hz et 5 Hz, on constate que l'amortissement peut monter jusqu'à environ 5% si le système représentant la foule présente une fréquence propre de 3,9 Hz. Sur la plage de fréquence considérée, l'amortissement de 1,8% semble une valeur prudente pour le calcul.

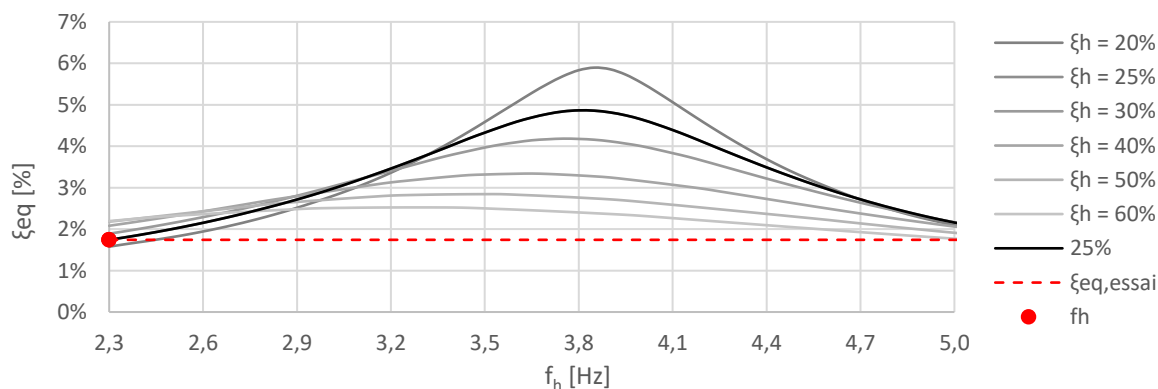


Figure 207 : Evolution de l'amortissement équivalent selon fréquence de la foule

6.2.3.2 Cas du plancher de référence avec une foule très dense

On réalise le même exercice en considérant cette fois-ci une densité de personne de 3 p/m^2 , les paramètres propres à la structure étant inchangés.

Masse moyenne d'une personne	m_h [kg]	75
Aire de platelage	A	238
Nombre de personnes statiques sur l'ouvrage	N	714
Densité de personnes statiques sur l'ouvrage	d	3,0
Masse globale de personnes	$M_{\text{tot,h}}$ [kg]	53528
Masse généralisée de personnes	M_h [kg]	23167
Taux d'amortissement critique	ξ_h	25%
Amortissement	C_h [kg/s]	167 395
Fréquence propre d'une personne	f_h [Hz]	2,3
Pulsation propre des personnes	ω_h [rad/s]	14

Tableau 146 : Paramètres dynamiques propres du groupe

On obtient les paramètres de couplage suivants :

Rapport de masse groupe / structure	μ	16%
Rapport de pulsation propres groupe / structure	α	57%
Fréquence d'amortissement accordé optimale selon Den Hartog	$f_{h,\text{opt}}$ [Hz]	3,5
Amortissement optimal selon Den Hartog	$\xi_{h,\text{opt}}$ [Hz]	19,7%

Tableau 147 : Paramètres dynamiques relatifs du système couplé

Le facteur d'amplification dynamique prend l'allure suivante Figure 208 :

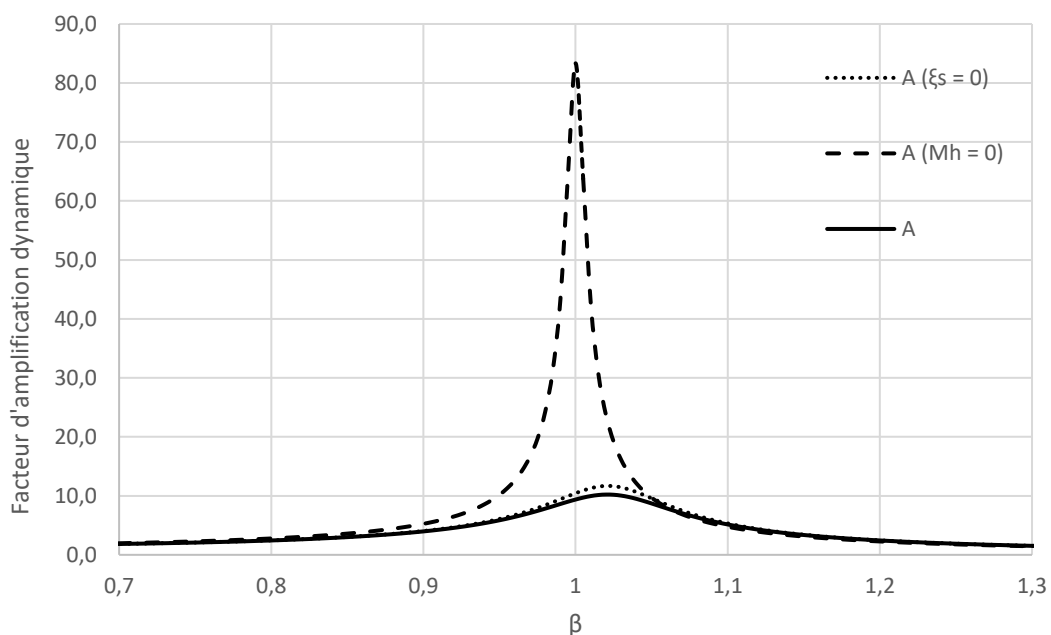


Figure 208 : Facteurs d'amplification dynamique selon couplage

On note une contribution de la foule à l'amortissement bien plus nette et un décalage de la fréquence propre du système couplé plus important que précédemment.

Maximum d'amplification avec la foule	A_{max}	10,3
Décalage de la première fréquence propre	β_{max}	1,02
Première fréquence propre avec foule	f_{pic} [Hz]	4,14
Amortissement équivalent du système couplé	ξ_{eq}	4,86%

Tableau 148 : Détermination de l'amortissement équivalent

Néanmoins, la fréquence optimale de couplage (en supposant un amortissement structural négligeable) a baissé. Il s'agit donc de vérifier comment évolue l'amortissement équivalent avec la fréquence de la foule (Figure 209).

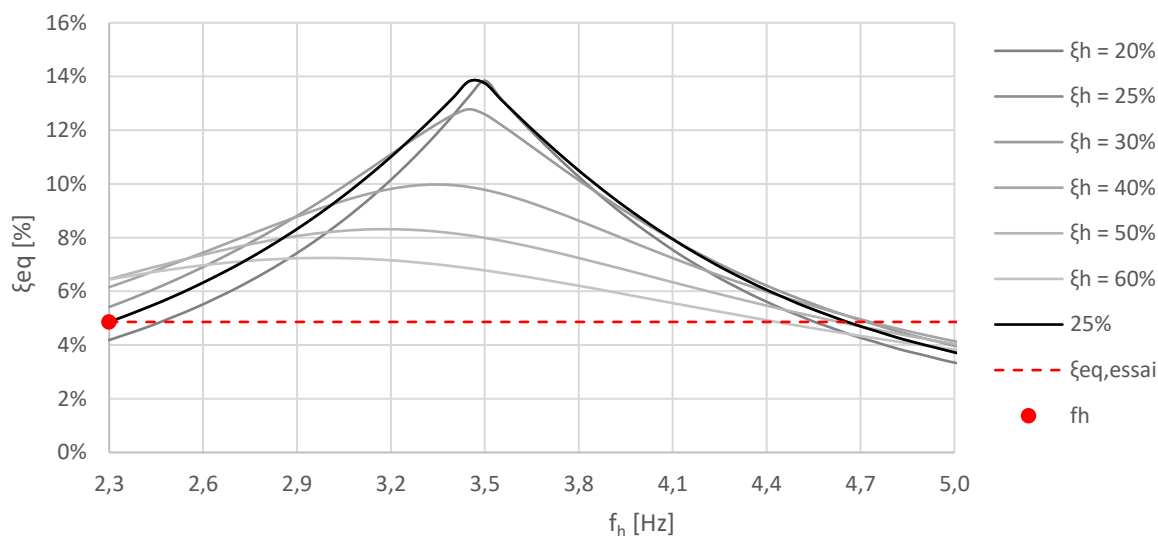


Figure 209 : Evolution de l'amortissement équivalent selon fréquence de la foule

Sur la Figure 209, il est observé que l'amortissement apporté par la foule pourrait atteindre des valeurs proches de 14%. Cela n'est pas incohérent avec le niveau d'amortissement de 16% qui aurait été déterminé par des mesures sur des tribunes dans les années 1990 [8].

Cependant il est à noter que l'amortissement chute à environ 3,6% aux alentours de 5Hz. Par sécurité, il s'agit de la valeur que l'on pourrait retenir pour une étude.

Conclusion :

Les valeurs retenues sur la base de la bibliographie du Tableau 24 concordent avec les estimations issues du modèle analytique. Néanmoins, on mesure bien la variabilité potentielle de l'amortissement suivant la fréquence propre des participants. Retenir la valeur la plus défavorable sur le spectre de fréquences atteignables peut-être une démarche pertinente pour le dimensionnement, à condition de prendre également une valeur prudente sur l'amortissement propre aux individus.

6.2.4 Cas du balancement vertical en excitation contrôlée

Le cas du balancement vertical implique a priori plus d'incertitudes que pour le saut puisque les participants actifs sont en contact permanent avec l'ouvrage et participent au système à la fois en l'excitant et en l'amortissant de sorte à constituer une sorte d'amortisseur dynamique plus ou moins mal accordé. Afin d'étudier la pertinence de la méthode de calcul par estimation de l'action exercée sur la base de la mesure de l'accélération de l'ouvrage présentée au § 6.1.3.1, on se base sur le test de groupe A5 avec les étudiants S3 (Figure 210). On connaît l'excitation de tous les participants actifs via les accéléromètres et donc l'excitation résultante.



Figure 210 : Configuration des participants S3 du test A5

Le positionnement des individus est donné par la Figure 211 en référence au Tableau 104 définissant les caractéristiques individuelles de participants. Les participants 11 et 12 sont inactifs durant le test.

D	1			2			3			4			5			6			7			8			9			10			11			12					
P	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
S																3	4	5	6																				
C																2	11	12	7																				
N																1	10	9	8																				

Figure 211 : Positionnement des participants sur les dallettes

L'amortissement global considéré est de 1,04% décomposé sur la base de :

- 0,27% pour la structure d'après les essais avec exciteur mécanique (Tableau 73)
- 0,27% pour les individus passifs en utilisant 6.2.1.1 ($\xi_h = 22\%$; $f_h = 6 \text{ Hz}$)
- 0,50% pour les individus actifs en utilisant par extension 6.2.1.1 ($\xi_h = 25\%$; $f_h = 2,3 \text{ Hz}$)

On retient une fréquence propre de l'ouvrage de 5,01 Hz tenant compte de l'interaction.

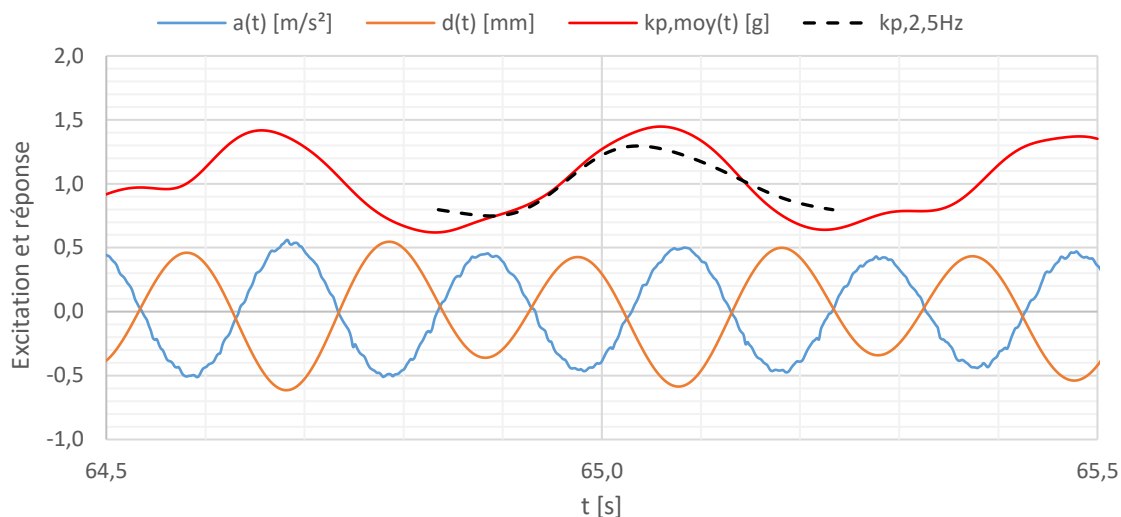


Figure 212 : Estimation de l'excitation du test A5 à 2,5 Hz et comparaison

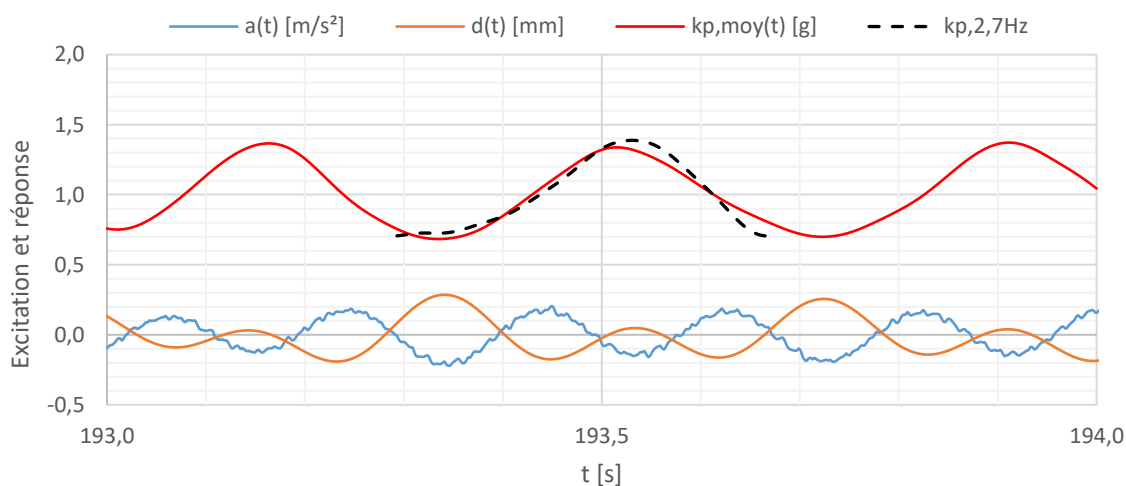


Figure 213 : Estimation de l'excitation du test A5 à 2,7 Hz et comparaison

Sur le Tableau 149, on observe une bonne correspondance à une fréquence d'excitation de 2,7 Hz pour des cycles d'excitation bien entretenus. L'erreur augmente à 11% pour une excitation de 2,5 Hz au voisinage de la résonance car la sensibilité de la fréquence propre du système est assez importante. En effet, le fait que les individus participent au système rend la fréquence propre du mode 1 légèrement variable selon la raideur des participants qui de plus évolue au cours du temps. Disposant des abaques d'amortissement équivalent en fonction de la raideur des individus, le projeteur pourra toujours considérer le cas le plus défavorable pour le dimensionnement en sécurité. Aussi l'incertitude sur la fréquence propre du système peut être environnée en conception.

Fréquence [Hz]	2,5	2,7
kp,moy,réel	1,45	1,34
kp,moy,estimé	1,29	1,39
Erreur [%]	-11%	4%

Tableau 149 : Ecart entre le maximum de l'excitation réelle et son estimation

6.2.5 Cas du saut en excitation contrôlée

On a supposé d'après la littérature [8] que la fréquence propre et l'amortissement du système ne sont pas influencés par le saut. Il s'agit ici de le vérifier avec des tests de groupe et en particulier le test E5 avec les S3 qui suit le test A5 avec une configuration des participants identique. Pour mémoire, ce test comporte 4 séquences de sauts successives de 2,5 Hz à 2,8 Hz avec 12 participants dont 2 passifs. Les 10 participants actifs étant instrumentés, on connaît à la fois l'excitation et la réponse de l'ouvrage. Aussi, l'exercice consiste à nouveau à superposer l'excitation mesurée avec l'excitation estimée sur la base de l'extraction d'un motif d'accélération au centre du prototype. Pour l'estimation de l'excitation, on fait l'hypothèse que seuls les individus statiques exercent une influence sur la fréquence propre du système global et son amortissement. On trace l'estimation de $k_{p,moy}(t)$ en pointillés.

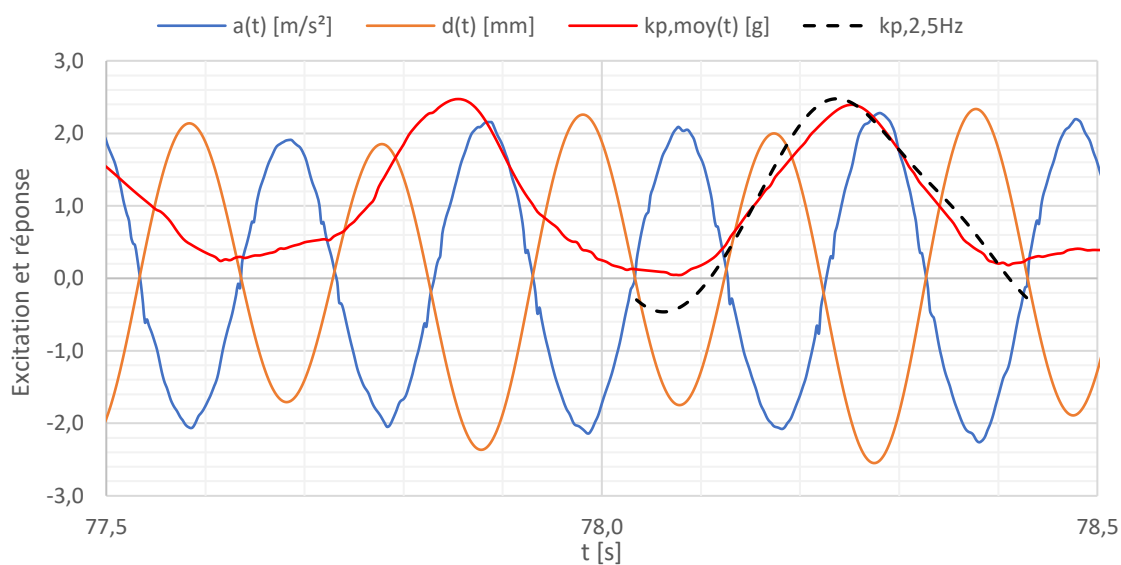


Figure 214 : Estimation de l'excitation du test E5 à 2,5 Hz et comparaison

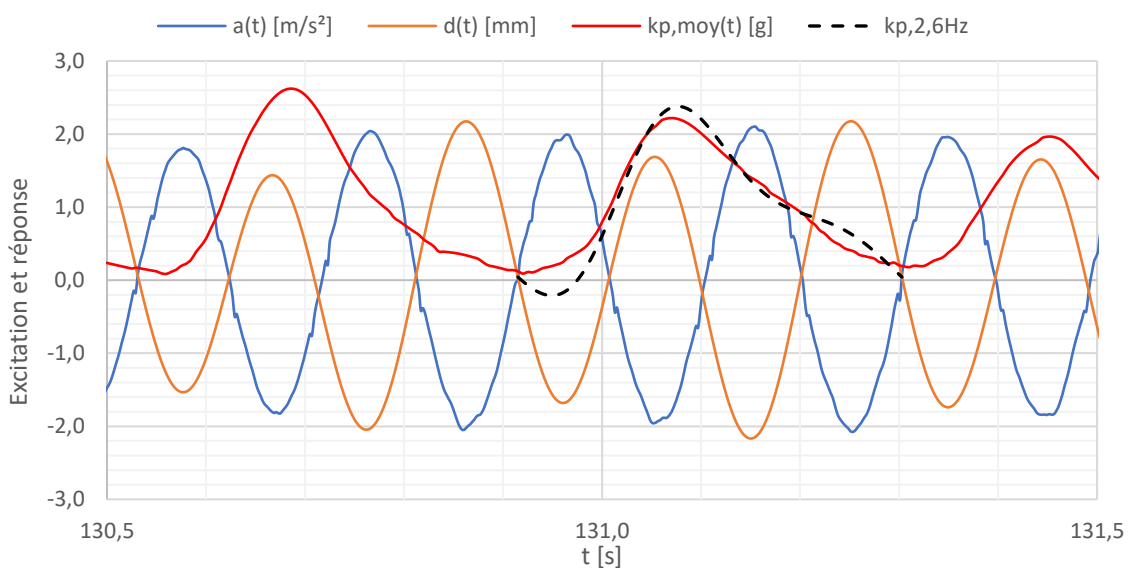


Figure 215 : Estimation de l'excitation du test E5 à 2,6 Hz et comparaison

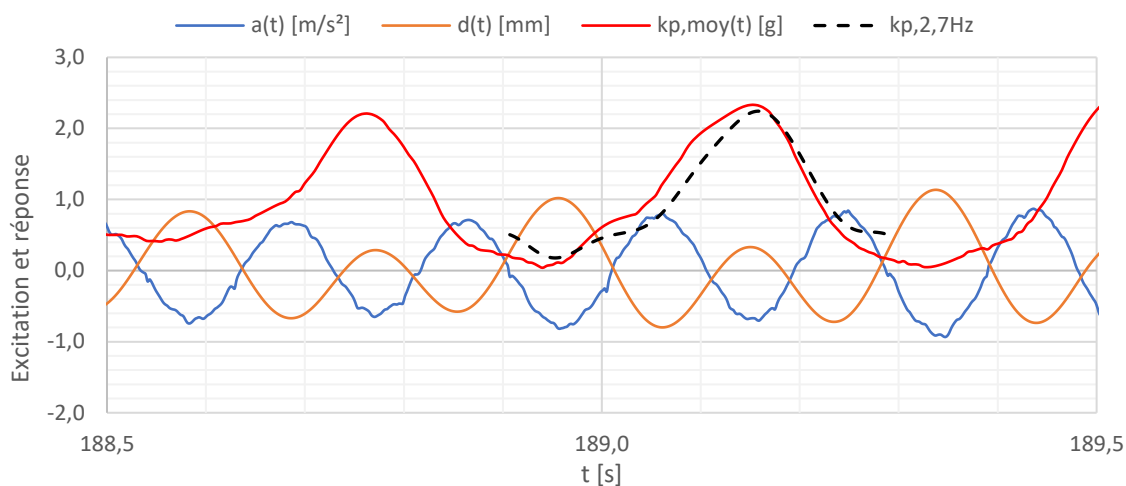


Figure 216 : Estimation de l'excitation du test E5 à 2,7 Hz et comparaison

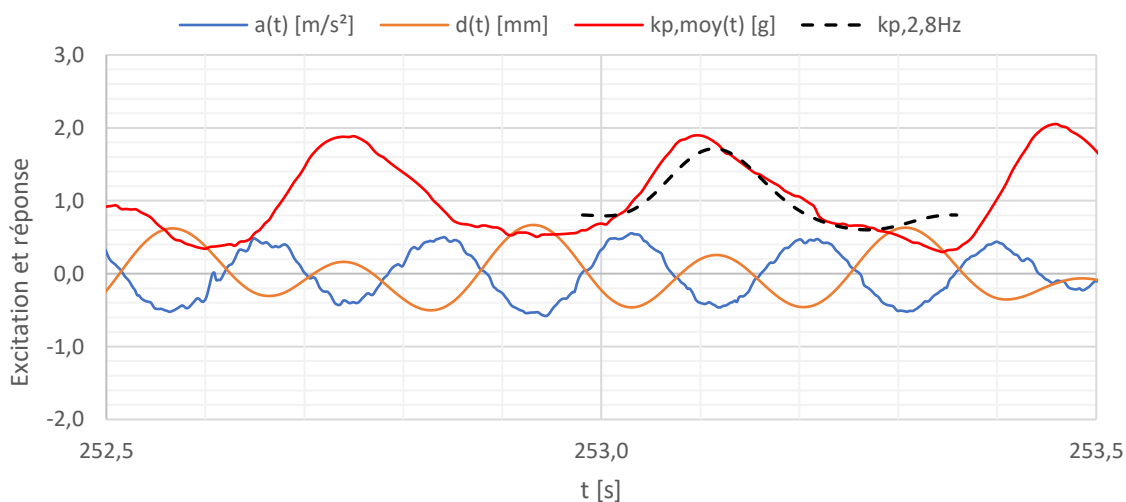


Figure 217 : Estimation de l'excitation du test E5 à 2,8 Hz et comparaison

On réalise l'estimation en postulant par le calcul selon 6.2.1.1 que les personnes statiques ($\xi_h = 22\%$ et $f_h = 6$ Hz par hypothèse issue de l'état de l'art) décalent la fréquence propre du système de 5,04 Hz à 5,01 Hz et apportent un surplus d'amortissement de 0,27% en plus de l'amortissement structural variant entre 0,43% et 0,27% suivant le niveau d'accélération. On observe que l'allure de l'excitation est très bien approchée. On estime l'erreur sur le maximum de k_p à maximum 10%. Cela permet de conforter la procédure d'estimation de la coordination des personnes de 6.1.3.1 basée sur la même méthode.

Fréquence [Hz]	2,5	2,6	2,7	2,8
$k_{p,moy,réel}$ [g]	2,39	2,22	2,33	1,90
$k_{p,moy,estimé}$ [g]	2,48	2,38	2,24	1,71
Erreur [%]	4%	7%	-4%	-10%

Tableau 150 : Ecart entre le maximum de l'excitation réelle et son estimation

6.2.6 Amortissement au moment de l'arrêt d'une action de saut

6.2.6.1 Cas du test E5 avec les S3 soit 12 personnes sur la structure

La Figure 218 présente l'accélération au centre du prototype à l'arrêt d'un saut à 2,5Hz de 12 personnes centrées (test E5). L'arrêt de l'action est assez net comme en témoigne l'évolution du facteur d'impact et permet ensuite d'estimer l'instant à partir duquel il est possible de calculer l'amortissement par la méthode du décrément logarithmique en se basant sur 1, 2, 4 et 6 pics glissants (indice m). On retient le calcul du décrément sur 4 pics successifs afin de tracer la tendance générale sans lisser l'évolution. On estime l'amortissement équivalent ξ_m au pic $n + \frac{m}{2}$ selon la formule suivante [6] :

$$\xi_m \left(n + \frac{m}{2} \right) = \frac{1}{2\pi m} \ln \left(\frac{a_n}{a_{n+m}} \right) \quad (132)$$

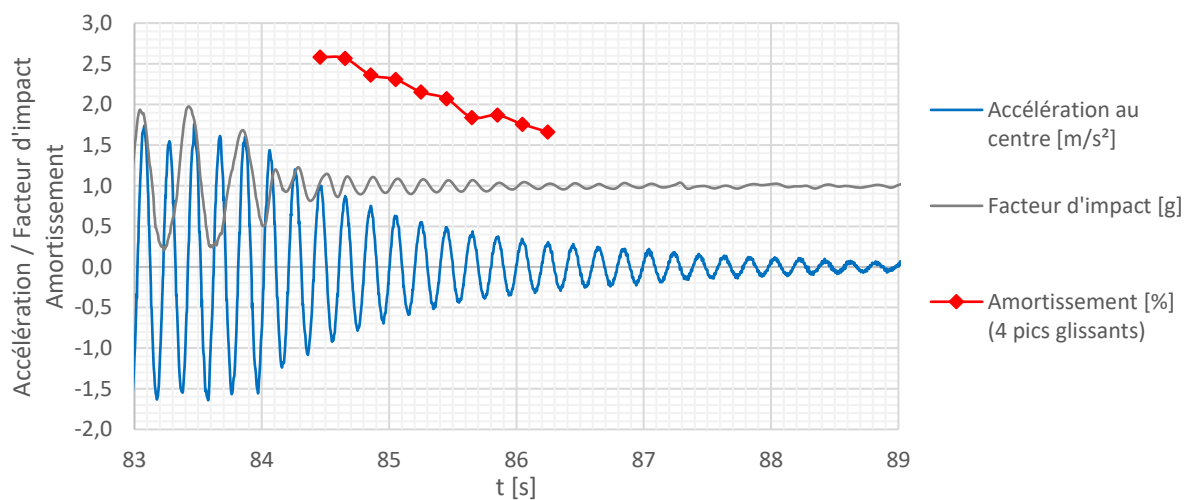


Figure 218 : Décroissance de l'accélération du prototype à l'arrêt du saut du test E5 à 2,5 Hz

$n+m/2$	t [s]	$a_{\max}(t)$ [m/s ²]	ξ_1 [%]	ξ_2 [%]	ξ_4 [%]	ξ_6 [%]
1	84,06	1,44	2,9%			
2	84,26	1,20	2,9%	2,9%		
3	84,46	1,00	2,1%	2,5%	2,58%	
4	84,65	0,87	2,4%	2,3%	2,57%	2,55%
5	84,85	0,75	2,8%	2,6%	2,36%	2,39%
6	85,05	0,63	2,1%	2,5%	2,31%	2,19%
7	85,25	0,55	1,9%	2,0%	2,15%	2,25%
8	85,45	0,49	1,8%	1,8%	2,07%	2,05%
9	85,65	0,44	2,5%	2,1%	1,84%	1,92%
10	85,85	0,37	1,2%	1,8%	1,87%	1,79%
11	86,05	0,35	2,0%	1,6%	1,76%	1,82%
12	86,25	0,31	1,3%	1,7%	1,66%	
13	86,45	0,28	2,1%	1,7%		
14	86,64	0,25	1,6%			
15	86,84	0,22				

Tableau 151 : Détermination de l'amortissement par la méthode du décrément logarithmique

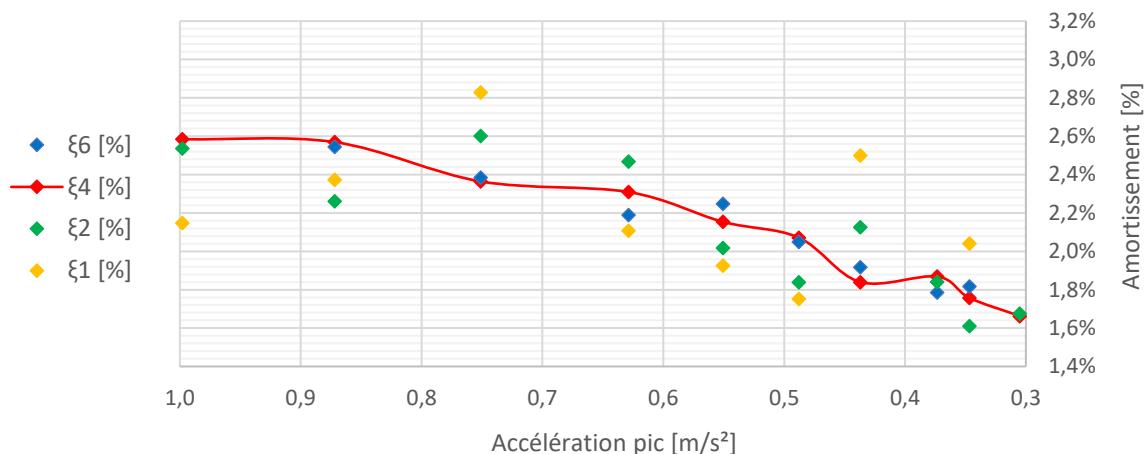


Figure 219 : Evolution de l'amortissement en fonction de l'accélération du prototype

La Figure 219 représente la diminution progressive de l'amortissement en fonction du temps. Les 12 personnes étant en contact avec la structure à l'arrêt du saut, on peut expliquer cette variation par un raidissement progressif de la posture des personnes jusqu'à une position statique parfaitement verticale se traduisant par une augmentation des fréquences propres des individus estimées à environ 5,5 Hz à 1 m/s² (pic n°3, Figure 220) et 6 Hz à 0,35 m/s² (pic n°11, Figure 221).

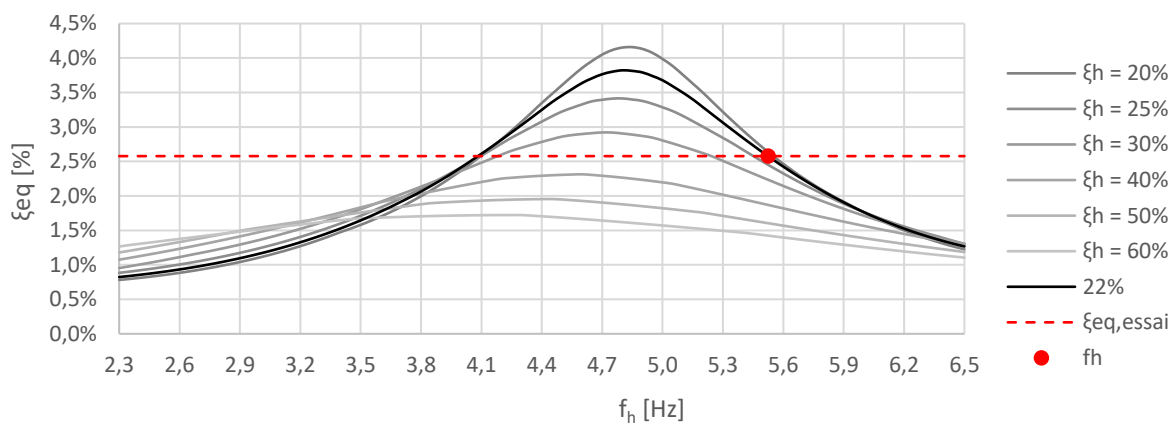


Figure 220 : Estimation de la fréquence propre équivalente des individus à 1 m/s²

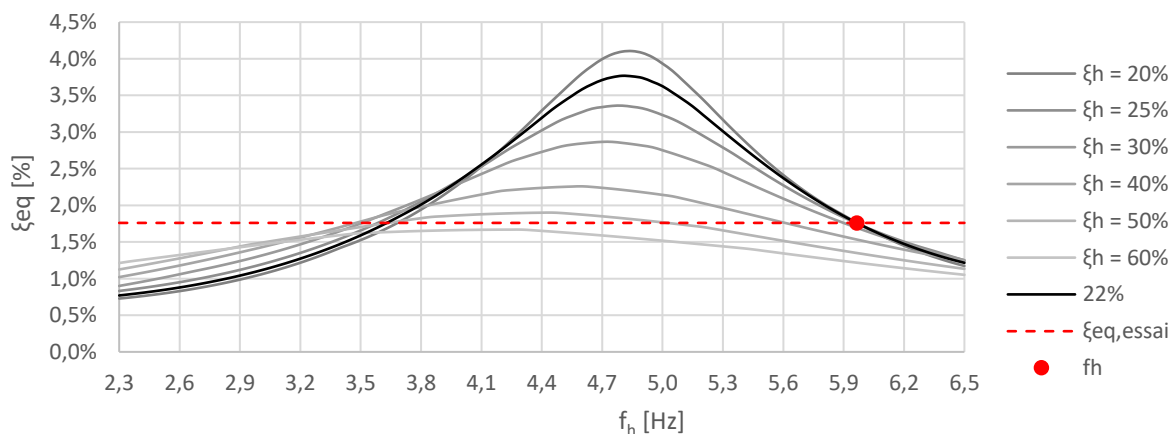


Figure 221 : Estimation de la fréquence propre équivalente des individus à 0,35 m/s²

6.2.6.2 Cas du test H5 avec les S2 soit 95 personnes sur la structure

La première expérience avec un nombre réduit d'individus ayant donné des ordres de grandeur concordants avec l'état de l'art, on procède à l'évaluation de l'amortissement équivalent pour un nombre plus conséquent de personnes au moment de l'arrêt du test de saut H5 à 2,6Hz. La difficulté est de bien localiser le moment de l'arrêt de l'excitation. En effet, la consigne étant donnée, il y a un temps de réaction variable suivant les individus. Ne connaissant pas le relevé exact de l'excitation de chacun, on se base sur la vidéo et le relevé d'action de 10 leaders (2 à 11) pour définir le moment de début de l'arrêt de l'excitation, le temps moyen pour s'arrêter et le moment auquel le dernier leader s'arrête. La Figure 222 montre l'évolution de l'amortissement en retenant un calcul de décrétement logarithmique sur 4 pics glissants.

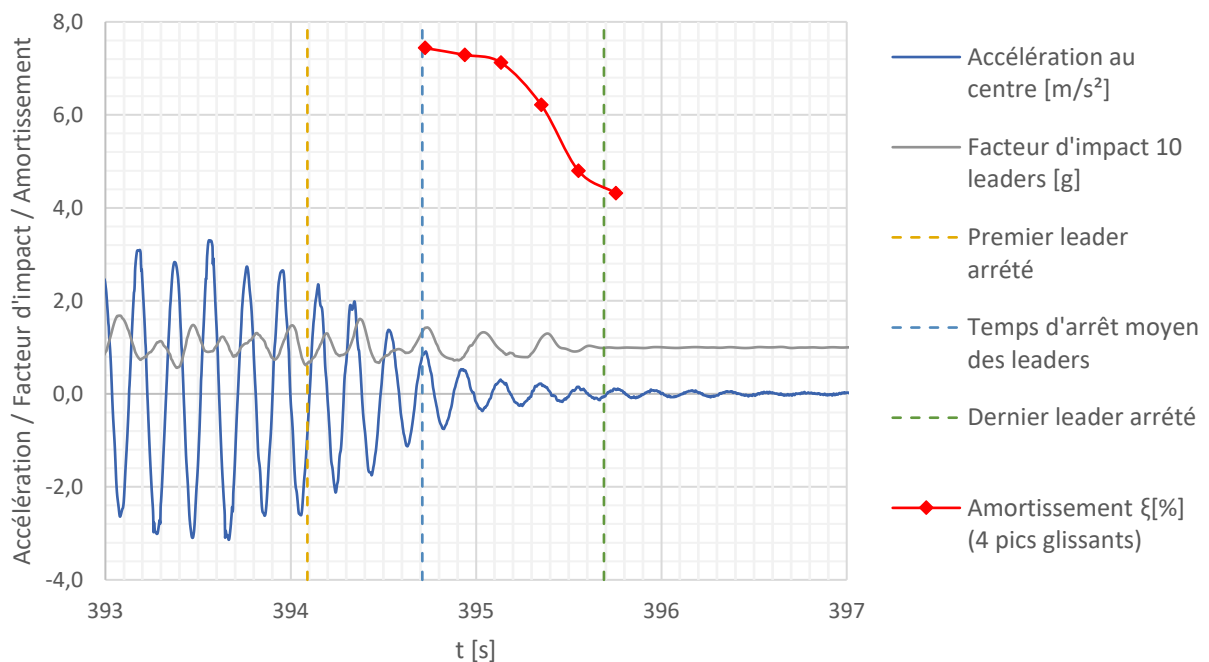


Figure 222 : Décroissance de l'accélération du prototype à l'arrêt du saut du test H5 à 2,6Hz

n	t [s]	$a_{\max}(t)$ [m/s ²]	ξ_1 [%]	ξ_2 [%]	ξ_4 [%]	ξ_6 [%]
1	394,33	1,99	5,9%			
2	394,53	1,38	6,6%	6,2%		
3	394,72	0,91	8,6%	7,6%	7,4%	
4	394,94	0,53	8,7%	8,7%	7,3%	6,8%
5	395,13	0,31	5,3%	7,0%	7,1%	6,7%
6	395,35	0,22	5,9%	5,6%	6,2%	6,1%
7	395,55	0,15	4,9%	5,4%	4,8%	5,2%
8	395,75	0,11	3,1%	4,0%	4,3%	
9	395,96	0,09	3,3%	3,2%		
10	396,17	0,07				

Tableau 152 : Détermination de l'amortissement par la méthode du décrétement logarithmique

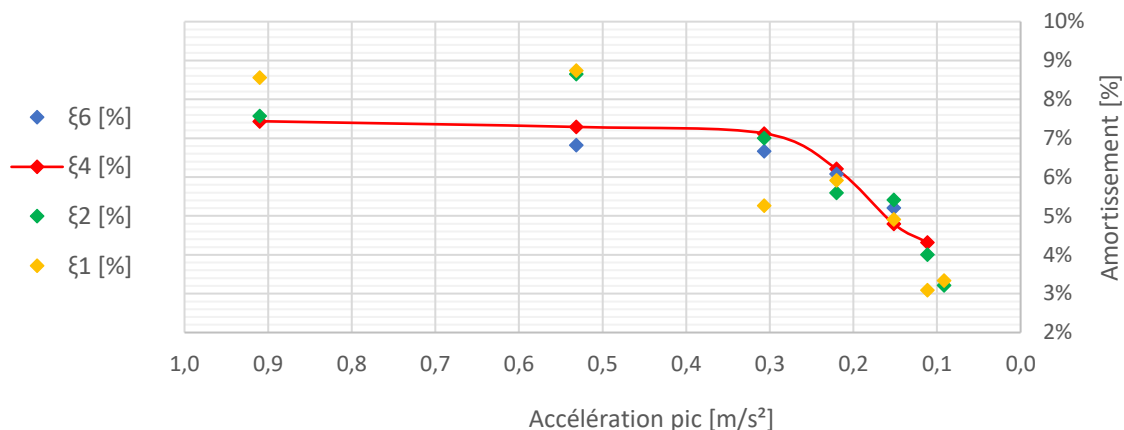


Figure 223 : Evolution de l'amortissement en fonction de l'accélération du prototype

Sur les Figure 222 et Figure 223, une évolution moins monotone de l'amortissement en fonction du temps est observée. On passe d'un plateau à 7% en plein arrêt de l'excitation à une valeur de l'ordre de 4% lors de l'arrêt complet. On observe donc bien une augmentation significative de l'amortissement équivalent avec le nombre d'individus par rapport au test précédent. L'amortissement structural est très faible en comparaison. On peut également postuler le même phénomène de raidissement à l'arrêt des participants. On passerait alors d'une fréquence individuelle de 5,11Hz au pic n°3 (Figure 224) à une fréquence de 5,85Hz au pic n°8 au moment de l'arrêt complet (Figure 225).

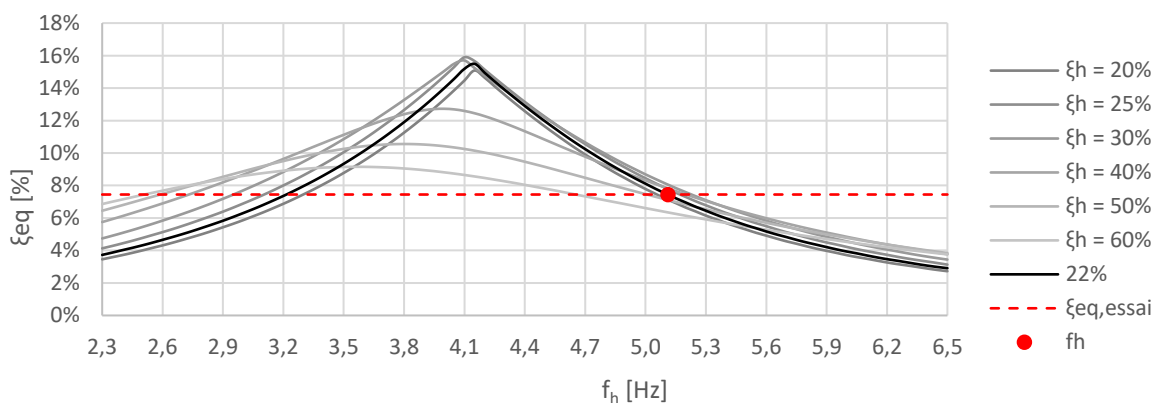


Figure 224 : Estimation de la fréquence propre équivalente des individus à $0,91 m/s^2$

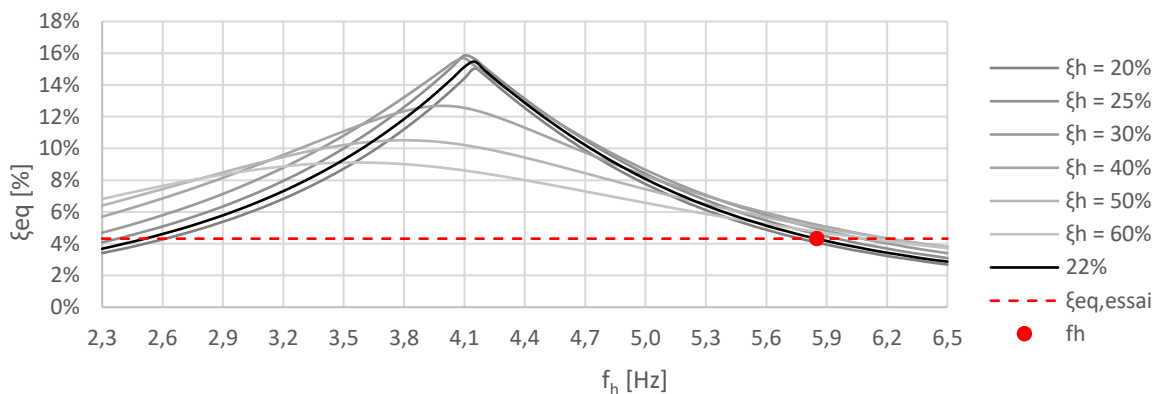


Figure 225 : Estimation de la fréquence propre équivalente des individus à $0,11 m/s^2$

6.2.7 Synthèse des amortissements selon le type d'activité

La modélisation par amortissement dynamique « désaccordé » donne des résultats satisfaisants par rapport aux mesures expérimentales. Le moyen d'en juger est de constater que les paramètres individuels en amortissement et fréquence propres déduits des essais correspondent aux intervalles proposés dans la littérature (Tableau 14).

On observe bien en pratique que les individus contribuent notablement à l'amortissement de l'ouvrage mixte, lui-même très peu amorti à vide. Pour des ouvrages susceptibles d'accueillir des foules en contact permanent avec l'ouvrage, il est très sécuritaire de ne pas prendre en considération cette contribution à la réduction des accélérations au moins pour des critères de confort et la vérification à la fatigue. On résume les observations et estimations dans le Tableau 153.

Activité	Structure		Individus actifs			Individus passifs			Ensemble		Détail
	a_{max}	ξ_s	N_{Actifs}	ξ_h	f_h	$N_{Passifs}$	ξ_h	f_h	d	ξ_{eq}	§
	[m/s ²]	[%]	[pers.]	[%]	[Hz]	[pers.]	[%]	[Hz]	[p/m ²]	[%]	
Excitateur avec personnes statiques	0,44	0,27	0			40	22	5,67	0,8	3,26	6.2.1.2.1
	1,15	0,34	0			18	22	6,15	0,4	1,99	6.2.1.2.2
Excitateur + Marche	0,68	0,28	40	25	3,44	0			0,8	2,34	6.2.2
Danse (estimation)	/	0,6	190	25	2,3 - 5	0			0,8	1,8	6.2.3.1
	/	0,6	714	25	2,3 - 5	0			3	3,6	6.2.3.2
Balancement	0,5	0,27	10	25	2,3	2	22	6	0,3	1,04	6.2.4
Saut	2,3	0,43	10	NA	NA	2	22	6	0,3	0,69	6.2.5
	0,54	0,27	10	NA	NA	2	22	6	0,3	0,53	
Arrêt du saut	1	0,32	0			12	22	5,52	0,3	2,58	6.2.6.1
	0,35	0,27	0			12	22	5,97	0,3	1,76	
	0,91	0,31	0			95	22	5,11	2,0	7,45	6.2.6.2
	0,11	0,27	0			95	22	5,85	2,0	4,32	

Tableau 153 : Tableau de synthèse des amortissements mesurés et estimés

Le saut ne permet pas d'envisager un amortissement significatif. C'est problématique car c'est l'action la plus forte. Dans le cas du dimensionnement d'une structure susceptible d'accueillir un concert, il s'agit donc de vérifier la résistance en négligeant l'amortissement apporté par les occupants. De plus, l'expérience montre que l'on n'observe pas de réaction de panique ou d'arrêt de l'action dans le cas d'un saut généralisé induisant de fortes accélérations car les individus ne les ressentent pas pendant l'activité.

Il est difficile de quantifier précisément l'amortissement apporté par le public car l'amortissement équivalent dépend beaucoup de la fréquence propre des individus qui est liée à leur posture et leur niveau d'activité. D'après les estimations réalisées (Tableau 154), une foule de 2 ou 3 pers/m² debout sur un ouvrage peut générer un amortissement pouvant évoluer entre 3% et 15% et ceci pour des variations de fréquence propre individuelle assez faibles ou du moins peu prévisibles. Cela peut conduire le projeteur à retenir la valeur basse de la tranche pour le dimensionnement. Mais il faut relativiser car un amortissement de 3% est déjà nettement supérieur au 0,3% d'amortissement structurels à vide.

Cette dernière observation peut être illustrée en représentant au Tableau 154 le minimum et le maximum de l'amortissement envisageable sur une plage de fréquence individuelle s'étendant de 2,3 Hz à 5 Hz ou 6,5 Hz suivant le niveau d'activité. Tous les autres paramètres dont l'amortissement individuel restent invariants par rapport au Tableau 153.

Activité	Mesuré (*estimé)		Plage de variation estimée			
	d [p/m ²]	ξ_{eq} [%]	Min		Max	
			f_h [Hz]	$\xi_{eq,min}$ [%]	f_h [Hz]	$\xi_{eq,max}$ [%]
Excitateur et 40 personnes statiques	0,8	3,26	2,3	1,1	4,8	6,6
Excitateur et 18 personnes statiques	0,4	1,99	2,3	1,0	4,8	5,3
Excitateur et marche de 40 personnes	0,8	2,34	2,3	1,1	4,8	5,0
Danse de 190 pers. et 714 pers.* (estimation sur plancher de référence)	0,8	1,8	2,3	1,8	3,8	4,9
	3,0	3,6	5,0	3,6	3,5	13,9
Balancement de 10 pers. + 2 pers. statiques	0,3	1,04	2,3	0,8	4,9	3,5
Saut de 10 pers. + 2 pers. statiques	0,3	0,69	2,3	0,5	5,0	1,0
	0,3	0,53	2,3	0,3	5,0	0,8
Arrêt du saut de 10 personnes	0,3	2,58	2,3	0,8	4,8	3,8
	0,3	1,76				
Arrêt du saut de 95 personnes	2,0	7,45	6,5	2,9	4,2	15,5
	2,0	4,32				

Tableau 154 : Variabilité de l'amortissement suivant l'activité

Aussi, s'il n'est pas possible de donner directement une valeur d'amortissement ou une plage resserrée, l'utilisation des abaques proposés dans ce chapitre permet de visualiser synthétiquement la variabilité de l'impact des hypothèses retenues selon les enjeux.

Chapitre 7

Dans ce dernier chapitre, on répond de manière synthétique aux problématiques de recherche identifiées au chapitre 3. Les principaux résultats d'essais traités aux chapitres 5 et 6 sont résumés.

7 Synthèse des résultats de la recherche

7.1 Amortissement intrinsèque d'un ouvrage en fonction de l'amplitude

7.1.1 Amortissement propre à l'ouvrage

Les essais sur la structure du prototype ont permis de mettre en évidence l'augmentation de l'amortissement avec l'amplitude de vibration (Figure 226). Cette augmentation est non linéaire et présente une augmentation plus marquée passé le seuil de première fissuration au niveau de la dalle béton. Les dalles exerçant une précontrainte de compression au niveau de la dalle, cela explique le retardement de l'augmentation de l'amortissement par rapport à la situation sans dalles. On observe que l'on peut tripler la valeur d'amortissement obtenue classiquement à faible amplitude mais que la valeur de l'ordre de 1% reste inférieure aux valeurs suggérées par la littérature [33].

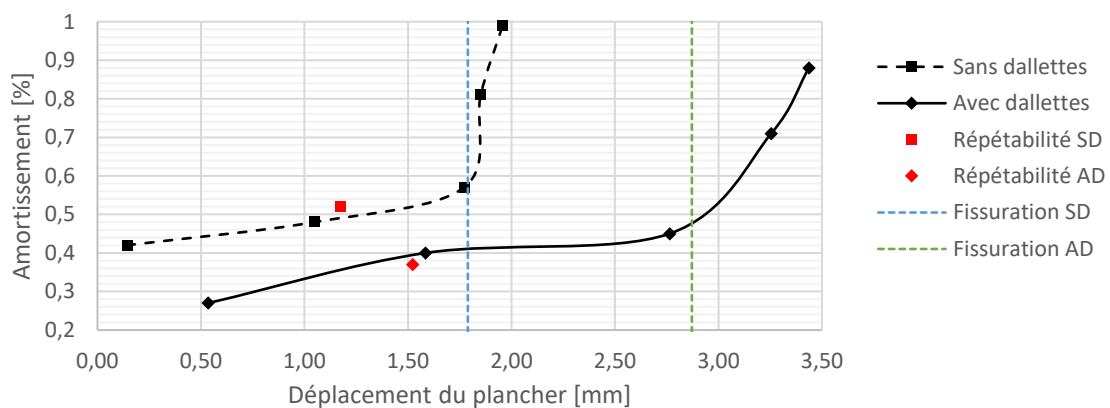


Figure 226 : Comparaison de l'évolution de l'amortissement en fonction du déplacement

7.1.2 Amortissement de l'ouvrage équipé d'amortisseurs

On constate une augmentation de la fréquence propre apparente du mode fondamental en connectant les amortisseurs en sous-face à mi-portée du prototype (Courbe bleue Figure 227). On interprète ce phénomène par le fait que l'amortisseur n'a pas un comportement parfaitement visqueux. Il est en effet en série avec un support qui n'est pas infiniment rigide.

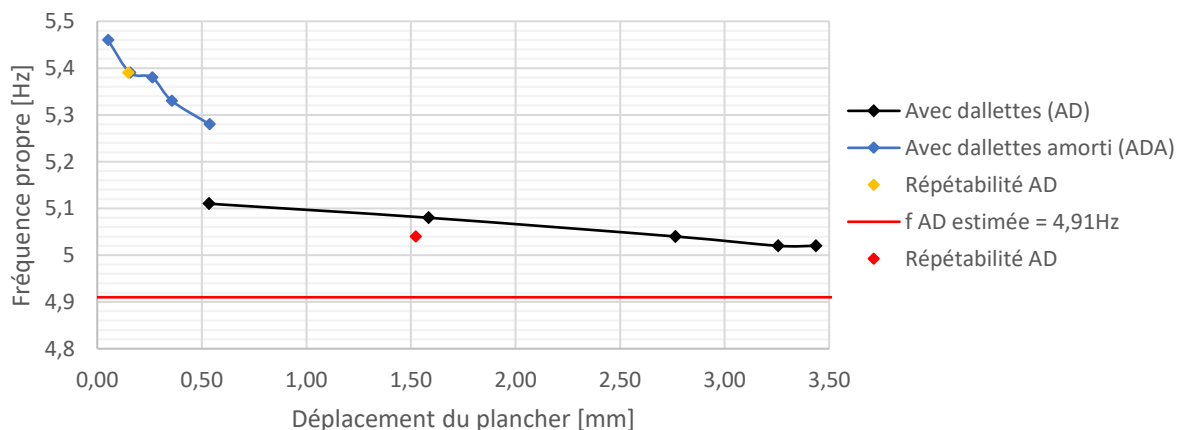


Figure 227 : Evolution de la fréquence avec dalles en fonction du déplacement

L'amortissement du prototype équipé d'amortisseurs visqueux a été caractérisé par des tests avec excitateur. Cela a permis d'identifier un seuil de mise en fonctionnement de l'ordre de 0,35 mm ainsi qu'un plafonnement non anticipé de l'amortissement par rapport à la valeur attendue sur la base des tests des amortisseurs en usine (Figure 228). Le support engendre certainement une baisse d'efficacité de l'amortisseur. L'amortissement est néanmoins considérablement augmenté avec une valeur d'amortissement de 6% avec dalles à faible amplitude contre 0,3% sans les amortisseurs.

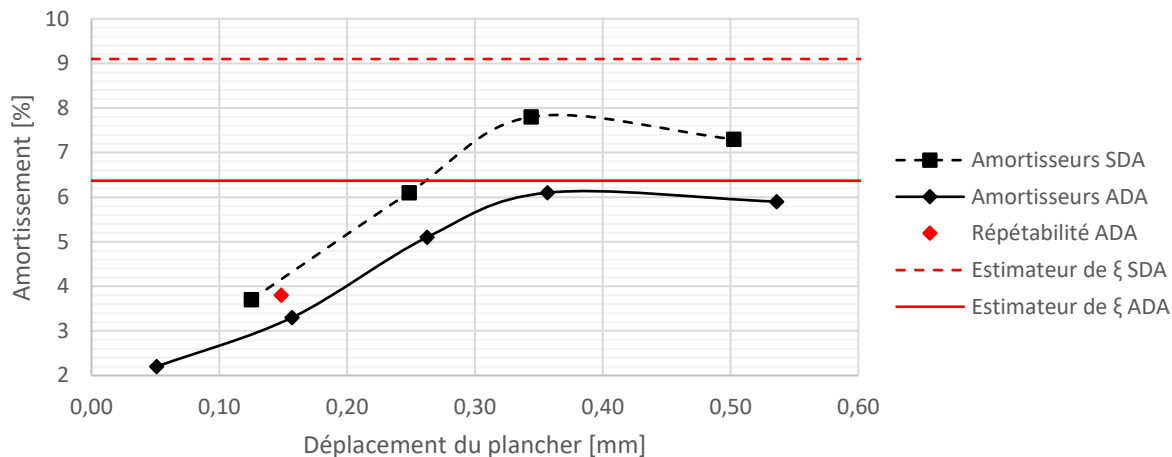


Figure 228 : Variation de l'amortissement avec et sans amortisseurs en fonction du déplacement

Les variations de température au niveau des amortisseurs étaient assez faibles y compris pendant les essais de foule. On n'a donc pas noté de perte d'efficacité pour cette raison mais cela mérite d'être investigué en détail dans des contextes réels avec des amplitudes de vibration importantes.

7.2 Sensibilité de la sollicitation de la foule en configuration concert

7.2.1 Influence de l'ambiance musicale

Le contexte dans un concert est centré sur la musique. Des distributions de tempo par décennies sur la base de 100 titres les plus écoutés ont été construites. On observe une relative stabilité de l'allure générale des distributions selon les décennies. On en déduit une distribution moyenne corrigée sur 60 ans qui permet de servir de référence à travers les époques et les modes (Tableau 155).

Tempo	Largo Larghetto Adagio			Andante						Moderato		Allegro						Presto					Prestissimo			
	60	66	72	78	84	90	96	102	108	114	120	126	132	138	144	150	156	162	168	174	180	186	192	198	204	210
[BPM]	60	66	72	78	84	90	96	102	108	114	120	126	132	138	144	150	156	162	168	174	180	186	192	198	204	210
[Hz]	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5
2010s	0	1	1	0	2	5	7	6	1	6	24	33	11	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2000s	0	0	1	3	2	3	8	9	6	11	17	13	12	6	2	2	1	1	0	2	0	0	1	0	0	0
90s	0	0	1	2	1	5	7	11	8	6	16	15	13	6	2	3	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0
80s	0	0	0	1	2	3	5	9	14	13	15	15	7	2	4	2	1	2	1	2	1	0	1	0	0	0
70s	0	0	2	3	1	1	5	9	9	12	19	13	10	5	1	5	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0
60s	0	0	3	7	5	9	6	7	5	12	10	11	6	5	3	5	3	1	0	1	0	0	1	0	0	0
Moy	0	0	1	3	2	4	6	9	7	10	17	17	10	4	2	3	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0
Corr.	0,1	0,2	1,3	2,7	2,2	4,3	6,2	8,3	7,1	10,0	16,7	16,7	9,8	4,2	2,2	2,8	1,3	1,0	0,5	1,3	0,2	0,1	0,5	0,1	0,1	0,1

Tableau 155 : Distributions par décennies, moyenne sur 60 ans et moyenne corrigée

La distribution de référence (Figure 229) permet d'identifier une densité importante de titres autour de 2 Hz (120 BPM : influence électro). On note un pic secondaire autour de 1,7 Hz (100 BPM : influence hip-hop / pop rock). On constate enfin que la probabilité d'avoir des titres au-delà de 3 Hz (180 BPM) est très faible (1%). De la même manière on trouve moins de 10% des titres en dessous de 1,5 Hz (90 BPM).

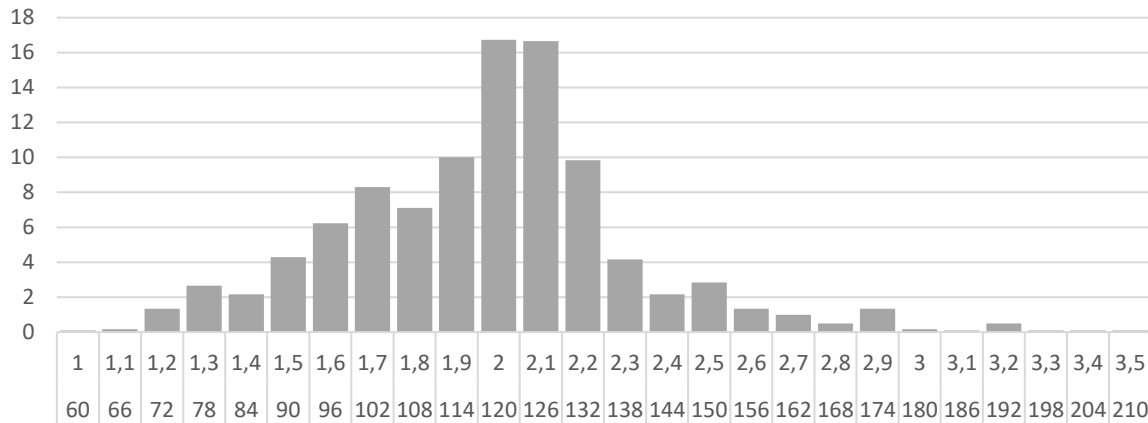


Figure 229 : Distribution fréquentielle [Hz - BPM] moyenne sur 60 ans corrigée

Si la distribution statistique de tempos est déjà d'une grande utilité pour caractériser la probabilité de sollicitation d'une structure à une fréquence donnée, il peut être nécessaire dans certains cas d'estimer l'intensité d'excitation à cette fréquence pour un titre donné. Les essais ont permis d'identifier un phénomène de réduction progressive de la sollicitation globale après chaque drop. De sorte que l'on peut estimer la durée de forte intensité de la sollicitation de la foule en cumulant les drops dont les effets notables durent de l'ordre de 10 à 20 s selon les cas (Figure 230).

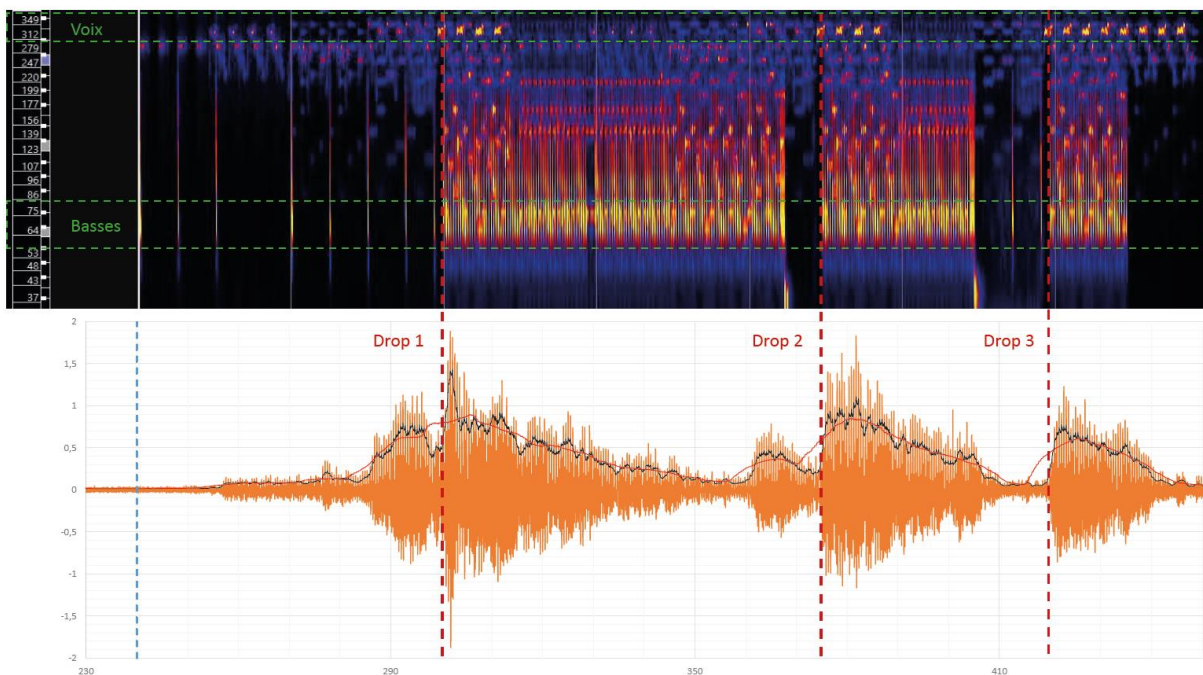


Figure 230 : Spectrogramme du signal sonore F2B en [Hz] et accélérogramme [m/s^2] à mi-portée

7.2.2 Influence de la réponse vibratoire du support sur l'action

On distingue une sensibilité à la vibration très variable selon l'activité de la personne interrogée.

Pour des personnes statiques soumises à une vibration du plancher, on retrouve le seuil usuel de fin de confort à $0,5 \text{ m/s}^2$ pic ainsi que le seuil de début d'inconfort de $1,5 \text{ m/s}^2$ pic. On remarque un possible effet d'accoutumance pouvant faire monter le seuil de fin de confort à 1 m/s^2 pic.

En configuration concert, on relève une absence d'influence de la vibration sur l'action des personnes pour une accélération strictement inférieure à $1,4 \text{ m/s}^2$ pic. On peut également considérer un seuil de fin de confort en concert à $1,4 \text{ m/s}^2$ pic.

L'hypothèse d'un seuil d'inconfort pouvant conduire à des départs vers 3 ou 4 m/s^2 pic est à vérifier avec des expérimentations plus ciblées. Si toutes les personnes sautent, il est possible que les personnes ne ressentent pas les très grandes accélérations qui seraient insupportables ou à minima très perturbantes pour des personnes statiques (Figure 231).

De manière générale, les gens qui se balancent ressentent moins l'accélération qu'en position statique et les personnes qui sautent ressentent moins l'accélération que quand elles se balancent.



Figure 231 : Pendant et après le saut à 16 personnes sans amortisseurs (CAR SA) $a_{pic} = 3,4 \text{ m/s}^2$

7.2.3 Coordination au saut en fonction du nombre de participants

Pour une foule de N individus de poids moyen G_{moy} sautant à une pulsation ω_p , on peut définir la force globale exercée $F_{tot}(t)$ en fonction des coefficients de Fourier individuels moyens α_h pondérés par un coefficient de coordination $C_h(N)$:

$$F_{tot}(t) = N G_{moy} \left(1 + \sum_{h=1}^H C_h(N) \alpha_h \sin(h\omega_p t + \varphi_h) \right) \quad (133)$$

Les essais ont permis de tracer les courbes en tendances moyennes et enveloppes des coefficients de Fourier pondérés $C_h(N)\alpha_h$ jusqu'à environ 100 individus sautant simultanément (Figure 232). Ces courbes sont comparées aux essais d'Ellis et Ji de 2002 [75] et à leurs extrapolations numériques de 2004 [11] pour plusieurs centaines de personnes. On en déduit que la littérature de référence, le BRE Digest 426 [8] basé sur ces études, est sécuritaire par rapport à nos essais.

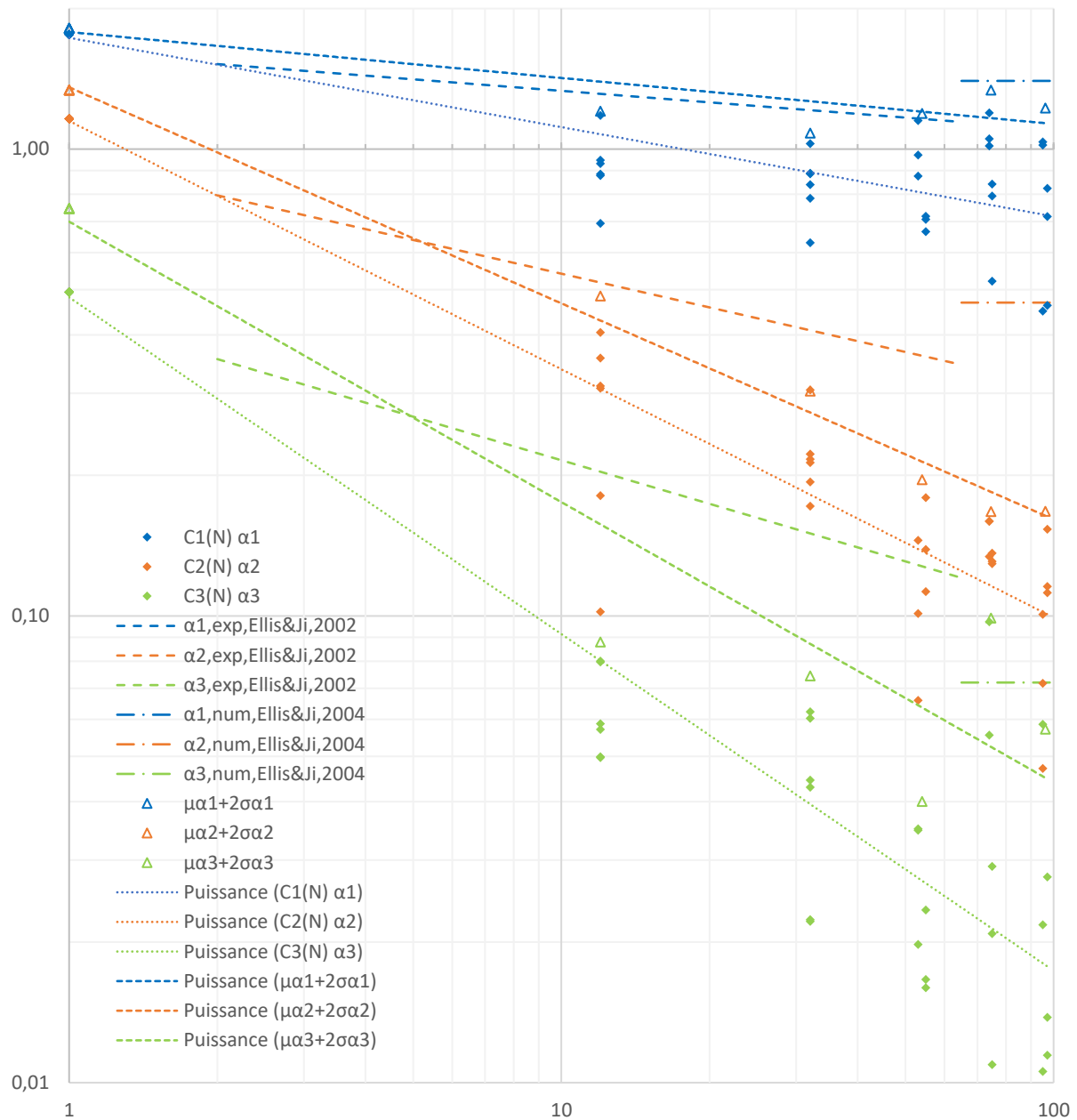


Figure 232 : Coefficients de Fourier de groupe $C_h(N)\alpha_n$

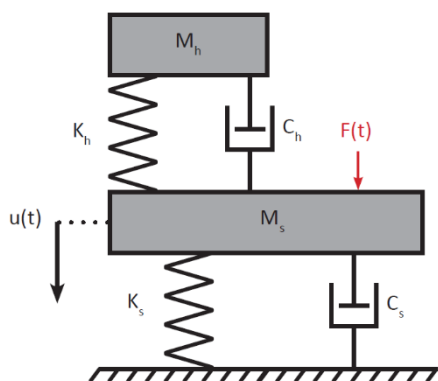
Tendance moyenne issue des essais :

$$\begin{aligned}
 C_{1,moy}(N)\alpha_{1,moy} &= 1,73 N^{-0,19} \quad (R^2 = 0,90) \\
 C_{2,moy}(N)\alpha_{2,moy} &= 1,15 N^{-0,53} \quad (R^2 = 0,99) \\
 C_{3,moy}(N)\alpha_{3,moy} &= 0,48 N^{-0,72} \quad (R^2 = 0,99)
 \end{aligned} \tag{134}$$

Enveloppe issue des essais (tendance de la moyenne des essais à N donné plus deux écarts types) :

$$\begin{aligned}
 C_{1,max}(N)\alpha_{1,95\%} &= 1,78 N^{-0,10} \quad (R^2 = 0,88) \\
 C_{2,max}(N)\alpha_{2,95\%} &= 1,36 N^{-0,46} \quad (R^2 = 0,99) \\
 C_{3,max}(N)\alpha_{3,95\%} &= 0,70 N^{-0,60} \quad (R^2 = 0,99)
 \end{aligned} \tag{135}$$

7.3 Evaluation de la contribution des personnes à l'amortissement



On a proposé une modélisation simplifiée sous la forme d'un modèle à deux degrés de liberté dont on connaît la solution analytique. La foule est envisagée comme un Amortisseur Dynamique Mal Accordé (ADMA). L'excitation a été découplée par simplification. Tenant compte de la variabilité de la fréquence propre f_h et de l'amortissement individuel ξ_h des personnes, une identification de l'amortissement global équivalent par abaque a été développée (Figure 233). On y a indiqué l'amortissement global mesuré pour différentes activités avec un nombre variable d'individus (Tableau 156).

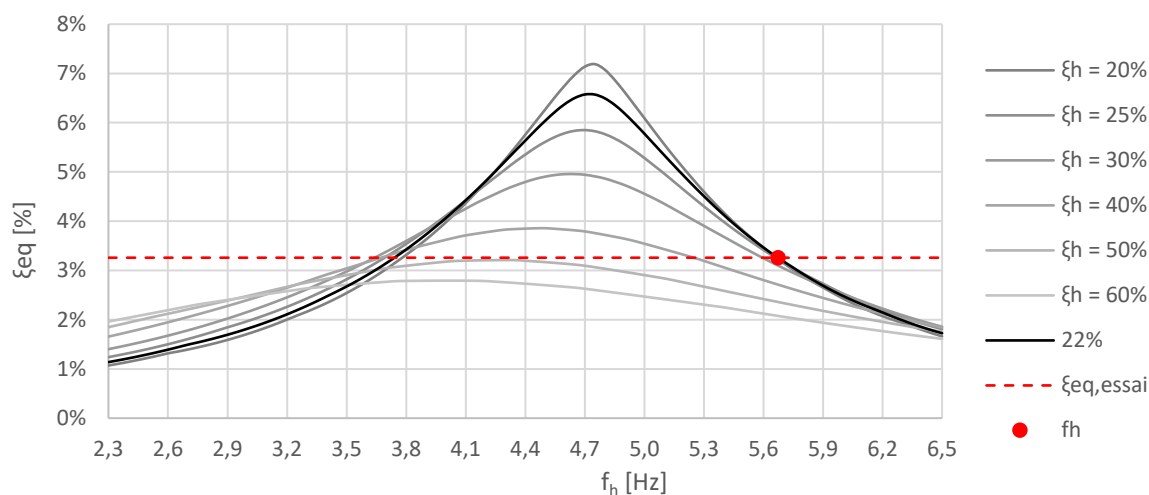


Figure 233 : Abaque des paramètres individuels pour les essais avec 40 personnes statiques

Activité	Mesuré (*estimé)		Plage de variation estimée			
	d [p/m ²]	ξ_{eq} [%]	Min		Max	
			f_h [Hz]	$\xi_{eq,min}$ [%]	f_h [Hz]	$\xi_{eq,max}$ [%]
Excitateur et 40 personnes statiques	0,8	3,26	2,3	1,1	4,8	6,6
Excitateur et 18 personnes statiques	0,4	1,99	2,3	1,0	4,8	5,3
Excitateur et marche de 40 personnes	0,8	2,34	2,3	1,1	4,8	5,0
Danse de 190 pers. et 714 pers.* (estimation sur plancher de référence)	0,8	1,8	2,3	1,8	3,8	4,9
	3,0	3,6	5,0	3,6	3,5	13,9
Balancement de 10 pers. + 2 pers. statiques	0,3	1,04	2,3	0,8	4,9	3,5
Saut de 10 pers. + 2 pers. statiques	0,3	0,69	2,3	0,5	5,0	1,0
	0,3	0,53	2,3	0,3	5,0	0,8
Arrêt du saut de 10 personnes	0,3	2,58	2,3	0,8	4,8	3,8
	0,3	1,76				
Arrêt du saut de 95 personnes	2,0	7,45	6,5	2,9	4,2	15,5
	2,0	4,32				

Tableau 156 : Variabilité de l'amortissement suivant l'activité

Conclusion

L'état de l'art du chapitre 2 montre une assez grande hétérogénéité du niveau de maturité des approches développées dans les normes et guides associés. Les données expérimentales portant sur la coordination des personnes sont de plus limitées à un nombre de personnes relativement réduit (maximum 64 personnes). On note donc actuellement un travail de recherche sur plusieurs plans :

- Le développement de modèles de calcul dynamique de plus en plus complexes permettant de simuler l'action d'une foule tenant compte des divers comportements individuels possibles.
- L'enrichissement des données expérimentales sur l'action individuelle des personnes ainsi que leur modélisation en tant que système biomécanique participant à la vibration du support.
- Le développement des données sur l'action globale des individus, en particulier sur leur coordination.

Sur la base de la littérature, l'exemple du chapitre 3 a permis de mettre en exergue que l'excitation à la seconde harmonique peut engendrer des efforts dynamiques non négligeables pour des planchers basses fréquences, c'est-à-dire notamment entre 4 Hz et 6 Hz. Rien que l'impact au saut pour un groupe dense de personnes peut dépasser la capacité statique locale d'un plâtrage dimensionné classiquement à 5 kN/m². Aussi, lorsque l'on additionne un effet de mise en résonance, les efforts induits au global dans la structure peuvent devenir très importants. Cela peut dépasser largement la capacité statique du plancher selon les cas. Des incidents ayant eu lieu ces 20 dernières années dans différents endroits du monde démontrent la véracité de cet enjeu. Cependant, ils sont rares, dispersés et probablement parfois mal interprétés, ce qui rend la prise de conscience lente et difficile parmi les ingénieurs en charge du dimensionnement et a fortiori les architectes ou les maîtres d'ouvrage. Sans évoquer les enjeux de confort et si la résistance instantanée peut suffire dans certains cas, il faut demeurer vigilant pour ce qui regarde les problématiques de fatigue. Toute la difficulté repose sur la détermination au plus juste des cycles d'étendues de contraintes à supporter dans la vie de l'ouvrage. La sensibilité de l'endommagement aux paramètres que sont notamment la durée des actions, la densité de la foule, l'amortissement de la structure et le niveau d'inspection a été exposée. Par ailleurs, la correction dynamique de telles structures peut s'avérer complexe a posteriori pour des solutions courantes à amortisseurs dynamiques accordés étant donné la variabilité des caractéristiques modales de l'ouvrage avec les configurations multiples de la foule. Des solutions alternatives par amortisseurs visqueux fixes ou amovibles peuvent être d'un certain intérêt pratique pour éviter de surdimensionner les ouvrages en recherchant une fréquence propre plus élevée afin de s'éloigner de la résonance.

Les observations du chapitre 3 étant basées sur les données disponibles de l'excitation de la foule du chapitre 2, un protocole expérimental a été proposé au chapitre 4 afin de vérifier la validité des observations déduites de l'exemple d'application théorique. Le prototype de plancher, dérivé de l'exemple de référence, présente une configuration statique simple permettant de dissocier les observations particulières au projet et les observations génériques. Le chapitre 5 décrit la caractérisation modale expérimentale du prototype à vide. En effet, une des premières interrogations basées sur l'examen de l'état de l'art portait sur l'évolution de l'amortissement structurel avec l'amplitude de vibration. Dans les conditions spécifiques d'un plancher mixte avec peu d'assemblages, qui plus est précontraints, on observe une augmentation de l'amortissement avec l'amplitude et d'autant plus à partir du moment où l'on provoque de la fissuration dans le béton. Mais cette augmentation est plus faible qu'attendu. L'influence de la présence d'amortisseurs visqueux à très

faible friction disposés à mi-portée a donc également été testée. Une augmentation apparente de la fréquence fondamentale de l'ouvrage et une très légère perte d'efficacité de l'amortissement ont été constatées. La valeur d'amortissement atteinte est néanmoins bien supérieure à la valeur structurelle intrinsèque. Une fois identifiées les caractéristiques modales de la structure équipée ou non d'amortisseurs, il a été possible de passer à la campagne d'étude en présence d'une foule. Du point de vue de l'acquisition de l'action, on a pu observer la plus grande efficacité de l'acquisition par accéléromètres portatifs par rapport aux plaques de force malgré le caractère indirect de la mesure.

Le chapitre 6 permet au final d'étudier les paramètres expérimentaux caractérisant l'action de la foule et son interaction avec le plancher support. Dans un premier temps, la distribution musicale définissant la plage d'excitabilité par la foule sur les six dernières décennies a été développée. A partir de ces données, on peut considérer qu'une fréquence propre minimale de 5 Hz selon les règles françaises pour un plancher de concert n'est pas suffisante pour éviter la résonance. En effet, des tempos peuvent inciter les individus à développer une excitation de type saut jusqu'à 3 Hz, voire dans des cas extrêmes jusqu'à 3,5 Hz. Aussi, il paraît plus approprié d'envisager un critère minimum de 6 Hz assorti d'une vérification dynamique complémentaire. Pour éviter des calculs dynamiques, une fréquence propre minimale de 8,4 Hz comme proposé par les anglosaxons semble appropriée pour échapper à une mise en résonance par la seconde harmonique et également à la troisième harmonique pour des excitations courantes jusqu'à 2,8 Hz. Cependant cette mesure simple peut impliquer une consommation de matière bien plus importante et des études multi-critères pourraient être menées à l'avenir pour déterminer la meilleure stratégie confort / sécurité / économie de matière [77]. Il a également été noté l'influence de la structure de la composition musicale sur le niveau d'action induit, notamment l'impact important des drops en musique électronique sur la synchronisation et l'intensité.

Du point de vue de l'influence de la vibration sur l'action, les seuils de confort usuellement considérés pour des personnes statiques sur les ouvrages sont bien inférieurs aux seuils de confort en mode concert pour une foule très active étant donné la moindre sensibilité avec le mouvement, voire la perte de contact permanent avec l'ouvrage dans le cas du saut. Il a été relevé dans la littérature que des accélérations supérieures à 3 m/s^2 peuvent induire des départs de la dalle dans des configurations événementielles. Or ce n'est pas ce qui a été observé lorsque la foule est active. Il s'agit donc encore de savoir pour quels niveaux de vibration on peut s'attendre de manière fréquente à des mouvements de panique ou a minima une perturbation sensible de l'action de la foule à très haut niveau de vibration.

La coordination des participants est un sujet fondamental qui a été évalué en comparaison de l'état de l'art regroupant à la fois des données expérimentales et des extrapolations numériques. Il a été constaté pour la présente expérimentation que la coordination d'un nombre important de personnes (> 400 individus) pour la seconde harmonique est probablement surévaluée dans la littérature. Les lois de dégressivité expérimentales en puissance ont été tracées pour les trois premiers coefficients de Fourier en fonction du nombre de participants jusqu'à environ 100 personnes. Néanmoins, si les coefficients de Fourier sont a priori moins forts qu'attendu, le risque de résonance à la seconde harmonique reste un sujet potentiel pour le dimensionnement des ouvrages.

Enfin, l'évaluation d'un modèle relativement simple pour caractériser l'apport des personnes à l'amortissement d'un ouvrage a été proposée. Le principe est de considérer les individus comme un ensemble d'amortisseurs dynamiques mal accordés. La confrontation à la campagne de mesures expérimentales avec du public sous excitation mécanique ou humaine, montre la pertinence du modèle simplifié. Tout ceci à condition d'affiner et de confirmer à l'avenir les paramètres d'entrée expérimentaux biomécaniques que sont l'amortissement propre des personnes et leur fréquence propre selon leurs postures et leur niveau d'activité.

Perspectives

La présente étude s'est constituée par rapport au cadre normatif international actuel du point de vue d'un concepteur de structures. Elle établit des comparaisons sur la base de mesures expérimentales dans un contexte le plus générique possible. Néanmoins, on a pu constater que les données sur les actions étaient très dépendantes du contexte (lumière, période de la journée, état d'esprit des participants...). Il paraît utile d'aller vérifier les présentes observations dans un contexte réel sans pour autant être trop intrusif. C'est pourquoi les mesures réalisées avec des accéléromètres de petites dimensions sont prometteuses. Il s'agit notamment d'étoffer et diversifier les données sur la coordination. On pourrait distinguer les typologies événementielles par genres (festival, discothèque, concert d'une personnalité particulière en intérieur, etc.) et type de population. L'objectif est de disposer de suffisamment de données sur les différents modes d'action pour à la fois généraliser et distinguer les typologies d'excitation. Cela permettrait par la suite de pouvoir adapter les hypothèses de manière adéquate dans le cadre du dimensionnement d'un projet particulier.

Cette thèse expérimentale fournit également un vaste ensemble de données qui servira de socle à des études numériques plus sophistiquées, notamment des analyses par transformée en ondelettes [78] [79]. Celles-ci permettront d'analyser plus finement certains paramètres et d'étudier plus précisément l'influence de phénomènes comme la modulation d'amplitude et de fréquence des signaux. L'objectif est d'améliorer la base de données utilisée pour générer des charges de saut artificielles simulant l'action stochastique d'une foule [80] [81]. Elle permettra également de consolider la stratégie du spectre de réponse en accélération destinée aux concepteurs [82] [83] [84].

En finalité, ce travail de recherche doit aboutir à un développement des normes et en particulier les normes françaises dans la lignée de ce que les anglo-saxons ont commencé à esquisser depuis le début des années 2000. Les phénomènes dynamiques événementiels sont des sujets suffisamment singuliers et récurrents pour que les ingénieurs structure puissent aujourd'hui disposer de méthodologies d'application portées soit directement par des normes, soit par des guides. Ceci dans l'objectif d'éviter au pire une sous-estimation des actions engendrant la ruine à plus ou moins long terme ou au mieux une sur-consommation de matière par une prudence excessive sur la rigidité des structures ou même sur les actions. Parfois, une décision sage peut consister à admettre l'inadéquation d'un programme événementiel permanent avec une structure existante. Dans certains cas, il est toutefois envisageable d'adopter des mesures de correction dynamique spécifiques au concert qui permettent d'adapter les ouvrages à l'usage. C'est probablement un champ de recherche technico-économique pertinent dans le cadre de la multiplication des restructurations de bâtiments et de l'évolutivité des usages.



Figure 234 : Fin des essais de foule

Bibliographie

- [1] A.-M. Fèvre, «La discothèque, architecture des flux,» 01 03 2017. [En ligne]. Available: <https://delibere.fr/discotheque-architecture-des-flux/>. [Accès le 31 10 2021].
- [2] H. Bachmann et W. Amman, *Vibrations in structures induced by man and machines*, International Association for Bridge and Structural Engineering, 1987.
- [3] Universcience, *Exposition Foules*, Paris, Cité des sciences et de l'industrie, 2022-2023.
- [4] M. McDonald et S. Zivanovic, «Measuring Ground Reaction Force and Quantifying Variability in Jumping and Bobbing Actions,» *Journal of Structural Engineering*, vol. 143, February 2017.
- [5] V. Racic, J. Chen et A. Pavic, «Advanced Fourier-Based Model of Bouncing Loads,» chez *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 2019.
- [6] H. Bachmann, *Vibration problems in structure / Practical Guidelines*, Birkhäuser, 1997.
- [7] ISO 10137 : Bases for design of structures - serviceability of buildings and walkways against vibrations, ISO, 2007.
- [8] Digest 426 : The response of structures to dynamic crowd loads, BRE, 2004.
- [9] Canadian Commission on Building and Fire Codes, «Commentary D : Deflection and Vibration Criteria for Serviceability and Fatigue Limit States,» chez *User's Guide - NBC 2005 Structural Commentaries (Part 4 of Division B)*, Ottawa, National Research Council of Canada, 2006, pp. 25-34.
- [10] V. Racic, A. Pavic et J. Brownjohn, «Experimental identification and analytical modelling of human walking forces: Literature review,» *Journal of Sound and Vibration*, pp. 1-49, 2009.
- [11] B. Ellis et T. Ji, «Loads generated by jumping crowds: numerical modelling,» *The Structural Engineer*, pp. 35-40, 7 Septembre 2004.
- [12] Ministère de l'intérieur , *Arrêté du 5 février 2007 portant approbation de diverses dispositions complétant et modifiant le règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public*, Journal officiel de la république française, 2007.
- [13] SCI P354 : Design of floors for vibration, a new approach, revised edition, SCI , 2009.
- [14] V. Racic et A. Pavic, «Stochastic approach to modelling of near-periodic jumping loads,» *Mechanical Systems and Signal Processing* 24, pp. 3037-3059, 2010.
- [15] Digest 426 : The response of structures to dynamic crowd loads, BRE, 1997.
- [16] J. D. Littler, «Frequencies of synchronised human loading from jumping and stamping,» *The structural engineer*, pp. 27-35, 18 Novembre 2003.
- [17] A. Pavic et P. Reynolds, «Experimental verification of novel 3DOF model for grandstand crowd-structure dynamic interaction,» 2008.
- [18] BS 6399 : Part 1; Loading for Buildings, Annexe A, BSI, 1996.
- [19] UK National Annex to Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-1: General actions, BSI, 2005.

-
- [20] HIVOSS, Contrôle vibratoire des planchers, Document de référence, Research Fund for Coal and Steel, 2008.
- [21] D. Ginty, J. Derwent et T. Ji, «The frequency ranges of dance-type loads,» *The Structural Engineer*, pp. 27-31, 20 Mars 2001.
- [22] M. Kahan, Cours de dynamique avancée, Ecole des Ponts ParisTech, 2012-2013.
- [23] V. Denoël, Analyse dynamique des structures du génie civil, ULG, 2010.
- [24] J. Xiong, J. Chen et C. Caprani, «Spectral analysis of human-structure interaction during crowd jumping,» *Applied Mathematical Modelling* 89, pp. 610-626, 2021.
- [25] C. Gaspar, E. Caetano, C. Moutinho et J. Silva, «Active human-structure interaction during jumping on floors,» *Structural Control and Health Monitoring*, 2019.
- [26] B. Czwikla et M. Kasperski, «Damping Induced by bobbing or jumping persons,» chez *X International Conference on Structural Dynamics, EUROLYN 2017*, 2017.
- [27] Dynamic performance requirements for permanent grandstands subject to crowd action: Recommendations for management, design and assessment, The Institution of Structural Engineers, 2008.
- [28] J. Parkhouse et D. Ewins, «Crowd-induced rhythmic loading,» *Structures & Buildings*, pp. 247-259, 2006.
- [29] R. Hashim, T. Ji, P. Mandal, Q. Zhang et D. Zhou, «Human-structure interaction experiments to determine the dynamic properties of the standing human body in vertical vibration,» *Structures*, pp. 934-946, 08 2020.
- [30] Y. Matsumoto et M. Griffin, «Mathematical models for the apparent masses of standing subjects exposed to vertical whole-body vibration.,» *Journal of Sound and Vibration*, 2003.
- [31] C. Jones, P. Reynolds et A. Pavic, «Vibration serviceability of stadia structures subjected to dynamic crowd loads: A literature review,» *Journal of Sound and Vibration*, pp. 1531-1566, 2010.
- [32] T. De Saint Pol, «Corps et appartenance sociale : la corpulence en Europe,» 2006. [En ligne]. Available: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1371911?sommaire=1372045>. [Accès le 04 08 2023].
- [33] SETRA et AFGC, Passerelles piétonnes - Evaluation du comportement vibratoire sous l'action des piétons, 2006.
- [34] N. M. Abraham, G. Williams et S. Zivanovic, «Impact of vertical vibrations on human rhythmic jumping,» *Structures*, 2023.
- [35] American Institute of Steel Construction, *Steel Design Guide Series 11. Floor Vibrations Due to Human Activity*, Chicago: AISC/CISC, 1997.
- [36] Applied Technology Council, *ATC Design Guide 1. Minimizing Floor Vibration*, Redwood City: ATC, 1999.
- [37] HIVOSS, Vibrations des passerelles piétonnes, Guide de dimensionnement, Research Fund for Coal and Steel, 2008.
- [38] CTICM, NCCI : Vibrations SN036, access steel.
- [39] AFNOR, *NF EN 1991-1-1 : Eurocode 1 - Actions sur les structures - Partie 1-1*, 2003.
- [40] AFNOR, *NF P06-111-2 : Eurocode 1 - Actions sur les structures - Annexe Nationale à la NF EN 1991-1-1*, 2004.

-
- [41] AFNOR, *NF EN 1993-1-1/NA: Eurocode 3 - Calcul des structures en acier - Partie 1-1: Règles générales et règles pour les bâtiments - Annexe nationale*, 2013.
- [42] P. Reynolds et A. Pavic, «Vibration Performance of a Large Cantilever Grandstand during an International Football Match,» *ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 10, pp. 202-212, 2006.
- [43] Ouest France, «Etats-Unis: Le plancher s'effondre lors d'une soirée, 30 étudiants blessés,» 22 octobre 2018. [En ligne]. Available: <https://www.ouest-france.fr/monde/etats-unis/video-le-plancher-s-effondre-lors-d-une-soiree-etudiante-30-americains-blesses-6031453>.
- [44] Le Parisien, «Déjà 30 morts dans la salle des fêtes à Jérusalem,» 26 mai 2001. [En ligne]. Available: <https://www.leparisien.fr/faits-divers/deja-30-morts-dans-la-salle-des-fetes-a-jerusalem-26-05-2001-2002193147.php>.
- [45] Ici, «En Espagne, le sol d'une discothèque s'effondre, deux Français blessés,» 26 novembre 2017. [En ligne]. Available: <https://www.lci.fr/international/video-en-espagne-le-sol-d-une-discotheque-s-effondre-deux-francais-blesses-2071611.html>.
- [46] L'équipe, «Le stade de Nîmègue (Pays-Bas) reste fermé après l'effondrement d'une tribune,» 19 Octobre 2021. [En ligne]. Available: <https://www.lequipe.fr/Football/Actualites/Le-stade-de-nimegue-pays-bas-reste-ferme-apres-l-effondrement-d-une-tribune/1293139>.
- [47] «More than 40 injured after floor collapses at church concert in B.C.,» 26 04 2008. [En ligne]. Available: <https://www.cbc.ca/news/canada/british-columbia/more-than-40-injured-after-floor-collapses-at-church-concert-in-b-c-1.694374>. [Accès le 21 08 2023].
- [48] S. Sachdeva, «Jumping collapses venue floor,» 14 07 2012. [En ligne]. Available: <http://www.stuff.co.nz/national/7279448/Jumping-collapses-venue-floor>. [Accès le 21 08 2023].
- [49] «Video: Dance floor collapses during concert in Lake of the Ozarks,» ST. Louis Post-Dispatch, 18 08 2015. [En ligne]. Available: https://www.stltoday.com/news/video-dance-floor-collapses-during-concert-in-lake-of-the-ozarks/youtube_22cb8a59-3349-57b3-bb6f-71085b4a6e5c.html. [Accès le 21 08 2023].
- [50] M. Kitson, «More than 300 injured in Vigo after floor gives way during free concert,» 13 08 2018. [En ligne]. Available: https://english.elpais.com/elpais/2018/08/13/inenglish/1534151417_658263.html. [Accès le 21 08 2023].
- [51] «Floor suddenly sinks while hundreds dance at popular Sanford bar,» clickorlando.com, 29 10 2018. [En ligne]. Available: <https://www.clickorlando.com/news/2018/10/29/floor-suddenly-sinks-while-hundreds-dance-at-popular-sanford-bar/>. [Accès le 2023 08 21].
- [52] T. Lo et N. Penza, «Dance floor collapses at concert trapping more than 30 people underneath,» Mirror, 4 09 2019. [En ligne]. Available: <https://www.mirror.co.uk/news/world-news/dance-floor-collapses-concert-trapping-19428166>. [Accès le 21 08 2023].
- [53] M. Sun, «'It felt very bouncy': Enmore theatre floor caves in during Genesis Owusu concert,» 3 04 2022. [En ligne]. Available: <https://www.theguardian.com/music/2022/mar/04/it-felt-very-bouncy-enmore-theatre-floor-caves-in-during-genesis-owusu-concert>. [Accès le 21 08 2023].
- [54] V. Williams et K. Clarke, «Saint Andrew's Hall closed after video shows floor bending during concert,» 10 03 2022. [En ligne]. Available: <https://www.clickondetroit.com/news/local/2022/03/11/saint-andrews-hall-closed-after-video-shows-floor-bending-during-concert/>. [Accès le 21 08 2023].
- [55] HuffPost, «A la maison de la radio, le sol d'effondre en plein concert,» 22 01 2023. [En ligne]. Available: https://www.huffingtonpost.fr/faits-divers/article/a-la-maison-de-la-radio-le-sol-s-effondre-en-plein-concert_213082.html. [Accès le 21 08 2023].

- [56] Konbini, «La directrice du parc du Colisée ne veut plus de concert au Circus Maximus après le passage de Travis Scott,» 10 08 2023. [En ligne]. Available: <https://www.konbini.com/popculture/la-directrice-du-parc-du-colisee-ne-veut-plus-de-concert-au-circus-maximus-apres-le-passage-de-travis-scott/>. [Accès le 21 08 2023].
- [57] AFNOR, *NF EN 1994-1-1: Eurocode 4 - Calcul des structures mixtes acier-béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments (indice de classement P22-411-1)*, 2005.
- [58] AFNOR, *NF EN 1993-1-9: Eurocode 3, Calcul des structures en acier, Partie 1-9 : Fatigue*, 2005.
- [59] AFNOR, *NF EN 1990 : Eurocodes structuraux - Bases de calcul des structures (Indice de classement : P06-100-1)*, 2003.
- [60] P. Dufлот et D. Taylor, «Fluid viscous dampers: an effective way to suppress pedestrian-induced motions in footbridges,» chez *third international conference footbridge 2008*, 2008.
- [61] C. A. Jones, A. Pavic, P. Reynolds et R. E. Harrison, «Verification of equivalent mass-spring-damper models for crowd-structure vibration response prediction,» *Can. J. Civ. Eng.* 38, pp. 1122-1135, 2011.
- [62] G. Pernica, «Dynamical load factors for pedestrian movements and rhythmic exercises,» *Canadian acoustique / acoustique Canadienne* 18(2) 3-18, 1990.
- [63] S. Popovics, «Verification of relationships between mechanical properties of concrete-like materials,» *Matériaux et Constructions*, pp. pp. 183-191, v.8, issue 3 1975.
- [64] SMB, *FCPR-PEO-SMB2-PTST-PLN-TN-TTZ-226052100-E1_plateforme essais dynamiques*, 2022.
- [65] AFNOR, *EN 12390-3, Essais pour béton durci - Partie 3: Résistance à la compression des éprouvettes*, 2019.
- [66] L. Martinelli, V. Racic, B. Dal Lago et F. Foti, «Testing walking-induced vibration of floors using smartphones recordings,» *Robotics*, 2020.
- [67] V. Racic, A. Pavic et J. M. W. Brownjohn, «Modern facilities for experimental measurement of dynamic loads induced by humans: A literature review,» *Shock and Vibration*, pp. 53-67, 2013.
- [68] J.-P. Lebet et M. A. Hirt, *Traité de Génie Civil Volume 12 Ponts en acier*, Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 2009.
- [69] E. Shahabpoor, A. Pavic, V. Racic et S. Zivanovic, «Effect of group walking traffic on dynamic properties of pedestrian structures,» *Journal of Sound and Vibration*, pp. 208-225, 2016.
- [70] V. Racic, J. M. Brownjohn, S. Wang, M. T. Elliot et A. Wing, «Effect of Sensory Stimuli on Dynamic Loading Induced,» chez *Topics in Dynamics of Civil Structures, Volume 4: Proceedings of the 31st IMAC, A Conference on Structural Dynamics*, 2013.
- [71] V. Baumann et M. Botero, «Vérification à la fatigue des planchers à usage événementiel,» *Revue construction métallique du CTICM*, vol. 2, pp. 71-114, 2022.
- [72] S. Loignon, «Spotify proche du demi-milliard d'utilisateurs dans le monde mais creuse ses pertes,» *Les Echos*, 2023. [En ligne]. Available: <https://www.lesechos.fr/tech-medias/medias/spotify-proche-du-demi-milliard-d-utilisateurs-dans-le-monde-mais-creuse-ses-pertes-1902191#:~:text=Intelligence%20artificielle-,Spotify%20proche%20du%20demi%20milliard%20d'utilisateurs%20dans%20le%20monde,utilisa>. [Accès le 7 août 2023].
- [73] S. Dubouilh, «Ecrire une histoire de l'écoute à travers l'architecture des lieux de spectacle,» *Revue Sciences/Lettres*, 2 Octobre 2017.

-
- [74] B. Métra, «Architecture et acoustique des salles. Entretien avec Brigitte Métra, architecte, réalisé par Sandrine Dubouilh,» *Revue Sciences/Lettres*, 27 Mai 2019.
- [75] B. Ellis et T. Ji, «Loads generated by jumping crowds: experimental assessment,» BRE, 2002.
- [76] A. Allani, «Conception et optimisation d'amortisseurs à masse accordée pour les structures du génie civil,» 2015.
- [77] M. Fragiadakis, N. Lagaros et M. Papadrakakis, «Performance-based multiobjective optimum design of steel structures considering life-cycle cost,» *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 32, pp. 1-11, 2006.
- [78] P. Argoul, *Ondelettes et réponses vibratoires de structures*, Université Gustave Eiffel, 2023.
- [79] P. Argoul et S. Erlicher, «On the use of continuous wavelet analysis for modal identification,» *Applied and Computational Mechanics*, 2009.
- [80] J. Chen, G. Li et V. Racic, «A data-driven wavelet-based approach for generating jumping loads,» *Mechanical Systems and Signal Processing*, pp. 49-61, 2018.
- [81] V. Racic et J. Chen, «Data-driven generator of stochastic dynamic loading due to people bouncing,» *Computers and Structures* 158, pp. 240-250, 2015.
- [82] J. Chen, Li Guo et V. Racic, «Acceleration response spectrum for predicting floor vibration due to occupants jumping,» *Engineering Structures* 112, pp. 71-80, 2016.
- [83] J. Chen, L. Wang, V. Racic et J. Lou, «Acceleration response spectrum for prediction of structural vibration due to individual bouncing,» *Mechanical Systems and Signal Processing* 76-77, pp. 394-408, 2016.
- [84] J. Chen, J. Ren et V. Racic, «Prediction of floor responses to crowd bouncing loads by response reduction factor and spectrum method,» *Advances in Structural Engineering*, pp. 1427-1438, 2021.
- [85] M. A. Broers, D. A. Bender, F. E. Woeste et A. R. Phillips, «Residential floor failures from dynamic occupant loading,» *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2021.
- [86] M. R. Svinkin, «Discussion of "Residential floor failures from dynamic occupant loading",» *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2022.

Annexes

Annexe 1 : Incidents liés à des activités événementielles

La liste d'incidents liés à des activités de type concert, des discothèques ou des célébrations s'y apparentant permet de voir le caractère assez répandu et relativement courant de la problématique. Certains accidents peuvent être dus à l'inadéquation du plancher à l'usage, donc à la surcharge d'impact, sans même parler de mise en résonance. Les références permettent d'accéder aux vidéos pour visualiser le contexte de ces manifestations et les phénomènes en jeu. Aux Etats-Unis, ces incidents commencent à être recensés en raison d'occurrences considérées comme de plus en plus fréquentes [85] [86].



Figure 235 : Effondrement de la piste de danse d'un mariage, Jérusalem, 2001, [44]



Figure 236 : Effondrement du plancher devant la scène, Canada, 2008, [47]



Figure 237 : Affaissement devant la scène d'un plancher, Nouvelle-Zélande, 2012, [48]



Figure 238 : Effondrement de la fosse lors d'un concert dans un bar, Saint-Louis, 2015, [49]



Figure 239 : Effondrement de plancher de discothèque, Ténérife, 2017, [45]



Figure 240 : Effondrement d'une jetée lors d'un concert, Espagne, 2018, [50]



Figure 241 : Effondrement d'un plancher par suite d'une soirée étudiante, Etats-Unis, 2018, [43]



Figure 242 : Effondrement d'un plancher bois dans un bar dansant, Etats-Unis, 2018, [51]



Figure 243 : Effondrement du plancher d'un bar, Bogota, 2019, [52]



Figure 244 : Effondrement de la tribune du stade de Nimègue, 2021, [46]



Figure 245 : Affaissement d'un plancher dans une salle de concert, Sydney, 2022, [53]

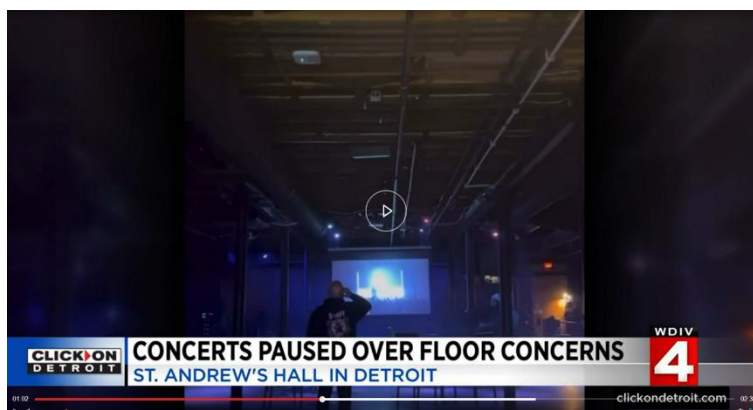


Figure 246 : Mise en résonance inquiétante d'un plancher, Detroit, 2022, [54]



Figure 247 : Effondrement d'un faux-plancher pendant un concert, Paris, 2023, [55]



Figure 248 : Mini tremblement de terre au Circus Maximus, Rome, 2023, [56]

Annexe 2 : Contenu type de la fiche de données personnelles

Données personnelles :

<u>Nom :</u>		<u>Prénom :</u>	
<u>Statut (école ou société) :</u>		<u>Sexe (M/F) :</u>	
<u>Age (ans) :</u>		<u>Poids (kg) :</u>	<u>Taille (cm) :</u>

1. Pratiquez-vous la danse de manière associative (club ou association uniquement) ?

Réponse (oui / non) :

2. Si oui, quelle danse pratiquez-vous en club ou en association ?

Réponse :

3. Pratiquez-vous la danse dans le cercle privé (amis ou famille) ? Nombre de soirées (compris boites) par an ?

Réponse (non / oui + nombre de soirées/an) :

4. Vous considérez-vous de manière générale comme un bon danseur ?

Réponse (oui / non / moyen) :

5. A combien de concerts assistez-vous par an en moyenne ? (Compter à partir de 18 ans)

Réponse (nombre moyen/an) :

6. Quels genres de musique affectionnez-vous le plus ? (Trois genres maximums à préciser dans l'ordre de préférence, ne pas se forcer à remplir B ou C)

Réponse A :

Réponse B :

Réponse C :

7. Quels sports pratiquez-vous en club ou association autre que la danse ? (Jusqu'à deux sports du plus fréquent au moins fréquent, ne rien mettre en A et en B si non pertinent)

Réponse A (sport + nombre de séances par semaine) :

Réponse B (sport + nombre de séances par semaine) :

8. Quels sports pratiquez-vous à titre de loisir ? (Jusqu'à deux sports du plus fréquent au moins fréquent, ne rien mettre si pas de sport pratiqué)

Réponse A (sport + nombre de séances mensuelles) :

Réponse B (sport + nombre de séances mensuelles) :

9. Donnez dans l'ordre de préférence une liste de 10 titres qui vous font ou vous donnent envie de danser en soirée. Répondre sans a priori sur le style ou l'année, de la manière la plus honnête possible. Ces données sont anonymisées à des fins purement statistiques.

Annexe 3 : Données personnelles anonymisées des participants aux essais de foule

Individus	Sexe	Age	16-mars		13-avr		20-avr		Taille [cm]	IMC	Indicateur
			Présence	Masse [kg]	Présence	Masse [kg]	Présence	Masse [kg]			
1	F	18	1	56,8	1	56,8	1	57,5	161	22,0	normal
2	F	21	1	61,1	0		1	50,6	163	21,0	normal
3	M	19	0		0		1	67,2	184	19,8	normal
4	F	18	1	58,6	1	57,8	1	57,6	171,5	19,7	normal
5	M	18	1	59	1	58,9	1	59,5	170	20,5	normal
6	F	18	1	71,1	0		1	69,3	171	24,0	normal
7	F	22	1	65,9	1	64,6	1	64	164	24,1	normal
8	F	19	1	65,5	1	65	1	65,4	176	21,1	normal
9	M	18	1	66,9	1	66,5	1	66,5	181	20,3	normal
10	F	18	1	60,6	1	63,1	1	60,5	165	22,6	normal
11	F	18	1	66,8	1	66,2	1	66,6	167,5	23,7	normal
12	F	19	1	67,6	0		1	63,9	173	22,0	normal
13	F	18	1	57,8	1	56,2	0		165	20,9	normal
14	F	19	1	60,9	1	61,6	1	62,8	163	23,2	normal
15	F	19	1	62,5	0		0		167	22,4	normal
16	F	18	0		1	49,6	1	49,6	170	17,2	maigre
17	F	21	0		1	62,2	1	62,5	164	23,2	normal
18	F	18	1	55	0		1	54,9	161	21,2	normal
19	M	18	1	87	0		1	85,9	175	28,2	surpoids
20	M	19	1	63,5	1	60,9	1	55	168	21,2	normal
21	F	20	1	50,7	1	48,7	1	47	160	19,1	normal
22	M	18	1	55,5	1	58,8	1	55,3	170	19,6	normal
23	F	18	1	48,9	1	48,9	1	49	158	19,6	normal
24	F	18	1	53,4	1	53,9	1	52,6	172,5	17,9	maigre
25	F	19	1	50,4	1	50	1	51,4	165	18,6	normal
26	M	18	1	80,6	1	79,9	1	78,9	194	21,2	normal
27	F	18	1	52,6	1	52,4	0		154	22,1	normal
28	M	18	1	57,6	1	58,2	1	55,9	165	21,0	normal
29	F	19	1	46,1	1	45	1	43,3	163	16,9	maigre
30	F	18	1	55,4	1	56,7	1	55,8	165	20,6	normal
31	M	20	0		1	101,9	1	99,8	180	31,1	obésité modérée
32	F	20	0		0		1	55,9	163	21,0	normal
33	F	18	0		0		1	80,3	175	26,2	surpoids
34	F	21	0		0		1	50,4	168	17,9	maigre
35	F	21	1	56	0		0		168	19,8	normal
36	F	19	1	58,4	0		1	56,6	170	19,9	normal
37	M	18	1	78	1	76,7	1	75,7	197	19,8	normal
38	F	19	0		1	67,3	1	67	169	23,5	normal
39	F	18	1	45,3	0		0		160	17,7	maigre
40	M	19	1	66,9	1	66,9	0		186	19,3	normal
41	F	18	1	60,1	1	60,4	1	60,9	155	25,2	surpoids
42	F	18	1	51,1	1	50,9	1	50,3	162	19,3	normal
43	F	18	1	55,5	0		1	54,7	161	21,3	normal
44	M	18	1	69,8	1	68,1	1	69	184	20,4	normal
45	F	18	1	62,2	0		1	62,4	170	21,6	normal
46	F	19	1	60,8	1	61,6	1	60,1	165	22,3	normal
47	F	18	1	58,1	1	58,2	1	57	158	23,1	normal
48	F	19	1	46,4	1	47,2	1	45,7	161	17,9	maigre
49	F	19	0		0		1	65,9	160	25,7	surpoids
50	F	18	1	67,2	1	67	1	67,2	163	25,3	surpoids
51	F	19	1	60,3	1	61,5	1	60,1	159	24,0	normal
52	F	18	1	54,6	1	54,7	1	55,1	162	20,9	normal
53	M	20	1	73,6	1	73,5	1	72,8	175	23,9	normal
54	M	18	1	66,9	1	67,2	1	65,6	186	19,2	normal
55	M	19	0		0		1	58,2	169	20,4	normal
56	F	18	1	61,1	1	62,5	1	61,4	173	20,6	normal
57	F	18	1	65,7	1	66,3	1	66,8	164	24,6	normal
58	F	18	1	59	1	58	1	57,4	164	21,6	normal
59	M	18	1	77,3	1	78,1	1	77,6	194	20,6	normal
60	M	23	1	67,2	0		1	65,8	175	21,7	normal
61	F	18	0		0		1	74,6	163	28,1	surpoids
62	F	17	1	55,1	1	55,3	1	54	168	19,4	normal
63	F	20	1	72,6	0		1	72,8	164	27,0	surpoids
64	F	18	0		1	47,8	1	48,1	163	18,0	maigre
65	F	18	1	61,6	1	60,5	1	60,3	169	21,3	normal

66	M	18	1	57,7	1	58,6	1	59,2	185	17,1	maigre
67	F	19	0		0		1	62,8	170	21,7	normal
68	F	18	1	61,9	0		1	62,4	167	22,3	normal
69	F	18	1	48,7	1	48,8	1	48,5	158	19,5	normal
70	M	19	1	65,5	1	65	1	65,5	181	19,9	normal
71	M	18	1	60,5	1	61	0		170	21,0	normal
72	F	18	1	64,5	1	65,8	1	65,8	169	22,9	normal
73	F	19	1	53,6	1	53,6	1	53,1	163	20,1	normal
74	F	20	0		1	63,6	1	61,6	166	22,7	normal
75	F	19	1	59,3	1	59,5	0		169	20,8	normal
76	F	18	1	72,1	1	69,9	1	68,6	169	24,6	normal
77	F	20	1	71,3	1	72,3	1	69,1	173	23,7	normal
78	F	20	1	70,5	1	69,5	1	68,1	164	25,8	surpoids
79	M	19	1	68	1	67,9	1	68,2	168	24,1	normal
80	F	18	1	59,1	1	57,9	1	59,2	164	21,8	normal
81	F	18	1	53	1	51	1	51,3	154	21,8	normal
82	F	18	1	55,8	1	54,7	1	54,4	159	21,7	normal
83	F	18	1	57,3	1	57,2	1	57,3	165	21,0	normal
84	F	18	1	52,2	1	51,8	1	51,8	168	18,4	normal
85	F	19	1	56,8	1	57,9	1	57,2	160	22,4	normal
86	F	18	0		1	67,3	1	65,8	168	23,6	normal
87	F	19	1	48,7	1	49	1	48,5	165	17,9	maigre
88	F	34	0		1	60,8	0		160	23,8	normal
89	F	18	1	54,4	1	53,4	0		166	19,6	normal
90	F	18	1	47,4	1	47,1	1	47,2	155	19,7	normal
91	F	18	1	54,3	1	56,3	1	53,6	168	19,4	normal
92	F	19	1	64,2	1	65	1	63,8	166	23,3	normal
93	F	18	1	65,3	1	64	1	62,3	154	26,9	surpoids
94	F	19	1	60,7	1	63,6	1	62	163	23,4	normal
95	M	18	1	63,8	1	64,1	1	64,4	180	19,8	normal
96	F	19	1	61	1	60	1	58,8	169	21,0	normal
97	F	19	0		1	58,6	1	58,3	162	22,3	normal
98	F	18	0		1	47,7	1	47,2	160	18,5	normal
99	F	18	1	56,1	0		1	55,4	167,5	19,9	normal
100	F	18	1	55,6	0		0		170	19,2	normal
101	F	18	1	71,5	1	73,6	1	72,3	175	23,7	normal
102	F	20	0		0		1	50,7	178	16,0	maigre
103	F	18	1	59	0		0		155	24,6	normal
104	F	16	0		1	66,5	1	66,6	165	24,4	normal
105	F	19	1	49,7	1	50,8	1	48,9	161	19,2	normal
106	M	21	1	77,8	0		0		192	21,1	normal
107	F	18	1	88,2	1	87,1	1	86,1	168	30,9	obésité modérée
108	F	18	1	69,2	1	69,3	1	69,2	160	27,0	surpoids
109	F	18	1	62,1	0		0		173	20,7	normal
110	F	19	1	63,1	1	63,9	1	63	170,5	21,8	normal
111	M	19	0		0		1	67	189	18,8	normal
112	F	21	1	61,3	1	61,6	1	61	170	21,2	normal
113	F	18	1	62,5	1	63,6	1	62,3	172	21,2	normal
114	F	19	1	59,9	1	58,6	1	59	156	24,3	normal
115	M	20	0		0		1	102,2	184	30,2	obésité modérée
116	F	18	0		1	60,5	0		163	22,8	normal
117	F	18	1	48,3	0		0		163	18,2	maigre
118	M	20	0		1	64	1	63,9	178	20,2	normal
119	F	20	1	53,9	1	53,3	1	53,2	161	20,6	normal
120	F	18	1	63,8	1	63,4	1	62,3	167	22,6	normal
121	F	19	1	70,4	1	70,1	0		168	24,9	normal
122	M	20	1	72,4	1	72,8	0		175	23,7	normal
123	M	19	1	69,4	0		0		187	19,8	normal
124	F	18	1	53,3	1	52,9	1	52,5	167	19,0	normal
125	F	20	1	67,1	1	66,5	1	64,9	174	21,9	normal
126	F	21	0		0		1	71,6	172	24,2	normal
127	M	18	0		1	66,8	1	66,3	186	19,2	normal
128	M	18	1	66,4	1	65,6	1	65,2	174	21,7	normal
129	F	19	1	53,5	1	53,3	1	52,6	164	19,8	normal
130	F	19	0		0		1	57,8	171	19,8	normal
131	F	19	1	61,2	1	61,7	1	60,4	157	24,8	normal

Tableau 157 : Caractéristiques physiques des participants pour les essais de foule avec les S2

Annexe 4 : Positionnement détaillé des individus sur la dalle d'essai aux essais de foule

Individu	Instrumentation		102	A1 à A3 et A5 à A6			102	A4bis			102	F à S		
	cometa	plate		Prés.	Dalle	Rangée		Position	Prés.	Dalle		Rangée	Position	Prés.
11	sans	1	1	1	C	2	1	1	C	2	1	1	C	2
84			1	1	N	2	1	1	N	2	1	1	N	2
19			1	1	S	2	1	1	S	2	1	1	S	2
41			1	1	C	3	1	1	C	3	1	1	C	3
63			1	1	N	3	1	1	N	3	1	1	N	3
73			1	1	S	3	1	1	S	3	1	1	S	3
117			1	2	C	1	1	2	C	1	1	2	C	1
68			1	2	N	1	1	2	N	1	1	2	N	1
60			1	2	S	1	1	2	S	1	1	2	S	1
36	2	2	1	2	C	2	1	2	C	2	1	2	C	2
99			1	2	N	2	1	2	N	2	1	2	N	2
45			1	2	S	2	1	2	S	2	1	2	S	2
2			1	2	C	3	1	2	C	3	1	2	C	3
12			1	2	N	3	1	2	N	3	1	2	N	3
6			1	2	S	3	1	2	S	3	1	2	S	3
23			1	3	C	1	1	3	C	1	1	3	C	1
82			1	3	N	1	1	3	N	1	1	3	N	1
108			1	3	S	1	1	3	S	1	1	3	S	1
70	3	3	1	3	C	2	1	3	C	2	1	3	C	2
21			1	3	N	2	1	3	N	2	1	3	N	2
71			1	3	S	2	1	3	S	2	1	3	S	2
92			1	3	C	3	1	3	C	3	1	3	C	3
27			1	3	N	3	1	3	N	3	1	3	N	3
52			1	3	S	3	1	3	S	3	1	3	S	3
90			1	4	C	1	1	4	C	1	1	4	C	1
22			1	4	N	1	1	4	N	1	1	4	N	1
131			1	4	S	1	1	4	S	1	1	4	S	1
58	4	4	1	4	C	2	1	4	C	2	1	4	C	2
129			1	4	N	2	1	4	N	2	1	4	N	2
110			1	4	S	2	1	4	S	2	1	4	S	2
30			1	4	C	3	1	4	C	3	1	4	C	3
24			1	4	N	3	1	4	N	3	1	4	N	3
1			1	4	S	3	1	4	S	3	1	4	S	3
96			1	5	C	1	1	5	C	1	1	5	C	1
78			1	5	N	1	1	5	N	1	1	5	N	1
93			1	5	S	1	1	5	S	1	1	5	S	1
87	5	5	1	5	C	2	1	5	C	2	1	5	C	2
79			1	5	N	2	1	5	N	2	1	5	N	2
95			1	5	S	2	1	5	S	2	1	5	S	2
119			1	5	C	3	1	5	C	3	1	5	C	3
91			1	5	N	3	1	5	N	3	1	5	N	3
14			1	5	S	3	1	5	S	3	1	5	S	3
81			1	6	C	1	1	6	C	1	1	6	C	1
69			1	6	N	1	1	6	N	1	1	6	N	1
122			1	6	S	1	1	6	S	1	1	6	S	1
10	6	6	1	6	C	2	1	6	C	2	1	6	C	2
80			1	6	N	2	1	6	N	2	1	6	N	2
20			1	6	S	2	1	6	S	2	1	6	S	2
62			1	6	C	3	1	6	C	3	1	6	C	3
113			1	6	N	3	1	6	N	3	1	6	N	3
76			1	6	S	3	1	6	S	3	1	6	S	3
106			1	7	C	1	1	7	C	1	1	7	C	1
28			1	7	N	1	1	7	N	1	1	7	N	1
4			1	7	S	1	1	7	S	1	1	7	S	1
125	7	7	1	7	C	2	1	7	C	2	1	7	C	2
13			1	7	N	2	1	7	N	2	1	7	N	2
114			1	7	S	2	1	7	S	2	1	7	S	2
89			1	7	C	3	1	7	C	3	1	7	C	3
39			1	7	N	3	1	7	N	3	1	7	N	3
101			1	7	S	3	1	7	S	3	1	7	S	3
8			1	8	C	1	1	8	C	1	1	8	C	1
120			1	8	N	1	1	8	N	1	1	8	N	1

59			1	8	S	1	1	8	S	1	1	8	S	1
72	8	8	1	8	C	2	1	8	C	2	1	8	C	2
112			1	8	N	2	1	8	N	2	1	8	N	2
65			1	8	S	2	1	8	S	2	1	8	S	2
57			1	8	C	3	1	8	C	3	1	8	C	3
42			1	8	N	3	1	8	N	3	1	8	N	3
35			1	8	S	3	1	8	S	3	1	8	S	3
7			1	9	C	1	1	9	C	1	1	9	C	1
18			1	9	N	1	1	9	N	1	1	9	N	1
50			1	9	S	1	1	9	S	1	1	9	S	1
53	9	9	1	9	C	2	1	9	C	2	1	9	C	2
25			1	9	N	2	1	9	N	2	1	9	N	2
37			1	9	S	2	1	9	S	2	1	9	S	2
128			1	9	C	3	1	9	C	3	1	9	C	3
121			1	9	N	3	1	9	N	3	1	9	N	3
48			1	9	S	3	1	9	S	3	1	9	S	3
43			1	10	C	1	1	10	C	1	0	10	C	1
100			0	10	C	1	0	10	C	1	1	10	C	1
75			1	10	N	1	0	10	N	1	0	10	N	1
109			0	10	N	1	1	10	N	1	1	10	N	1
51			1	10	S	1	1	10	S	1	1	10	S	1
77	10	10	1	10	C	2	1	10	C	2	1	10	C	2
103			1	10	N	2	1	10	N	2	1	10	N	2
105			1	10	S	2	1	10	S	2	1	10	S	2
44			1	10	C	3	1	10	C	3	1	10	C	3
123			1	10	N	3	1	10	N	3	1	10	N	3
54			1	10	S	3	1	10	S	3	1	10	S	3
56			1	11	C	1	1	11	C	1	1	11	C	1
5			1	11	N	1	1	11	N	1	1	11	N	1
40			1	11	S	1	1	11	S	1	1	11	S	1
9	11	12	1	11	C	2	1	11	C	2	1	11	C	2
85			1	11	N	2	1	11	N	2	1	11	N	2
46			1	11	S	2	1	11	S	2	1	11	S	2
124			1	11	C	3	1	11	C	3	1	11	C	3
15			1	11	N	3	1	11	N	3	1	11	N	3
66			1	11	S	3	1	11	S	3	1	11	S	3
107			1	12	C	1	1	12	C	1	1	12	C	1
83			1	12	N	1	1	12	N	1	1	12	N	1
29			1	12	S	1	1	12	S	1	1	12	S	1
26	sans	11	1	12	C	2	1	12	C	2	1	12	C	2
47			1	12	N	2	1	12	N	2	1	12	N	2
94			1	12	S	2	1	12	S	2	1	12	S	2

Tableau 158 : Position des individus sur la dalle pour les essais du 16/03/2023

Individu	Instrumentation		97 Prés.	G1 à E1			96 Prés.	E2 à E4			96 Prés.	H1 à H2			95 Prés.	H3 à H5		
	Cometa	Plate		D	R	P		D	R	P		D	R	P		D	R	P
11	Sans	1	1	1	C	2	1	1	C	2	1	1	C	2	1	1	C	2
41			1	1	C	3	1	1	C	3	1	1	C	3	1	1	C	3
73			1	1	S	3	1	1	S	3	1	1	S	3	1	1	S	3
17			1	2	C	1	1	2	C	1	1	2	N	3	1	2	N	3
31			1	2	N	1	1	2	N	1	1	2	N	1	1	2	N	1
127			1	2	S	1	1	2	S	1	1	2	S	1	1	2	S	1
98	2	2	1	2	C	2	1	2	C	2	1	2	C	2	1	2	C	2
38			1	2	N	2	1	2	N	2	1	2	N	2	1	2	N	2
84			1	2	S	2	1	2	S	2	1	2	S	2	1	2	S	2
118			1	2	C	3	1	2	C	3	1	2	C	3	1	2	C	3
83			1	2	N	3	1	2	N	3	1	2	C	1	1	2	C	1
86			1	2	S	3	1	2	S	3	1	2	S	3	1	2	S	3
23			1	3	C	1	1	3	C	1	1	3	C	1	1	3	C	1
82			1	3	N	1	1	3	N	1	1	3	N	1	1	3	N	1
108			1	3	S	1	1	3	S	1	1	3	S	1	1	3	S	1
70	3	3	1	3	C	2	1	3	C	2	1	3	C	2	1	3	C	2
21			1	3	N	2	1	3	N	2	1	3	C	3	1	3	C	3
71			1	3	S	2	1	3	S	2	1	3	S	2	1	3	S	2
92			1	3	C	3	1	3	C	3	1	3	N	2	1	3	N	2

27			1	3	N	3	1	3	N	3	1	3	N	3	1	3	N	3
52			1	3	S	3	1	3	S	3	1	3	S	3	1	3	S	3
90			1	4	C	1	1	4	C	1	1	4	C	1	1	4	C	1
22			1	4	N	1	1	4	N	1	1	4	N	1	1	4	N	1
131			1	4	S	1	1	4	S	1	1	4	S	1	1	4	S	1
58	4	4	1	4	C	2	1	4	C	2	1	4	C	2	1	4	C	2
129			1	4	N	2	1	4	N	2	1	4	N	2	1	4	N	2
110			1	4	S	2	1	4	S	2	1	4	S	2	1	4	S	2
30			1	4	C	3	1	4	C	3	1	4	C	3	1	4	C	3
24			1	4	N	3	1	4	N	3	1	4	N	3	1	4	N	3
1			1	4	S	3	1	4	S	3	1	4	S	3	1	4	S	3
96			1	5	C	1	1	5	C	1	1	5	C	1	1	5	C	1
78			1	5	N	1	1	5	N	1	1	5	N	1	1	5	N	1
93			1	5	S	1	1	5	S	1	1	5	S	1	1	5	S	1
87	5	5	1	5	C	2	1	5	C	2	1	5	C	2	1	5	C	2
79			1	5	N	2	1	5	N	2	1	5	N	2	1	5	N	2
95			1	5	S	2	1	5	S	2	1	5	S	2	1	5	S	2
119			1	5	C	3	1	5	C	3	1	5	C	3	1	5	C	3
91			1	5	N	3	1	5	N	3	1	5	N	3	1	5	N	3
14			1	5	S	3	1	5	S	3	1	5	S	3	1	5	S	3
81			1	6	C	1	1	6	C	1	1	6	C	1	1	6	C	1
69			1	6	N	1	1	6	N	1	1	6	N	1	1	6	N	1
122			1	6	S	1	1	6	S	1	1	6	S	1	1	6	S	1
10	6	6	1	6	C	2	1	6	C	2	1	6	C	2	1	6	C	2
97			1	6	N	2	1	6	N	2	1	6	N	2	1	6	N	2
20			1	6	S	2	1	6	S	2	1	6	S	2	1	6	S	2
62			1	6	C	3	1	6	C	3	1	6	C	3	1	6	C	3
113			1	6	N	3	1	6	N	3	1	6	N	3	1	6	N	3
76			1	6	S	3	1	6	S	3	1	6	S	3	1	6	S	3
16			1	7	C	1	1	7	C	1	1	7	N	2	1	7	N	2
28			1	7	N	1	1	7	N	1	1	7	N	1	1	7	N	1
4			1	7	S	1	1	7	S	1	1	7	S	1	1	7	S	1
125	7	7	1	7	C	2	0				1	12	N	2	1	12	N	2
13			1	7	N	2	1	7	N	2	1	7	C	1	1	7	C	1
114			1	7	S	2	1	7	S	2	1	7	S	2	1	7	S	2
89			1	7	C	3	1	7	C	3	1	7	C	3	1	7	C	3
94			1	7	N	3	1	7	N	3	1	7	N	3	1	7	N	3
101			1	7	S	3	1	7	S	3	1	7	S	3	1	7	S	3
8			1	8	C	1	1	8	C	1	1	8	C	1	1	8	C	1
120			1	8	N	1	1	8	N	1	1	8	N	1	1	8	N	1
59			1	8	S	1	1	8	S	1	1	8	S	1	1	8	S	1
72	8	8	1	8	C	2	1	8	C	2	1	8	C	2	1	8	C	2
112			1	8	N	2	1	8	N	2	1	8	N	2	1	8	N	2
65			1	8	S	2	1	8	S	2	1	8	S	2	1	8	S	2
57			1	8	C	3	1	8	C	3	1	8	C	3	1	8	C	3
42			1	8	N	3	1	8	N	3	1	8	N	3	1	8	N	3
74			1	8	S	3	1	8	S	3	1	8	S	3	1	8	S	3
7			1	9	C	1	1	9	C	1	1	9	C	1	1	9	C	1
64			1	9	N	1	1	9	N	1	1	9	N	1	1	9	N	1
50			1	9	S	1	1	9	S	1	1	9	S	1	1	9	S	1
53	9	9	1	9	C	2	1	9	C	2	1	9	C	2	1	9	C	2
25			1	9	N	2	1	9	N	2	1	9	N	2	1	9	N	2
37	10	10	1	9	S	2	1	9	S	2	1	9	S	2	1	10	C	2
128			1	9	C	3	1	9	C	3	1	9	C	3	1	9	C	3
121			1	9	N	3	1	9	N	3	1	9	N	3	1	9	N	3
48			1	9	S	3	1	9	S	3	1	9	S	3	1	9	S	3
104			1	10	C	1	1	10	C	1	1	10	C	1	1	10	C	1
75			1	10	N	1	1	10	N	1	1	10	N	1	1	10	N	1
51			1	10	S	1	1	10	S	1	1	10	S	1	1	10	S	1
77	10	10	1	10	C	2	1	10	C	2	1	10	C	2	0			
116			1	10	N	2	1	10	N	2	1	10	N	2	1	10	N	2
105			1	10	S	2	1	10	S	2	1	10	S	2	1	10	S	2
44			1	10	C	3	1	10	C	3	1	10	C	3	1	10	C	3
47			1	10	N	3	1	10	N	3	1	10	N	3	1	10	N	3
54			1	10	S	3	1	10	S	3	1	10	S	3	1	10	S	3
56			1	11	C	1	1	11	C	1	1	11	N	3	1	11	N	3

5			1	11	N	1	1	11	N	1	1	11	N	1	1	11	N	1
40			1	11	S	1	1	11	S	1	1	11	S	1	1	11	S	1
9	11	11	1	11	C	2	1	11	C	2	1	11	C	2	1	11	C	2
85			1	11	N	2	1	11	N	2	1	11	N	2	1	11	N	2
46			1	11	S	2	1	11	S	2	1	11	S	2	1	11	S	2
124			1	11	C	3	1	11	C	3	1	11	C	3	1	11	C	3
29			1	11	N	3	1	11	N	3	1	11	C	1	1	11	C	1
66			1	11	S	3	1	11	S	3	1	11	S	3	1	11	S	3
107			1	12	C	1	1	12	C	1	1	12	C	1	1	9	S	2
88			1	12	N	1	1	12	N	1	0				0			
26	sans	12	1	12	C	2	1	12	C	2	1	12	C	2	1	12	C	2
80	7	7	1	12	S	3	1	7	C	2	1	7	C	2	1	7	C	2

Tableau 159 : Position des individus sur la dalle pour les essais du 13/04/2023

Individu	Instrumentation		108	F1A F1B F3C F4A F1C			108	F4B		
	cometa	plate	Prés.	Dalle	Rangée	Position	Prés.	Dalle	Rangée	Position
74			1	1	C	1	1	1	C	1
104			1	1	N	1	1	1	N	1
3			1	1	S	1	1	1	S	1
11	sans	1	1	1	C	2	1	1	C	2
84			1	1	N	2	1	1	N	2
19			1	1	S	2	1	1	S	2
41			1	1	C	3	1	1	C	3
63			1	1	N	3	1	1	N	3
73			1	1	S	3	1	1	S	3
17			1	2	C	1	1	2	C	1
31			1	2	N	1	1	2	N	1
127			1	2	S	1	1	2	S	1
2	2	2	1	2	C	2	1	2	C	2
38			1	2	N	2	1	2	N	2
12			1	2	S	2	1	2	S	2
118			1	2	C	3	1	2	C	3
98			1	2	N	3	1	2	N	3
86			1	2	S	3	1	2	S	3
23			1	3	C	1	1	3	C	1
82			1	3	N	1	1	3	N	1
108			1	3	S	1	1	3	S	1
70	3	3	1	3	C	2	1	3	C	2
32			1	3	N	2	1	3	N	2
6			1	3	S	2	1	3	S	2
92			1	3	C	3	1	3	C	3
126			1	3	N	3	0			
52			1	3	S	3	1	3	S	3
90			1	4	C	1	1	4	C	1
130			1	4	N	1	1	4	N	1
131			1	4	S	1	1	4	S	1
58	4	4	1	4	C	2	1	4	C	2
129			1	4	N	2	1	4	N	2
110			1	4	S	2	1	4	S	2
30			1	4	C	3	1	4	C	3
24			1	4	N	3	1	4	N	3
1			1	4	S	3	1	4	S	3
96			1	5	C	1	1	5	C	1
78			1	5	N	1	1	5	N	1
93			1	5	S	1	1	5	S	1
87	5	5	1	5	C	2	1	5	C	2
79			1	5	N	2	1	5	N	2
95			1	5	S	2	1	5	S	2
119			1	5	C	3	1	5	C	3
91			1	5	N	3	1	5	N	3
14			1	5	S	3	1	5	S	3
81			1	6	C	1	1	6	C	1
69			1	6	N	1	1	6	N	1
33			1	6	S	1	1	6	S	1
10	6	6	1	6	C	2	1	6	C	2

80			1	6	N	2	1	6	N	2
34			1	6	S	2	1	6	S	2
62			1	6	C	3	1	6	C	3
113			1	6	N	3	1	6	N	3
76			1	6	S	3	1	6	S	3
36			1	7	C	1	1	7	C	1
28			1	7	N	1	1	7	N	1
4			1	7	S	1	1	7	S	1
125	7	7	1	7	C	2	1	7	C	2
45			1	7	N	2	1	7	N	2
114			1	7	S	2	1	7	S	2
55			1	7	C	3	1	7	C	3
60			1	7	N	3	1	7	N	3
101			1	7	S	3	1	7	S	3
8			1	8	C	1	1	8	C	1
120			1	8	N	1	1	8	N	1
59			1	8	S	1	1	8	S	1
72	8	8	1	8	C	2	1	8	C	2
112			1	8	N	2	1	8	N	2
65			1	8	S	2	1	8	S	2
57			1	8	C	3	1	8	C	3
42			1	8	N	3	1	8	N	3
61			1	8	S	3	1	8	S	3
7			1	9	C	1	1	9	C	1
64			1	9	N	1	1	9	N	1
50			1	9	S	1	1	9	S	1
53	9	9	1	9	C	2	1	9	C	2
25			1	9	N	2	1	9	N	2
37			1	9	S	2	1	9	S	2
128			1	9	C	3	1	9	C	3
18			1	9	N	3	1	9	N	3
48			1	9	S	3	1	9	S	3
43			1	10	C	1	1	10	C	1
67			1	10	N	1	1	10	N	1
51			1	10	S	1	1	10	S	1
77	10	10	1	10	C	2	1	10	C	2
68			1	10	N	2	1	10	N	2
105			1	10	S	2	1	10	S	2
44			1	10	C	3	1	10	C	3
99			1	10	N	3	1	10	N	3
54			1	10	S	3	1	10	S	3
56			1	11	C	1	1	11	C	1
5			1	11	N	1	1	11	N	1
102			1	11	S	1	1	11	S	1
9	11	11	1	11	C	2	1	11	C	2
85			1	11	N	2	1	11	N	2
46			1	11	S	2	1	11	S	2
124			1	11	C	3	1	11	C	3
22			1	11	N	3	1	11	N	3
66			1	11	S	3	1	11	S	3
107			1	12	C	1	1	12	C	1
115			1	12	N	1	1	12	N	1
29			1	12	S	1	1	12	S	1
26	sans	12	1	12	C	2	1	12	C	2
97			1	12	N	2	1	12	N	2
94			1	12	S	2	1	12	S	2
16			1	12	C	3	1	12	C	3
47			1	12	N	3	1	12	N	3
83			1	12	S	3	1	12	S	3
20			0				0			
21			0				0			
49			0				1	3	N	3
111			0				0			

Tableau 160 : Position des individus sur la dalle pour les essais du 20/04/2023

Annexe 5 : Etat de fissuration de la dalle après les essais

Au moment de la démolition du prototype, les dalles de surcharge ont été retirées et la dalle a été inspectée. Trois zones de fissuration nette ont été identifiées (Figure 249). La fissuration s'est développée sur la largeur, perpendiculairement au sens de portée des poutres principales (Figure 250, Figure 251). Les fissures identifiées en bleu se distinguent nettement de la fissuration de façençage de retrait (Figure 252).

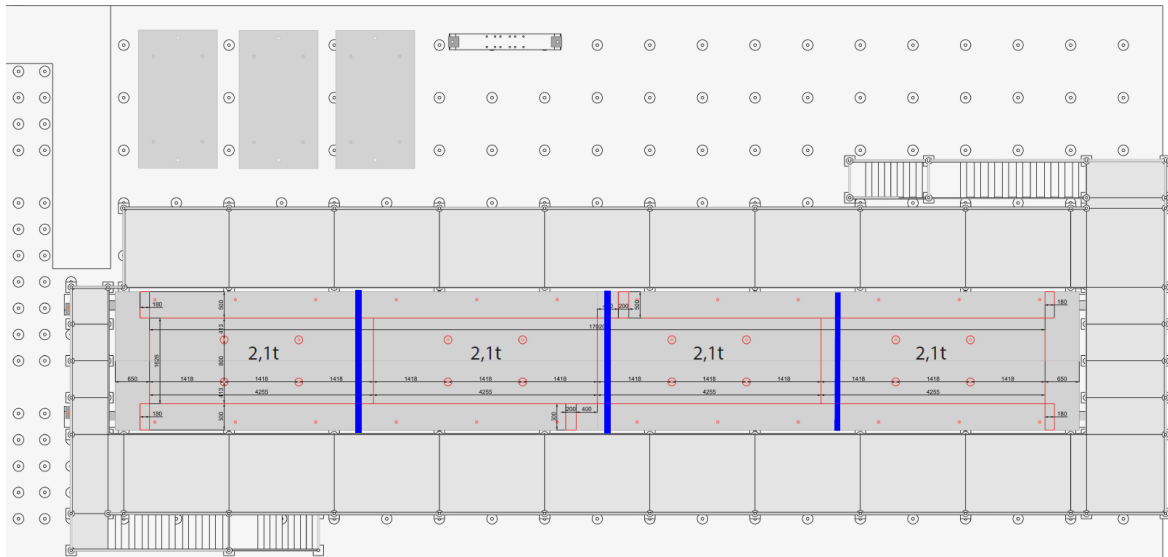


Figure 249 : Localisation des fissures sur la plan de démolition (en bleu)



Figure 250 : Fissures ouest entre les dalles 9 et 10

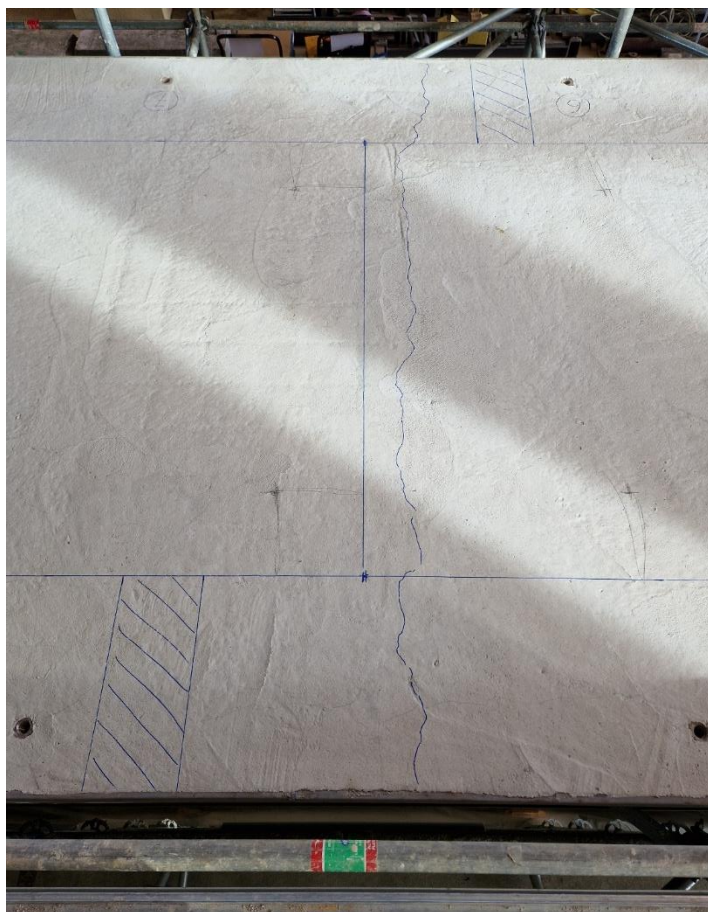


Figure 251 : Fissures centrales entre dalles 6 et 7 et fissures est entre dalles 3 et 4



Figure 252 : Fissure principale due à la flexion et fissures de retrait