

## Etude des vibrations induites dans les planchers par la marche de piétons

**Auteur :** Manguette, Renaud

**Promoteur(s) :** Denoel, Vincent

**Faculté :** Faculté des Sciences appliquées

**Diplôme :** Master en ingénieur civil des constructions, à finalité spécialisée en "civil engineering"

**Année académique :** 2022-2023

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/17771>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---



UNIVERSITÉ DE LIÈGE

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

---

ÉTUDE DES VIBRATIONS INDUITES DANS LES  
PLANCHERS PAR LA MARCHE DE PIÉTONS

---

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master  
Ingénieur Civil des Constructions par Manguette Renaud

PROMOTEUR :  
Denoël Vincent

MEMBRES DU JURY :  
Denoël Vincent  
De Ville De Goyet Vincent  
Bruls Olivier  
Güner Hüseyin

Année académique 2022-2023

# Remerciements

En arrivant au terme de ce travail, je souhaite remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de celui-ci.

Je remercie tout d'abord Vincent Denoël pour son temps, ses suggestions et les solutions qu'il m'a apportées. Je lui suis également reconnaissant de m'avoir fait confiance en me prêtant son propre matériel de mesure.

Ensuite, je me dois de remercier chaleureusement toutes les institutions qui ont investi de leur temps pour me permettre de réaliser les différents tests en leurs bâtiments. Une mention toute particulière est émise à l'attention de l'Institut Saint François-Xavier 2, l'Institut Notre Dame Heusy ainsi qu'à l'Athénée Royal Verdi. Ils ont non seulement donné accès à leur établissement, fourni les participants pour les prises de mesures mais ont surtout porté un grand intérêt au sujet de ce travail.

Je tiens également à remercier ma famille ainsi que mes proches qui m'ont épaulé et encouragé lors de la réalisation de ce mémoire mais aussi lors de l'entièreté de mon cursus.

Je finirai par remercier les membres du jury ainsi que les différents lecteurs de ce travail qui donneront sans nul doute un avis constructif et intéressé, me permettant de continuer à progresser.

Manguette Renaud

# Abstract

Various methods can be used to determine the vibratory response of a structure. However, some of them require simplifying assumptions, such as the stationarity of the signal. Currently, there is still some uncertainty as to the number of pedestrians required to reach a stationary state, and as to the various parameters influencing stationarity.

This study focuses on the investigation of the vibrational behavior of floors under the influence of pedestrians. It is divided into two main phases : an experimental part and a modeling part. A Matlab code is developed to numerically represent the various measurements taken. The code has been validated thanks to the satisfactory similarities observed between the numerical and experimental results.

A stationarity index has been defined. Based on the model, the different parameters that influence the attainment of a stationary state have been determined. These parameters mainly include :

- Average walking speed of pedestrians,
- Natural frequencies of the floor,
- Dynamic damping of the structure,
- Size of the floor and the proportion of it used by pedestrians,
- Time interval between two pedestrians entering the floor.

It has been determined that a medium-sized floor (10m x 10m) reaches a stationary state no later than with 15 pedestrians. This observation can be extended to larger floor dimensions under certain conditions. The results are valid for an average walking speed of 1.65 m/s.

# Résumé

Différentes méthodes peuvent être utilisées afin de déterminer la réponse vibratoire d'une structure. Cependant, certaines d'entre elles nécessitent de poser des hypothèses simplificatrices comme la stationnarité du signal. Actuellement, certaines incertitudes persistent quant au nombre de piétons permettant d'atteindre un état stationnaire ainsi qu'autour des différents paramètres influençant la stationnarité.

Ce travail porte donc sur l'étude du comportement vibratoire des planchers sous l'influence de piétons. Il s'articule selon deux grandes phases : une partie expérimentale et une partie de modélisation. Un code Matlab est produit afin de représenter numériquement les différentes prises de mesures. Grâce aux similitudes satisfaisantes entre les résultats numériques et expérimentaux, le code a été validé.

Un indice de stationnarité a été défini. Sur base du modèle, les différents paramètres ayant une influence sur l'atteinte d'un état stationnaire ont été déterminés. Il s'agit principalement des paramètres suivants :

- la vitesse moyenne des piétons,
- les fréquences propres du plancher,
- l'amortissement dynamique de la structure,
- la taille du plancher et sa proportion utilisée par les piétons,
- l'intervalle de temps entre deux piétons entrant sur le plancher.

Il a été déterminé qu'un plancher de taille moyenne (10m x 10m) atteint un état stationnaire au plus tard à partir de 15 piétons. Cette observation peut être étendue à des planchers de plus grandes dimensions suivant certaines conditions. Les résultats sont valables pour une vitesse moyenne de marche de 1.65 m/s.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Mise en contexte . . . . .	1
1.2	État de l'Art . . . . .	2
1.2.1	Effet d'un piéton . . . . .	2
1.2.2	Effet d'une foule . . . . .	4
1.3	Objectifs . . . . .	6
1.4	Note d'hypothèse . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Partie expérimentale</b>	<b>8</b>
2.1	Matériel de mesure - USB Accelerometer Data Logger . . . . .	8
2.2	Tests préliminaires . . . . .	9
2.2.1	Méthodologie . . . . .	9
2.2.2	Résultats . . . . .	10
2.3	Méthodologie des tests principaux . . . . .	14
2.4	Traitement des données . . . . .	16
2.4.1	Reconstruction du signal . . . . .	16
2.4.2	Écart type . . . . .	17
2.4.3	Indice de stationnarité - Définition . . . . .	18
2.4.4	Indice de stationnarité - Discussion et démarche . . . . .	19
2.5	Données et résultats des tests principaux . . . . .	27
2.5.1	Classe . . . . .	27
2.5.1.1	Contexte . . . . .	27
2.5.1.2	Fréquences propres . . . . .	28
2.5.1.3	Écart type . . . . .	29
2.5.1.4	Indice de stationnarité . . . . .	29
2.5.2	Bibliothèque . . . . .	31
2.5.2.1	Contexte . . . . .	31
2.5.2.2	Fréquences propres . . . . .	32
2.5.2.3	Écart type . . . . .	32
2.5.2.4	Formes des modes . . . . .	33
2.5.2.5	Indice de stationnarité . . . . .	34
2.5.3	Salle d'étude . . . . .	35
2.5.3.1	Contexte . . . . .	35
2.5.3.2	Fréquences propres . . . . .	36
2.5.3.3	Écart type . . . . .	36
2.5.3.4	Formes des modes . . . . .	37
2.5.3.5	Indice de stationnarité . . . . .	39
2.5.4	Salle d'expression . . . . .	40
2.5.4.1	Contexte . . . . .	40
2.5.4.2	Fréquences propres . . . . .	41

2.5.4.3	Écart type . . . . .	41
2.5.4.4	Formes des modes . . . . .	42
2.5.4.5	Indice de stationnarité . . . . .	44
2.5.5	Salle de répétition . . . . .	45
2.5.5.1	Contexte . . . . .	45
2.5.5.2	Fréquences propres . . . . .	46
2.5.5.3	Écart type . . . . .	46
2.5.5.4	Formes des modes . . . . .	47
2.5.5.5	Indice de stationnarité . . . . .	49
2.6	Conclusion . . . . .	50
<b>3</b>	<b>Modélisation</b>	<b>52</b>
3.1	Description du développement mathématique implémenté . . . . .	52
3.2	Établissement des différents paramètres . . . . .	57
3.3	Validation du code . . . . .	58
3.3.1	Évolution des fréquences propres et de l'amortissement . . . . .	60
3.3.2	Modélisation - Bibliothèque . . . . .	61
3.3.3	Modélisation - Salle d'étude . . . . .	62
3.3.4	Modélisation - Salle d'expression . . . . .	65
3.3.5	Modélisation - Salle de répétition . . . . .	69
3.4	Discussion de la stationnarité . . . . .	72
3.5	Conclusion . . . . .	78
<b>4</b>	<b>Conclusion générale et perspectives</b>	<b>79</b>
<b>A</b>	<b>Annexe</b>	<b>81</b>
A.1	Plan . . . . .	81
A.1.1	Institut Saint-François Xavier . . . . .	81
A.1.2	Institut Notre Dame Heusy . . . . .	84
A.1.3	Athénée Royal Verdi . . . . .	90
A.2	Tests préliminaires . . . . .	92
A.2.1	Institut Saint François-Xavier 2 . . . . .	92
A.2.2	Institut Notre Dame Heusy . . . . .	92
A.2.3	Athénée Royal Verdi . . . . .	95
A.2.4	Ecole maternelle et primaire Sainte Elisabeth . . . . .	96
A.2.5	Les Minières . . . . .	96
A.2.6	Ferme des Comagnes . . . . .	96
A.3	Traitement des données - Indice de stationnarité . . . . .	97
A.4	Indice de stationnarité - Expérimental . . . . .	99
A.4.1	Classe . . . . .	99
A.4.2	Bibliothèque . . . . .	99
A.4.3	Salle d'étude . . . . .	100
A.4.4	Salle d'expression . . . . .	100
A.4.5	Salle de répétition . . . . .	101
A.5	Validation du code . . . . .	102
A.5.1	Salle d'étude . . . . .	103
A.5.2	Salle d'expression . . . . .	105
A.5.3	Salle de répétition . . . . .	107
A.6	Effet de la fréquence sur l'indice de stationnarité . . . . .	108

# Nomenclature

$x_{0,i}$	Position initiale d'un piéton selon l'axe x
$y_{0,i}$	Position initiale d'un piéton selon l'axe y
$\alpha_k$	Amplitude de Fourier
$\ddot{q}$	Accélération du plancher
$\omega$	Pulsation
$\bar{X}$	Moyenne
$\phi_k$	Déphasage par rapport à la première harmonique
$dep$	Déplacement via Newmark
$f_i$	$i^{\text{ème}}$ fréquence propre
$f_s$	Fréquence du pas
$k$	Raideur
$L_x$	Dimension du domaine selon x
$L_y$	Dimension du domaine selon y
$N$	Nombre de piétons
$p$	Proportion tronquée du signal
$q$	Déplacement du plancher
$q_s$	Accélération sans amplification via Newmark
$s$	Indice de stationnarité
$T$	Période
$t$	Temps
$t_i$	Temps initial du démarrage d'un piéton
$V_{moy}$	Vitesse moyenne
$v_{s,i}$	Vitesse d'un piéton
$v_{sx,i}$	Vitesse reportée selon l'axe des abscisses
$v_{sy,i}$	Vitesse reportée selon l'axe des ordonnées
$vit$	Vitesse via Newmark
$W$	Poids d'un piéton
$w$	Taille de fenêtre de l'écart type mobile



---

$x, y$	Coordonnées de la position d'un piéton
$\alpha$	Angle de départ du piéton
$\beta$	Proportion de la surface du plancher utilisée par les piétons
$\delta$	Impulsion de Dirac
$\Delta t$	Pas temporel
$\dot{q}$	Vitesse du plancher
$\phi_{jl}$	Forme du mode de vibration
$\xi_j$	Coefficient d'amortissement structurel
$acc$	Accélération via Newmark
$Acc_{jl}$	Accélération totale en une position donnée
$c$	Viscosité
$F_i$	Force dynamique verticale
$M_j^*$	Masse modale du plancher
$P_{jl}^*$	Force totale dans le mode considéré
$P_i$	Force dynamique surfacique

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Mise en contexte

L'étude des vibrations est une discipline très importante dans le domaine de l'ingénierie et de la construction. Elle a pour fonction de comprendre le comportement vibratoire des structures pour ensuite pouvoir contrôler le phénomène. Les vibrations peuvent être produites par différentes sources telles que la marche de piétons, une activité sismique ou encore de l'activité industrielle.

Le contrôle des vibrations apporte un certain nombre d'avantages. Ils se retrouvent dans le confort des usagers mais aussi dans la minimisation d'impacts structurels. Ces vibrations peuvent engendrer d'un côté des perturbations et des désagréments mais aussi, si elles ne sont pas contrôlées, des dégâts aux structures. En plus du confort, on y retrouve alors un enjeu économique et sécuritaire. La problématique des vibrations se retrouve aussi bien dans des structures telles que des ponts et passerelles que dans des planchers. En fonction de l'utilisation qui en est faite, ces structures nécessitent un contrôle des vibrations plus ou moins important. Elles sont d'autant plus importantes à considérer pour des salles de concerts, salles de sport, des passerelles piétonnes, laboratoires ...

L'anticipation des comportements dynamiques des structures doit notamment passer par la prise de mesures expérimentales. Un grand nombre de paramètres influencent les résultats. Il est donc important de pouvoir les identifier, quantifier leurs effets et répéter les mesures. Cela permet alors la création de modèles numériques de plus en plus perfectionnés. De cette façon, la conception des structures peut être améliorée et optimisée. Dans le cadre de l'étude des vibrations, la détection de stationnarité ou non au sein d'un signal est très importante. Un signal vibratoire est dit stationnaire lorsque ses caractéristiques statistiques peuvent être considérées constantes dans le temps. Le fait d'évaluer si le comportement dynamique peut être caractérisé comme tel permet de déterminer les méthodes d'analyse et de modélisation appropriées.

Le présent travail porte plus précisément sur l'étude des vibrations induites par des piétons dans des planchers. D'un côté, il existe déjà des méthodes pour modéliser et approcher l'effet d'une personne sur un plancher. De l'autre, il est également possible d'étudier l'effet d'une foule sur une structure. Cependant, lorsqu'on étudie les vibrations sous un grand nombre de piétons, l'hypothèse de la stationnarité doit être posée. Il reste alors des incertitudes quant au nombre de piétons nécessaires pour atteindre un état stationnaire. De ce fait, le comportement dynamique des planchers pour un nombre intermédiaire de personnes entre 1,2,3 personnes et une foule demande encore à être étudié. Le questionnement qui a donc servi de fil conducteur tout au long de ce travail est le suivant.

**« Sous l'effet de sollicitations piétonnes, à partir de quelle(s) configuration(s) la réponse vibratoire obtenue peut elle être considérée comme stationnaire ? »**

---

## 1.2 État de l'Art

Dans le cadre de ce travail, les comportements vibratoires de différents planchers sont étudiés. Ils peuvent être déterminés via l'équation du mouvement appliquée à la dynamique des structures. Cette équation se retrouve dans un grand nombre de travaux. Elle est détaillée notamment dans les notes de cours d'analyse des structures 2 (Denoël, 2017), (Clough & Penzien, 2003) mais aussi à la base de travaux de recherches (Huysmans, 2019).

L'équation prend la forme suivante :

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = p(t) + W \quad (1.1)$$

La résolution de cette équation nécessite la connaissance de différents paramètres. On y retrouve :

- La masse dynamique du plancher
- Les fréquences propres
- L'amortissement dynamique
- La rigidité de la structure
- Les sollicitations induites par les piétons

Cette équation peut être utilisée dans différents cas de figure. Elle convient à un système à un seul degré de liberté comme à un système possédant plusieurs degrés de liberté. Sa résolution peut se faire via l'utilisation d'éléments finis ou par l'utilisation du principe de superposition modale. Ce principe se traduit par la résolution de l'équation du mouvement en considérant un système à plusieurs degrés de liberté comme une superposition d'équations à un seul degré de liberté.

Les valeurs des différents paramètres dynamiques d'une structure se voient discutées d'une référence à l'autre. Un tableau comparatif est dressé concernant les valeurs que peut prendre le coefficient d'amortissement dynamique selon différentes sources.

	Sétra, 2006	Denoël, 2017	Bachmann & Ammann, 1987	Hivoss, 2007
Béton (BA)	1.3%	1% à 2%	1.3%	2%
Béton (BP)	1%	/	1%	/
Acier	0.4%	0.1% à 1%	0.4%	1%
Mixte	0.6%	/	0.6%	1%
Bois	3%	2% à 5%	1.5%	6%

TABLE 1.1 – Comparaison du coefficient d'amortissement

### 1.2.1 Effet d'un piéton

Afin de modéliser la sollicitation d'un piéton, son comportement dynamique peut être approché. La sollicitation verticale  $p_v(t)$  peut être décomposée en une série de Fourier. Chaque terme de la somme représente la contribution d'une harmonique du pas. Cette somme s'étend à l'infini mais n'est généralement pas considérée au-delà du cinquième terme. De nombreuses sources utilisent et mentionnent cette équation de sollicitation induite par un piéton. On retrouve (Bachmann & Ammann, 1987), (Rainer & Pernica), (NGuyen), (Tubino & Piccardo, 2011, 2012) et encore différents travaux (Lemay, 2012), (Sétra, 2006), (Bodgi), (Pécol, 2011), (Huysmans, 2019), (Wang et al., 2020), (Dong & Ye, 2023).

L'équation prend la forme suivante :

$$p_{v,i}(t) = \sum_{n=1}^k W_i \alpha_n \sin(2\pi n f_i t - \phi_n) \quad (1.2)$$

- $W_i$  est le poids du piéton  $i$ .
- $k$  est le nombre d'harmonique du pas considéré.
- $\alpha_n$  est l'amplitude de Fourier dépendant de l'harmonique.
- $f_i$  est la fréquence du pas.
- $\phi_n$  est le déphasage.

Différentes valeurs sont proposées concernant l'amplitude de Fourier. Le tableau 1.2 illustre les valeurs proposées par Bachmann & Ammann (1987), Rainer & Pernica ainsi que deux autres personnes. Ces dernières proviennent de données rassemblées dans un mémoire à l'université de Sherbrooke (Lemay, 2012).

	Bachmann & Ammann, 1987 Données à 2Hz	Rainer & Pernica Valeurs maximales	Ellis (Lemay, 2012) Données à 2Hz	Kerr (Lemay, 2012) Données à 2Hz
$\alpha_1$	0.37	0.58	0.45	0.4051
$\alpha_2$	0.1	0.26	0.07	0.07
$\alpha_3$	0.12	0.12	/	0.06
$\alpha_4$	0.04	0.08	/	0.05
$\alpha_5$	0.08	/	/	0.03

TABLE 1.2 – Amplitude de Fourier

Des liens ont été déterminés entre la vitesse de marche, la fréquence du pas mais aussi la foulée. Cela peut être illustré sur la figure suivante.

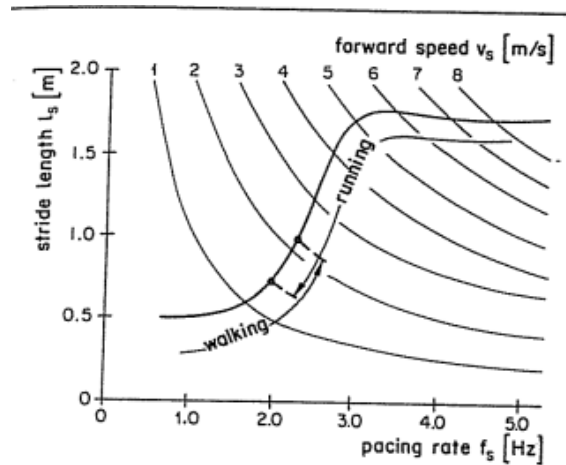


FIGURE 1.1 – Relation entre la vitesse du pas, la fréquence et la foulée par Bachmann & Ammann, 1987

L'équation 1.2 exprime la sollicitation verticale induite par des piétons sur une structure. Elle est valide plus particulièrement pour de la marche. Cela signifie que le piéton exerce toujours une force sur le sol lorsqu'il est en mouvement. De là, la fonction de temps de chargement peut être définie. La charge induite par un pas d'un piéton lors de la marche prend une forme particulière. Cela est illustré à la figure 1.2.

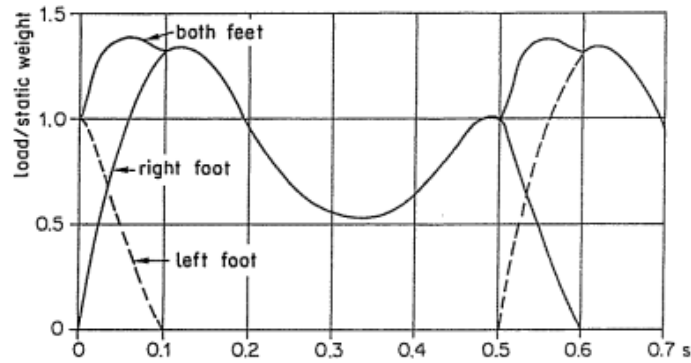


FIGURE 1.2 – Fonction de temps de chargement lors d'un pas par Bachmann & Ammann, 1987

### 1.2.2 Effet d'une foule

Le déplacement d'une foule peut causer des vibrations très importantes dans une structure élancée. Modéliser le comportement d'une foule est donc critique au niveau de la prédiction des comportements des structures. Cependant, cela peut être rendu difficile en raison du caractère aléatoire de l'activité de chaque piéton. C'est pourquoi un modèle spectral est utilisé pour déterminer la charge de marche de la foule. Lorsqu'une foule est représentée, la quantité associée n'est plus exprimée en nombre de piétons mais en densité de piétons (piéton/ $m^2$ ).

Ce modèle spectral se base généralement sur des hypothèses simplificatrices comme la stationnarité du signal. On retrouve également des hypothèses sur la forme supposée, des modes comme une fonction sinusoïdale. Dans ce type de modèle, seules la première et la deuxième harmonique de la série de Fourier définissent la charge de marche. Moins de références existent sur la modélisation de foule, on retrouve cependant quelques travaux (Dong & Ye, 2023)(Want et al., 2020)(Tubino & Piccardo, 2011, 2012).

Deux problèmes clés sont à résoudre lors de l'utilisation d'un modèle spectral. Le premier concerne les sources de données car elles sont nécessaires pour approcher au mieux le comportement réel. Il manque de support expérimental; les données concernant les comportements de foules résultent principalement de l'analytique. Le second concerne l'effet de la densité de la foule sur la charge de marche. Il existe trois scénarios principaux :

- Trafic illimité. La densité est inférieure à 0.5 piéton/ $m^2$ . Les piétons sont libres de marcher à la fréquence qu'ils veulent
- Trafic restreint. La densité est comprise entre 0.5 et 1.5 piéton/ $m^2$ . La liberté des piétons est limitée.
- Trafic exceptionnellement restreint. La densité est supérieure à 1.5 piéton/ $m^2$ . La marche des piétons est désagréable, ils ne choisissent pas la vitesse de leur marche.

La fréquence moyenne des piétons est généralement assimilée à une variable aléatoire gaussienne,  $f_m = 2$  Hz avec  $\sigma_{f_m} = 0.17$  Hz selon Chen, 2020. Les forces induites par la marche pour ces gammes de fréquences données peuvent être superposées afin de simuler la force d'une foule au cours du temps. Cette dernière est alors ensuite utilisée dans le modèle. On considère alors que la charge est périodique avec une synchronisation imparfaite entre les différents acteurs.

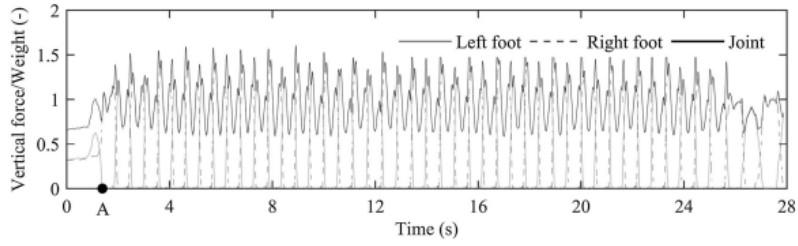


FIGURE 1.3 – Force de marche d’un piéton isolé par Chen, 2020

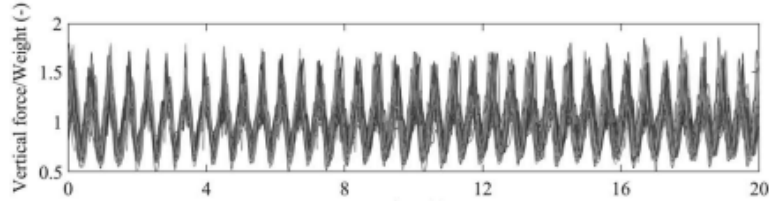


FIGURE 1.4 – Force de marche d’une foule par Chen, 2020

La représentation d’une foule peut être affectée par différents effets comme l’effet de foule, la synchronisation ou encore la résonance. Des facteurs de réduction peuvent alors être déterminés, permettant de réduire l’accélération du plancher selon l’importance de ces effets.

Par exemple, le facteur de réduction de foule peut être mentionné. Il permet de quantifier en partie l’effet de foule. Ce facteur prend en compte l’écart type qui peut être observé entre les différentes fréquences au sein d’une foule pour une harmonique donnée. Plus l’écart type est élevé et plus le coefficient diminue. Cela signifie que si l’effet de foule est grand, la variabilité de la sollicitation est plus grande et donc l’accélération finale du plancher est plus faible.

Ces facteurs permettent alors d’éviter de surestimer la réponse vibratoire de la structure. Ils prennent en compte le fait que l’ensemble de la foule n’agit pas de la même façon. Ces effets sont discutés par Dong & Ye, 2023.

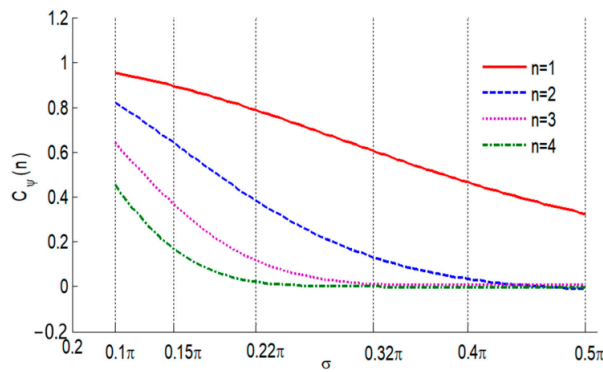


FIGURE 1.5 – Évolution du facteur de réduction de foule par Dong & Ye, 2023

Cette figure illustre donc l’évolution du facteur de réduction de foule en fonction de l’écart type de la fréquence moyenne mais aussi de l’harmonique considérée. Le coefficient relatif à la première harmonique possède une borne minimale tout comme les autres coefficients de réduction. Il peut être observé que dans certaines configurations, les harmoniques supérieures peuvent être entièrement négligées.

---

## 1.3 Objectifs

Les objectifs de ce travail sont énoncés dans cette section. Ils décrivent les étapes clés qui ont séquencé la recherche.

1. Réaliser une première base de données permettant de sélectionner des planchers intéressants pour la suite du travail.
2. Réaliser un nombre satisfaisant de prises de mesures sur des planchers de propriétés différentes mettant un oeuvre le plus de participants possible.
3. Établir une base sur laquelle comparer les différents signaux comprenant la définition d'un indice de stationnarité.
4. Pouvoir interpréter et comprendre les résultats expérimentaux.
5. S'approcher numériquement des résultats expérimentaux via la programmation d'un modèle simple.
6. Étudier la stationnarité dans les signaux.

---

## 1.4 Note d'hypothèse

Lors de ce travail, certaines hypothèses ont été émises dans le but de faciliter le traitement des données mais aussi l'implémentation du modèle numérique. Les hypothèses générales sont reprises dans cette section. Certaines hypothèses plus spécifiques peuvent être énoncées à différents points du travail. Leur localisation est indiquée dans cette section.

1. La masse volumique du béton est considérée égale à  $2400 \frac{kg}{m^3}$ .
2. La masse volumique du bois lamellé collé est compris entre  $400 \frac{kg}{m^3}$  et  $800 \frac{kg}{m^3}$ .
3. Le coefficient d'amortissement dynamique peut atteindre une valeur de 15% lorsqu'un revêtement spécifique est installé sur le plancher.
4. La masse dynamique considérée est la moitié de la masse totale du plancher.
5. La vitesse des piétons est comprise entre 1.1 m/s et 2.2 m/s. La moyenne est de 1.65 m/s.
6. La masse moyenne d'un piéton est de 800N (Bachmann, 1987). L'écart type par rapport à cette moyenne est considérée à 150N.
7. Les cinq premières harmoniques du pas doivent être prises en compte. Les amplitudes de Fourier associées sont considérées constante et égales aux valeurs proposées par Bachmann reprises dans le tableau 3.1.
8. Lorsqu'une représentation numérique est validée, elle peut être utilisée afin de représenter un test de plus grande échelle en terme de taille de plancher et du nombre de participants.
9. La vitesse d'un piéton donné est déterminée aléatoirement et considérée constante tout au long de la modélisation.
10. Le coefficient d'amortissement est considéré constant et ne dépendant pas du nombre de piétons.
11. La modélisation ne prend pas en compte un possible choc entre les piétons. L'effet des piétons est donc simplement additionné.
12. La géométrie des planchers est supposée rectangulaire dans le cadre de la modélisation
13. Les fréquences propres considérées se trouvent en dessous de 20 Hz.
14. Les hypothèses faites quant aux modes de vibrations selon le plancher concerné se retrouvent à la section 2.5.
15. Les planchers sont considérés initialement au repos.
16. Les planchers sont considérés parfaits.
17. La précision autour de la fréquence des modes est de l'ordre de  $10^{-1}$ .
18. L'effet du mobilier et autres présents sur les planchers est négligé.



# Chapitre 2

## Partie expérimentale

Dans le cadre de ce mémoire, des tests expérimentaux sont effectués. Il a donc fallu trouver des planchers correspondant à des critères établis au préalable. Ceux-ci sont discutés au point 2.2. Une fois les autorisations obtenues pour accéder aux locaux concernés, la suite des opérations s'articule en deux phases : une phase de tests préliminaires et une phase de prise de mesures principales.

Les tests préliminaires ont pour utilité de déterminer la première fréquence propre des planchers testés. Cela permet d'évaluer si le test suivant a un intérêt d'être réalisé. Cette première prise de mesures permet également de dresser une certaine base de données. Les informations telles que la fonction de la pièce, la portée du plancher, la structure portante ainsi que la fréquence propre associée sont alors récoltées.

La prise de mesures principales permet d'obtenir l'évolution de l'accélération du plancher en fonction du nombre de piétons. Les tests sont effectués via un procédé établi à l'avance et communs entre eux. C'est sur base de ces dernières prises de mesures que la suite du travail est construite. Elles servent alors à analyser expérimentalement l'évolution de la stationnarité du signal mais aussi à valider une représentation numérique des tests. Cela permet ensuite de modéliser différentes configurations afin de rencontrer les objectifs fixés au point 1.3.

### 2.1 Matériel de mesure - USB Accelerometer Data Logger

Les instruments de mesure utilisés sont des accéléromètres. Ils permettent donc de mesurer l'accélération qu'ils subissent et ce dans trois directions. Dans ce cas, seule l'accélération verticale est considérée. Le chargement des données est relativement simple car le capteur possède un port USB intégré.

Afin de démarrer la prise de mesure, un bouton d'allumage se trouve sur une extrémité du capteur. En maintenant une pression sur celui-ci, un indicateur lumineux s'allume. Après quelques secondes, le bouton peut être relâché et la prise de mesure commence directement. Il est aisé de s'assurer que la capteur est en marche car l'indicateur lumineux se met à clignoter. La même manipulation est à refaire pour arrêter le capteur, lorsque la lumière arrête de clignoter le bouton peut être relâché.

D'après la configuration du capteur, l'accélération est enregistrée toutes les 0.004s et exprimée en g. Sa précision est relativement importante et est de l'ordre de  $10^{-15}$ . L'instrument de mesure a une autonomie estimée entre 6h et 18h. Lorsque la durée de la prise de mesure dépasse un certain temps, en l'occurrence 6 minutes, le capteur crée automatiquement un nouveau fichier. Cela implique que plusieurs fichiers doivent être téléchargés pour un seul test. Il faut donc reconstruire le signal en entier lors du traitement de données.



FIGURE 2.1 – Capteur & socle

## 2.2 Tests préliminaires

Le début de la partie expérimentale du travail consiste en la recherche de planchers correspondant à certains critères. Ceux-ci peuvent être techniques comme pratiques. Ils permettent d'orienter la recherche et d'obtenir un ensemble d'échantillons relativement semblables permettant des comparaisons. Les critères de sélection sont les suivants :

- Portée du plancher aux alentours de 8 m ou plus.
- Fréquence propre de préférence entre 5 Hz et 10 Hz.
- Lieu permettant éventuellement d'avoir accès à des participants déjà présents sur site.
- Bonne accessibilité (localisation, disponibilité, possibilité de vider le local)

Pour notamment trouver des locaux de portée satisfaisante, une démarche administrative est entreprise afin d'obtenir les plans des bâtiments concernés. La portée des planchers est donc le premier élément recherché permettant de trouver des planchers pouvant potentiellement convenir. Les plans sont alors analysés et une demande d'intervention sur site est formulée. Ensuite, les tests préliminaires sont réalisés et analysés.

### 2.2.1 Méthodologie

#### 1. Préparation du matériel.

Le procédé est relativement simple et rapide. Cette première phase consiste à fixer le capteur sur un socle rigide lourd, et à le positionner sur le plancher étudié. Celui-ci possède une bonne adhérence avec l'adhésif utilisé, ce qui permet d'éviter aux capteurs d'enregistrer des déplacements parasites. Comme le capteur est relativement léger, lors de saut sur le plancher, il pourrait sautiller. Cela est évidemment à proscrire d'où l'utilité de le fixer au socle.

#### 2. Préparation du test.

Il n'est pas nécessaire de vider le local de son mobilier pour les tests préliminaires. Il faut cependant pouvoir y circuler librement. Le mobilier gênant est alors légèrement déplacé si nécessaire. Une fois prêts, les capteurs sont allumés. Le test ne démarre pas directement car il est préférable de mettre en mouvement de manière grossière les instruments de mesure afin d'obtenir des données aberrantes. Cela permet alors de visualiser par la suite le moment à partir duquel le test a réellement commencé. A la fin du test, une opération similaire peut être reproduite également. Il est important de prendre note de la position des capteurs utilisés. Lors de l'analyse des données, il est important d'avoir toutes les informations pour pouvoir interpréter les résultats.

---

### 3. Déroulement du test.

Une fois que tout est prêt, le test peut commencer : un ou plusieurs piétons se mettent en mouvement durant une durée totale de 5 minutes. Il est supposé que cette durée est suffisante pour exciter le plancher de manière satisfaisante. Quelques sauts peuvent être réalisés. Les personnes doivent faire attention à quelques points :

- Faire varier la fréquence de leurs pas.
- Ne pas se caler sur le même rythme qu'un autre piéton si le test préliminaire est effectué à plusieurs.
- Se déplacer de manière aléatoire.

Une fois la durée du test écoulée, le capteur est éteint de la façon mentionnée précédemment. Les résultats peuvent être obtenus via le port USB du capteur. Une routine Matlab fournie par le professeur Vincent Denoël permet de directement traiter les données en exprimant l'accélération enregistrée dans le domaine fréquentiel. Cela permet d'identifier visuellement la fréquence propre de la structure testée.

### 4. Remarques.

Les premiers tests préliminaires ont été réalisés avec deux capteurs tandis que les suivants l'ont été avec un seul uniquement. Le positionnement de capteur se fait généralement vers le centre de la pièce. Dans le cas de plusieurs instruments de mesure, ils sont placés à un  $1/3$  et  $2/3$  de la longueur de la travée. Il est important de notifier que si le capteur est placé exactement au centre du plancher, il est possible que la seconde fréquence propre ne soit pas enregistrée comme le capteur serait positionné sur le noeud du mode. C'est donc notamment pour cette raison qu'il est important de prendre note de la position des capteurs. Dans cette première prise de mesures, la visualisation de l'entièreté des modes de vibration n'est pas forcément recherchée car ils peuvent être visualisés plus clairement après les tests principaux. De plus, la durée du test préliminaire ainsi que le faible nombre de piétons ne permet pas forcément de les visualiser.

## 2.2.2 Résultats

La procédure décrite précédemment a été reproduite un certain nombre de fois afin de trouver des structures répondant aux attentes. L'ensemble des données collectées sont reprises dans le tableau 2.1. Les planchers sélectionnés pour la suite de la recherche expérimentale sont mis en évidence.

Les différents tests ont été principalement localisés dans quelques établissements. Afin de pouvoir nommer les planchers ayant la même fonction provenant d'endroits différents, les appellations suivantes sont utilisées. On retrouve donc les établissements suivants :

- Institut Saint François-Xavier 2 [SFX2]
- Institut Notre Dame Heusy [ND]
- Athénée Royal Verdi [ARV]
- École maternelle et primaire Sainte Elisabeth [SE]
- Les Minières à Verviers
- Salle de fête les Comagnes

Afin d'exemplifier les résultats, le test effectué dans la bibliothèque à SFX2 est illustré. Deux capteurs ont été placés aux emplacements indiqués sur la figure 2.2. Nous pouvons constater que le plancher est divisé en deux par une cloison. La seconde partie est inoccupée. Le plancher total est supporté par des poutres placées dans la largeur tous les 4 mètres. Il est donc composé de 5 travées. Le capteur n°4 est placé au milieu de la troisième travée. Cela signifie qu'il est placé au centre du plancher total. Le capteur n°6 est quant à lui placé sur la deuxième travée.

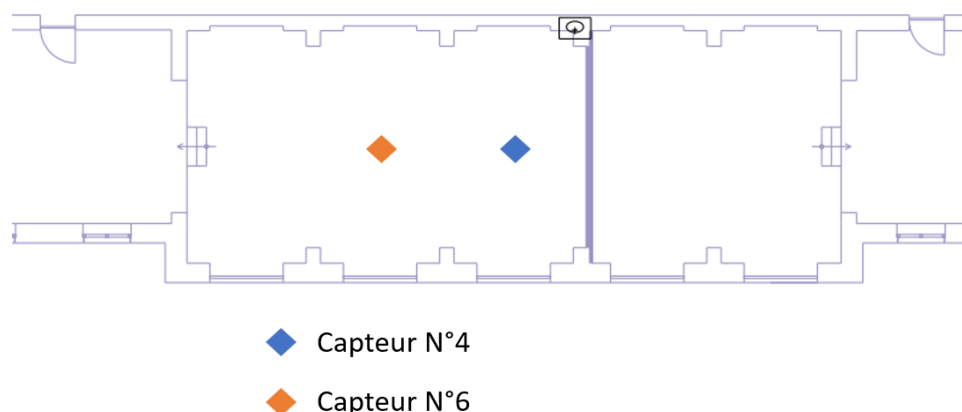


FIGURE 2.2 – Test préliminaire - Disposition des capteurs dans la bibliothèque

Après avoir réalisé le test avec deux piétons durant une période de 5 minutes, les résultats suivants ont été obtenus. L'accélération dans le domaine fréquentiel peut être exprimé en axe logarithmique ou en axe cartésien. Il est parfois préférable d'afficher les deux afin de pouvoir visualiser correctement les pics.

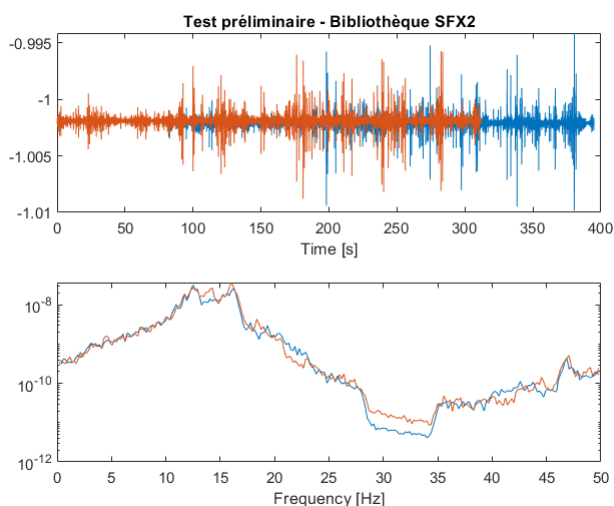


FIGURE 2.3 – Axe logarithmique

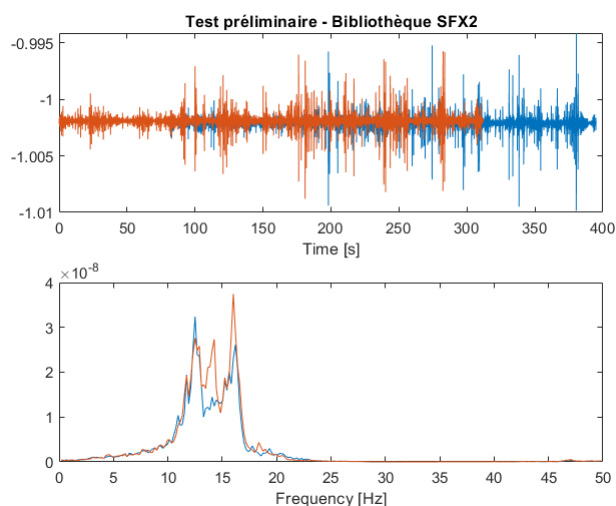


FIGURE 2.4 – Axe cartésien

Il peut être constaté que le capteur n°4 affiché en bleu n'enregistre que deux pics alors que l'autre enregistre 3. Cela est dû à l'emplacement des capteurs. Le capteur n°4 est alors peut être situé sur un noeud d'un des modes, en l'occurrence probablement le second mode.

Sur base de ces deux prises de mesure, nous pouvons conclure que le premier mode est à 12.5 Hz, le second à 14.3 Hz et le troisième à 16 Hz. Il faudra par la suite vérifier ces différentes valeurs avec l'accélération mesurée lors des tests principaux aux différents capteurs.

Établissement	Fonction/Désignation	Portée [m]	Structure portante	$f_1$ [Hz]	Plan
SFX2	Classe 1	12.4	Hourdis béton	7.6	✓
	Classe 2	12.4	Plancher bois	14.2	✓
	Hall sportif	9.8	Plancher béton	15.6	✓
	Bibliothèque	8	Poutrelle acier + dalle béton	12.5	✓
ND	Classe 1	9.8	Poutres + dalle béton	13.2	✓
	Classe 2	9.8	Poutres + dalle béton	13.2	✓
	Classe 3	9.8	Poutres + dalle béton	13.2	✓
	Classe 4	9.8	Poutres + dalle béton	14.2	✓
	Classe 5	9.8	Poutres + dalle béton	14.2	✓
	Classe 6	7.3	Poutres + dalle béton	11.2	✓
	Classe 7	7	Poutres + dalle béton	14.2	✓
	Classe 8	7	Poutres + dalle béton	12.2	✓
	Classe 9	7	Poutres + dalle béton	13.2	✓
	Salle d'expression	8	Poutres + dalle béton	11.7	✓
	Extension	6.8	Poutres bois et panneaux CLT	10.3	✓
Salle de répétition	7.5	Poutres bois et panneaux CLT	11.2	✓	
Salle d'étude	12.2	Poutre béton + dalle	9.3	✓	
ARV	Classe 1	8.2	Hourdis béton	16.6	✓
	Classe 2	8.2	Hourdis béton	13.7	✓
	Local laboratoire	6.8	Hourdis béton	14.6	X
	Hall sportif	12	Poutres + dalle béton	18.6	X
	Réfectoire	14.4	Poutres + dalle béton	13.2	X
	Couloir	7	Hourdis béton	12.2	X
SE	Classe 1	6.4	Hourdis béton	11.2	X
	Classe 2	6.2	Plancher bois	9.3	X
Les Minières	Salle de gym	13	Poutre béton + Plancher bois	24.9	X
	Buvette	7	Hourdis béton	11.7	X
Les Comagnes	Salle de fête	10	Dalle béton	22.0	X

TABLE 2.1 – Ensemble des données récoltées sur les différents planchers

Les informations synthétisées dans le tableau 2.1 doivent être utilisées avec une certaine précaution. Il y a une certaine zone d'incertitude autour de celles-ci en raison du manque d'informations disponibles pour certains planchers. Les plans fournis ne sont pas tous très précis ou même complets. Il est arrivé que certains plans n'aient pas été obtenus car ceux-ci ont été perdus dans les archives. Dans la colonne « plan » du tableau, une croix est indiquée lorsque les plans n'ont pas été récupérés ou manquaient significativement de données.

La portée indiquée dans le tableau est définie comme la distance entre les éléments porteurs verticaux. Dans certains cas, par manque d'informations, la structure portante ainsi que la portée ont été estimées sur base d'observations et de mesures sur site mais aussi des données disponibles sur plans. Comme ces informations sont utiles pour la modélisation, il est important qu'elles soient le plus fidèles possible. La sélection des planchers pour la suite des mesures prend donc en considération ce critère.

Il faut également noter que la fréquence propre du plancher est ici utilisée afin de classifier et sélectionner les planchers pour la suite des mesures. Elle doit être réévaluée afin de modéliser le test principal. La fréquence propre mesurée pendant ce second test peut varier du premier pour différentes raisons :

- Le répartition du poids appliqué sur le plancher varie
- Le nombre de capteurs augmente
- La position des capteurs est plus étendue et permet d’observer le contenu fréquentiel via différents points de la structure
- La fréquence propre est définie via une méthode graphique.

Dans le cadre de ce travail, 5 structures ont été sélectionnées pour la suite des prises de mesure. Elles sont mises en évidence dans le tableau 2.1 et dans la figure 2.5.

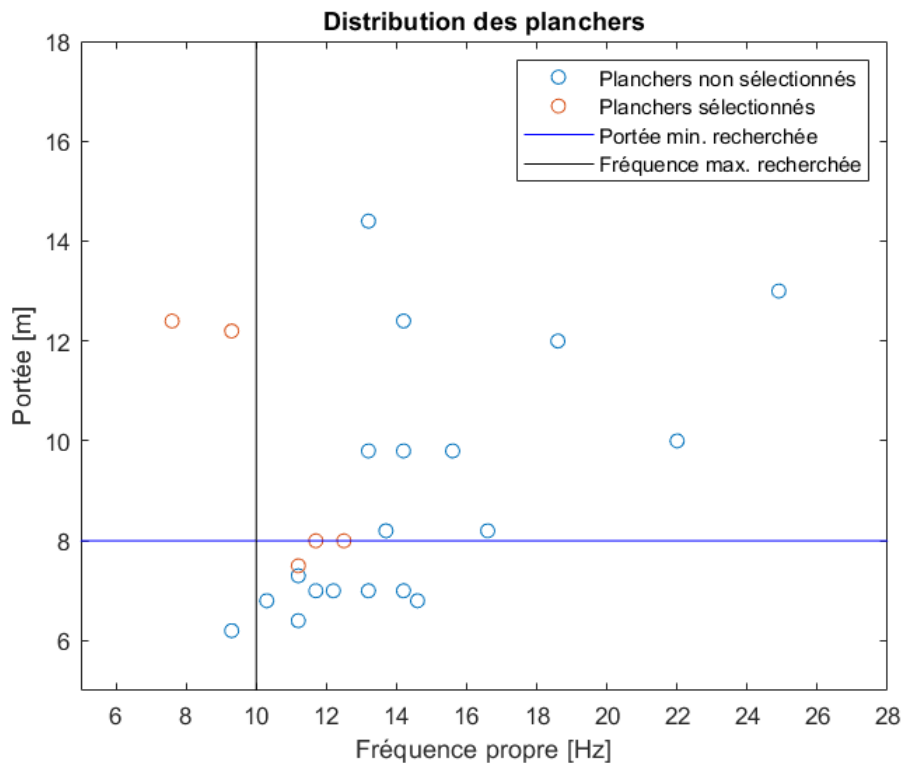


FIGURE 2.5 – Tests préliminaires - Distribution des planchers

Suivant la distribution des différents planchers en fonction de leurs caractéristiques, nous pouvons constater que deux planchers correspondent entièrement aux critères établis initialement :

- La classe 1 à SFX2
- La salle d’étude à ND

Afin d’agrandir l’échantillon de tests, trois autres planchers sont sélectionnés. En tenant compte de la proximité des caractéristiques aux critères initiaux, la disponibilité et la variabilité des informations les concernant, sont choisis :

- La bibliothèque à SFX2
- La salle d’expression à ND
- La salle de répétition à ND

---

## 2.3 Méthodologie des tests principaux

### Objectif

Ce test a pour objectif d'étudier l'évolution des vibrations dans un plancher en fonction du nombre de piétons. A l'aide des mêmes capteurs que précédemment, l'accélération verticale de la structure en fonction du temps est obtenue. A partir de cette prise de mesure, nous nous intéresserons à la stationnarité du signal. Les données seront analysées afin de déterminer si à partir d'un certain nombre de personnes, il existe une convergence vers un état stationnaire. Les tests expérimentaux sont cependant limités au niveau du nombre de piétons mis en circulation. Les prises de mesures peuvent donc également servir à établir une base de données tout en permettant de vérifier les résultats proposés par des modèles de calcul.

### Procédure

#### 1. Préparation du local

Afin de libérer l'espace dans la zone de test, il est nécessaire d'enlever le mobilier susceptible d'empêcher une bonne mobilité. Dans des classes, les bancs et les chaises sont donc idéalement retirés de la pièce. Si cela n'est pas possible, ils sont alors placés et empilés le long d'un mur afin d'obtenir l'espace désiré.

Ensuite, il faut choisir l'emplacement des capteurs. Pour cette prise de mesure ils sont au nombre de trois. Les engins de mesure ne sont pas placés le long des murs car les déplacements du plancher à ces endroits y sont souvent plus faibles. Idéalement, ils sont placés de manière à être alignés symétriquement sur l'une de ses médianes. On retrouve donc un capteur au centre de la pièce et deux autres à équidistance de ce dernier. Cela permet ainsi d'obtenir une mesure au centre du premier mode de vibration et deux autres mesures à des positions opposées qui pourront être comparées entre elles.

#### 2. Prise de note

Il faut ensuite prendre le temps de noter l'emplacement des différents capteurs. Cela permet de garder une trace du test et de pouvoir le réaliser par la suite à nouveau à l'identique. J'ai donc mesuré à l'aide d'un décimètre les positions par rapport à des points de référence, des différents engins de mesure. D'un test à l'autre il est important de placer les mêmes capteurs aux mêmes positions. Cela permet d'éviter tout risque d'erreur lors du traitement de données. Le fait d'établir une certaine rigueur dans la réalisation des tests permet également par la suite de représenter le plus fidèlement possible la situation dans un modèle numérique.

#### 3. Explication du procédé

Dans le but de représenter une surface sur laquelle dès qu'une personne en sort, une autre rentre, les piétons imitent le comportement d'une boule de billard avec la délimitation extérieure. Ils vont donc se déplacer en ligne droite jusqu'à rencontrer un mur et repartir dans une autre direction toujours en ligne droite.

A cela se rajoute une notion temporelle. Au départ, une seule personne marche seule durant une période de 2min. A la fin de cette période, un deuxième piéton est rajouté. Toutes les deux minutes, un piéton supplémentaire est ajouté jusqu'à arriver au nombre total de participants. Cela signifie que si le test est effectué avec 15 personnes, la prise de mesure dure 30 minutes, avec la première personne ayant marché l'entièreté de la durée et la dernière uniquement les deux dernières minutes.

De cette façon, il est possible d'observer si le signal tend vers un état stationnaire pour un nombre de personnes donné lors de la période de deux minutes avant incrémentation. L'avantage de ce procédé est qu'il est assez facile à représenter numériquement. En gardant l'étape de modélisation en tête, il est également demandé aux participants d'établir un ordre de passage en indiquant le poids de chacun.

---

La prise de mesure doit être effectuée au minimum trois fois par plancher. Cela permet donc de comparer les différents résultats obtenus pour des configurations semblables et d'en observer les différences s'il y en a. La répétition du test a pour but d'éviter de tirer des conclusions trop hâtives sur une base de données trop faible.

#### 4. Démarrage et arrêt du test

A l'allumage des capteurs, il est préférable de les déplacer de manière aléatoire afin d'obtenir des données aberrantes. De cette façon, il est facile de repérer la période de démarrage lors du traitement des données.

La fin du test quant à elle est indiquée aux participants et il leur est demandé de s'arrêter de marcher instantanément. Il n'est pas nécessaire ici de manipuler les capteurs, ils peuvent être éteints directement. L'arrêt instantané du mouvement des piétons suffit pour repérer la fin du test dans les mesures.

#### 5. Précautions à prendre

Comme le test est réalisé dans une école avec des élèves, il faut prendre en compte certains éléments :

- La disponibilité des élèves s'étend généralement à une heure de cours, l'équivalent de 50min. Il ne faut donc pas prendre un nombre de participants trop important afin de ne pas s'étendre sur leur prochain cours. Il faut évidemment éviter d'être contraint d'arrêter la prise de mesure en cours de route.
- La concentration mentale des étudiants diminue en fonction du temps mais aussi du nombre qu'ils sont dans la pièce. Le test ne doit alors pas durer trop longtemps afin d'éviter que la fin ne soit bâclée.

De manière plus générale, d'autres éléments sont à surveiller et à éviter :

- Il arrive que les piétons aient tendance à se regrouper et donc à marcher au même rythme.
- A partir d'un certain nombre de personne en mouvement, les piétons tendent à ne plus se déplacer en ligne droite et à « rebondir » contre les murs mais plutôt à tourner en rond dans la pièce.

Pour l'ensemble de ces raisons, il semble que le nombre de périodes de 120s soit au maximum égal à 15 pour des étudiants. Au-delà, la qualité du test pourrait être altérée par un manque de fidélité progressif au procédé décrit. Moins le procédé est respecté et plus la différence entre les tests expérimentaux et la modélisation est importante.

Notons qu'afin de pouvoir réaliser des tests avec plus de 15 personnes, il a été décidé d'ajouter deux personnes pendant les premières périodes du test. De cette façon, pour 20 piétons, durant les 5 premières périodes il y a 2 personnes envoyées en même temps. Le procédé est semblable, ceux-ci se dispersent dès le départ et marchent à leur propre rythme. Il est important de garder les périodes de marche à piétons constant aux alentours de 2min. De cette manière, il peut être supposé que le signal s'est stabilisé. Il faut prendre en compte le fait qu'à chaque fois qu'un piéton est rajouté, le signal entre dans une période transitoire. La prise de mesure doit donc être relativement plus longue afin de pouvoir observer un effet de stationnarité.

Les trois capteurs utilisés sont par la suite nommés via le numéro qui les représente. On retrouve alors le capteur 99430, 02393 et C9CE5.



---

## 2.4 Traitement des données

### 2.4.1 Reconstruction du signal

La première étape à réaliser afin de pouvoir utiliser les données est de reconstruire le signal. Le capteur est programmé de sorte à réaliser des fichiers contenant 6 minutes d'enregistrement maximum. Cela signifie donc que les tests préliminaires tenaient sur une seule sauvegarde et pouvaient être exploités tels quels tandis que les tests principaux ont été découpés en un certain nombre d'enregistrements. Il a donc fallu les joindre bout à bout pour obtenir un signal complet unique. Sans cela, la manipulation des données n'est pas envisageable.

En créant des sauvegardes intermédiaires, un nom ainsi qu'un numéro sont attribués aux fichiers. Un ordre chronologique leur est assigné. De cette façon, il est aisé d'identifier la chronologie des sauvegardes. Il est cependant plus prudent de procéder à une vérification. L'heure à laquelle le fichier est enregistré est accessible ce qui permet de s'assurer de l'ordre.

Une fois que les signaux ont été assemblés, il faut en retirer la partie qui nous intéresse. En effet, au début du test, un certain laps de temps s'écoule entre l'allumage des trois capteurs, la sortie de la zone de test ainsi que le saut de départ. Il en est de même pour la fin du test, une certaine période s'écoule entre l'arrêt des piétons et l'extinction des capteurs. Cela implique également que le début des tests est décalé d'un engin de mesure à l'autre. Il faut donc identifier les parties correspondantes des signaux.

Généralement, le décalage est assez faible et peut assez vite être identifié selon certains points de référence comme des pics. La séquence temporelle qui doit être découpée correspond au nombre de périodes enregistrées lors du test. Si la prise de mesure s'est déroulée avec 15 personnes avec des périodes de 2min, il faut veiller à ressortir 1800s de données. Comme les résultats vont être comparés entre eux, les signaux doivent être établis sur une structure temporelle commune, un nombre entier de répétitions à durées égales.

A la figure 2.6, le traitement réalisé aux données brutes assemblées est illustré. Les pics indiquant le début et la fin du test sont facilement identifiables. Le cadre rouge montre donc la proportion du signal qui est gardée. Dans ce cas, la séquence temporelle est de 1800s. Il s'agit d'un test réalisé avec 15 piétons.

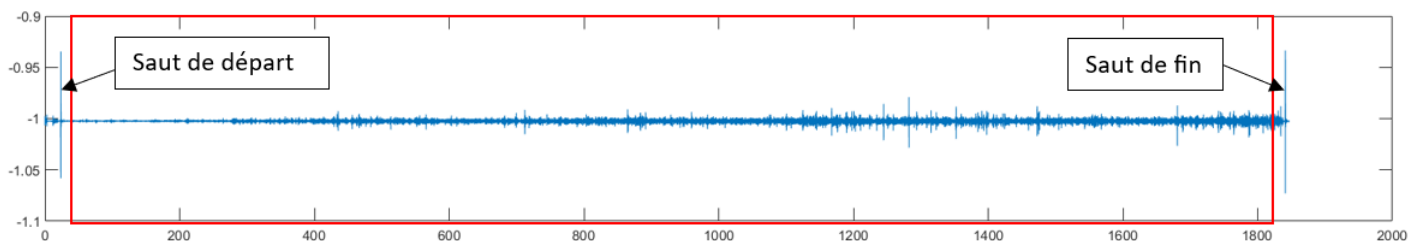


FIGURE 2.6 – Traitement des données brutes

## 2.4.2 Écart type

Dans un premier temps, il est intéressant de comparer les différents signaux sur base d'un même indicateur. Pour ce faire, l'évolution de l'écart type du signal peut être utilisée. Cet indicateur statistique est calculé sur chaque période durant laquelle le nombre de piétons est constant. Comme il s'agit de données expérimentales, il est possible que celles-ci soient affectées par des données parasites. Une certaine proportion des valeurs extrêmes du signal peut donc être retirée pour en diminuer l'effet. Les figures suivantes illustrent pour différents tests, l'effet de la proportion du signal tronquée.

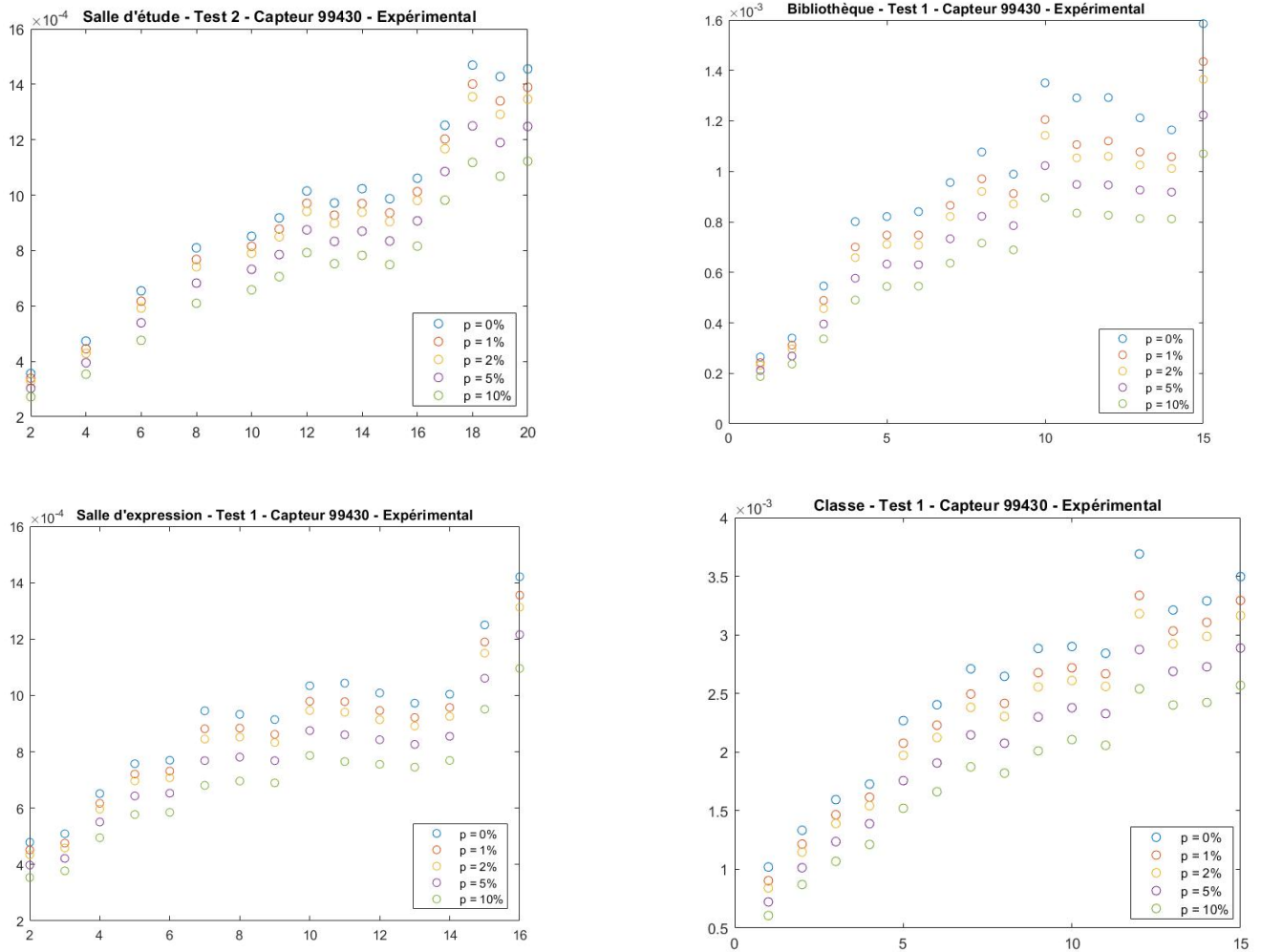


FIGURE 2.7 – Écart type des signaux expérimentaux en fonction de la proportion tronquée

Nous pouvons observer que de manière générale, seule une faible proportion du signal est affectée par des données aberrantes. Une augmentation de la troncature au-delà de 1% se traduit par une translation relativement constante de l'indicateur sur l'ensemble du signal. Cela signifie que le signal ne doit pas être tronqué de manière significative au risque de perdre des données. Il arrive donc que certains points diminuent de manière plus conséquente par rapport aux autres pour une proportion tronquée de 1%. De plus, l'écart entre les courbes obtenues pour  $p = 1\%$  et  $p = 2\%$  est relativement faible et ce, même d'un test à l'autre l'autre.

L'évolution de l'écart type est alors étudiée par la suite pour une proportion tronquée de 1%. Cela équivaut donc à retirer 1.2s à une période initiale de 120s. De cette manière, l'influence des valeurs aberrantes est diminuée, sans pour autant perdre trop de données du signal qui nous intéressent.

---

### 2.4.3 Indice de stationnarité - Définition

Dans le but d'évaluer la stationnarité du signal, une étude statistique plus précise est menée. Pour ce faire, le principe de moyenne mobile et d'écart type mobile est utilisé. Cela permet d'introduire par la suite le coefficient de stationnarité.

La moyenne mobile est une méthode de filtration des données. Elle est généralement utilisée pour des séries temporelles et ordonnées. Cette méthode permet de diminuer l'effet voire de supprimer les fluctuations transitoires. Elle est donc utilisée afin de mettre en évidence la tendance d'un signal qui se dessine sur le long terme. Physiquement, ce procédé est assimilé à un filtre passe-bas.

La particularité de cette méthode est qu'à la place de déterminer la moyenne sur l'ensemble des données, la moyenne mobile est calculée successivement sur tous les sous-ensembles de données. La taille  $w$  de ce sous-ensemble doit évidemment être inférieure à la taille totale  $R$  du domaine. La moyenne est donc calculée sur une première fenêtre enveloppant les premières données temporelles et est recalculée à nouveau sur une fenêtre de même taille ayant coulé d'une donnée vers la fin du signal. Cela est répété jusqu'à ce que la fenêtre ait couvert l'ensemble des données.

La formule permettant de calculer la moyenne mobile est illustrée à l'équation 2.1. L'indice  $i$  représente la position dans le domaine. Il est donc important de notifier que la moyenne mobile est uniquement calculée lorsque  $w \leq i \leq R$ .

$$\bar{X}_{[i-(w-1);i]} = \frac{1}{w} \sum_{k=0}^{w-1} X_{i-k} \quad (2.1)$$

Il découle d'en déterminer l'écart-type mobile de ce signal. Le principe est le même que pour la moyenne. L'écart-type est uniquement calculé sur la taille de la fenêtre et donc avec la moyenne mobile correspondante. Sa formule est donnée par l'équation suivante.

$$\sigma_{[i-(w-1);i]} = \sqrt{\frac{1}{w} \left( \sum_{k=0}^{w-1} X_{i-k}^2 \right) - \bar{X}_{[i-(w-1);i]}^2} \quad (2.2)$$

Dans le programme, l'entière des écarts-types calculés sont stockés dans un vecteur. De cette façon, il est possible d'en visualiser l'évolution le long du signal pour une taille de fenêtre donnée. La longueur de ce vecteur est en réalité celle du domaine diminuée d'une fois la taille du sous-ensemble considéré.

La définition de l'indice de stationnarité  $s$  peut à présent être introduite. Plus cet indice est faible et plus le caractère stationnaire du signal est important. Il s'exprime comme le rapport de l'écart-type de l'écart-type mobile sur la moyenne de l'écart-type mobile. Afin d'être cohérent, ces indicateurs statistiques doivent être calculés pour un nombre constant de piétons. En analysant soit les données expérimentales soit les représentations numériques, les indicateurs ainsi que l'indice de stationnarité sont calculés indépendamment sur chaque période où le nombre de piétons est constant. Cela n'aurait pas de sens de calculer un écart-type mobile couvrant une partie de signal sur lequel le nombre de piétons est variable étant donné que nous essayons de déterminer la stationnarité pour un nombre de participants donné.

$$s = \frac{\sigma_{\sigma_{mob}}}{\mu_{\sigma_{mob}}} \quad (2.3)$$

---

## 2.4.4 Indice de stationnarité - Discussion et démarche

La finalité est de pouvoir étudier l'évolution de l'indice de stationnarité. Ce dernier est cependant également affecté par la présence de données aberrantes. Le comportement de cet indicateur face à une suppression de données n'est pas aussi prévisible que l'écart type. Différentes méthodes ont donc été essayées. La démarche entreprise est explicitée en détail dans cette section.

Afin d'établir une base commune dans le traitement des données, il est important de déterminer la taille de fenêtre sur laquelle l'écart type mobile est calculé. Celle-ci influence la précision de l'analyse mais aussi l'échelle du signal à laquelle il est observé. La mesure de la stationnarité sur base d'une fenêtre de petite taille est sensible au bruit et aux fluctuations à court terme du signal. D'un autre côté, lorsque la fenêtre est trop grande, celle-ci perd de la précision et peut ne pas refléter les variations à court terme. Il est alors important de trouver un compromis.

Tout d'abord, la mesure perd de son intérêt si la fenêtre est inférieure à la période du signal. Dans ce cas, la non-stationnarité du signal serait évidente. La taille de la fenêtre doit donc être au minimum supérieure à  $T = 1/f_1$ . Afin d'éviter une sensibilité trop grande au bruit et aux fluctuations locales, la taille de la fenêtre ne sera pas prise en dessous de  $5/f_1$ .

Ensuite, afin que la taille maximale ne soit pas trop grande pour pouvoir observer les fluctuations locales, elle est majorée par  $20/f_1$ . Cela correspond donc à une vingtaine de périodes de vibrations.

La stationnarité est évaluée sur un signal expérimental d'une durée de 120s pour un nombre constant de piétons. Lors des prises de mesures, les piétons ont donc réalisé plusieurs allers-retours sur le plancher. Il est donc peu intéressant d'observer le signal via une fenêtre supérieure au temps pris par un piéton pour traverser la pièce. La vitesse moyenne considérée est de 1.65m/s. La dimension la plus étroite des locaux testés est de 8m. Il est donc vérifié que la taille du segment est au moins 4 fois inférieure à  $L/V_{moy} = 4.848s$ . Cela signifie inférieure à plus ou moins 1.212s (ou encore  $w = 303$  exprimé en pas temps).

Il est important que les signaux provenant des planchers à caractéristiques différentes soient comparés sur un même base. A ce stade, il existe deux possibilités :

- Comparer les signaux sur une fenêtre de même taille et donc sur une même base temporelle
- Comparer les signaux sur une taille de fenêtre propre à chaque signal observant un nombre égal de répétitions de la période.

La deuxième possibilité semble la plus adéquate. Prendre une taille de fenêtre figée aurait tendance à biaiser les observations étant donné la variabilité des fréquences propres et de l'amortissement dynamique. Il reste alors à déterminer la valeur de celle-ci. Pour ce faire, discutons la méthode utilisée pour déterminer la stationnarité du signal. Dans le tableau 2.2 est indiqué les tailles de fenêtres pour chaque plancher exprimée en pas de temps. Cette discussion se base par la suite sur l'analyse des données expérimentales. Cela signifie que le pas de temps considéré est celui des données enregistrées par le capteur 0.004[s].

Plancher	1 <sup>re</sup> fréquence propre	$w_{min}$	$w_{max}$
Classe	7.56 Hz	164	656
Bibliothèque	12.5 Hz	100	400
Salle d'étude	9.28 Hz	135	540
Salle de répétition	11.23 Hz	112	448
Salle d'expression	11.72 Hz	107	428

TABLE 2.2 – Valeur des tailles de fenêtre suivant les caractéristiques des planchers

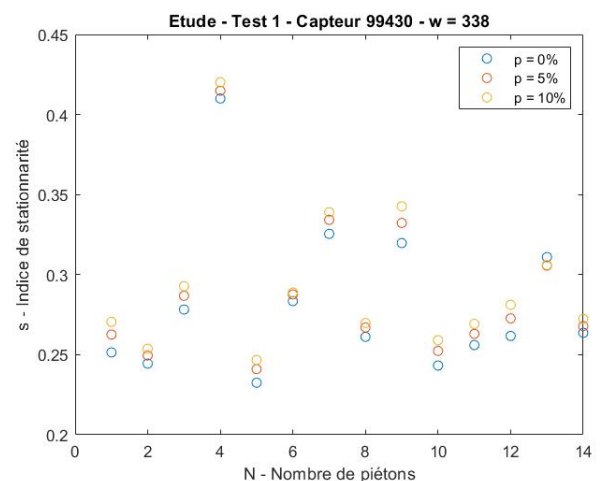
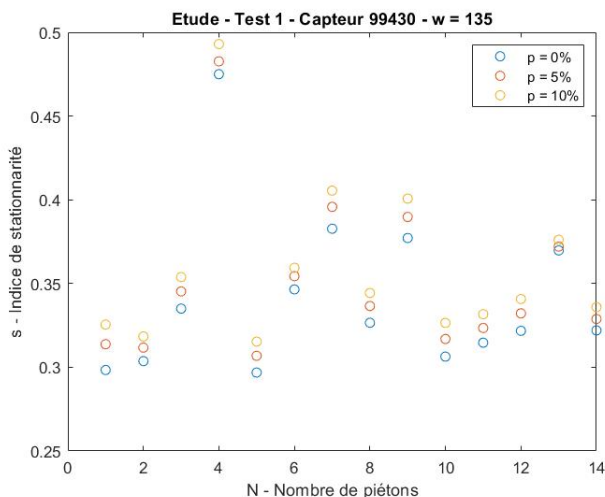
Lors de la prise de mesures expérimentales, il est probable d'enregistrer des données parasites. Celles-ci peuvent apparaître pour de nombreuses raisons (piéton qui trébuche, objet qui tombe au sol, chaise déplacée...). Ces données aberrantes se traduisent par des augmentations locales de l'accélération du plancher mesurée. Cela peut donc fausser dans une certaine mesure les résultats obtenus. C'est pourquoi, lors du traitement de données, une certaine proportion des valeurs extrêmes est retirée. Il est donc intéressant de se questionner sur l'effet combiné de la taille de la fenêtre et de la proportion de bruit enlevée sur l'indice de stationnarité.

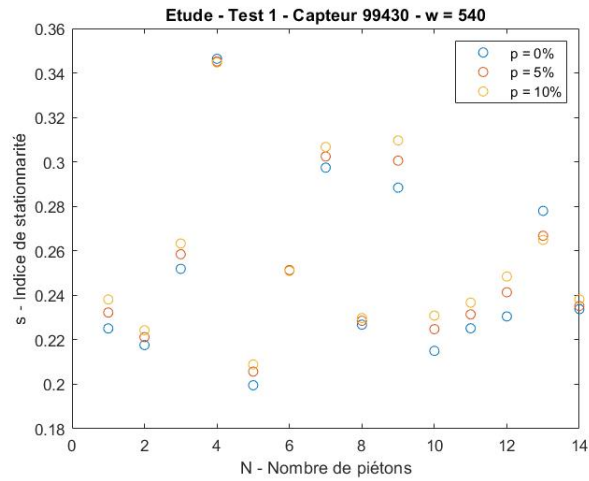
L'indice de stationnarité utilisé est celui défini précédemment au point 2.4.3. Afin d'éliminer une certaine proportion du bruit, j'ai imaginé deux possibilités. Comme il s'agit ici de calculer un écart type mobile, le troncage des données doit se faire au niveau de la fenêtre ou une fois que l'écart type mobile a été évalué sur l'entièreté du signal.

Dans la première idée, à chaque fois que l'écart type mobile est calculé, une certaine proportion du signal observé sur la fenêtre est enlevée. Pour ce faire, la fenêtre est triée et une proportion des extréma est enlevée. Ensuite, l'écart type est calculé sur la fenêtre tronquée et ainsi de suite jusqu'à la fin du signal.

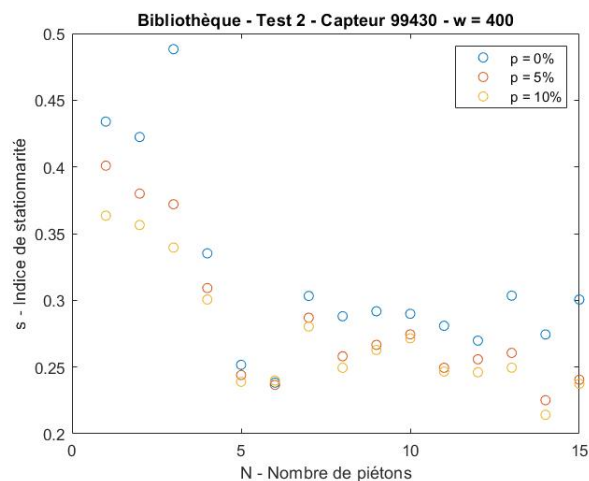
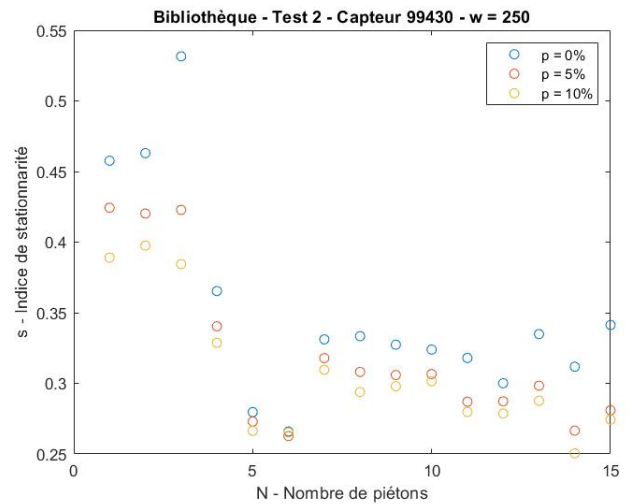
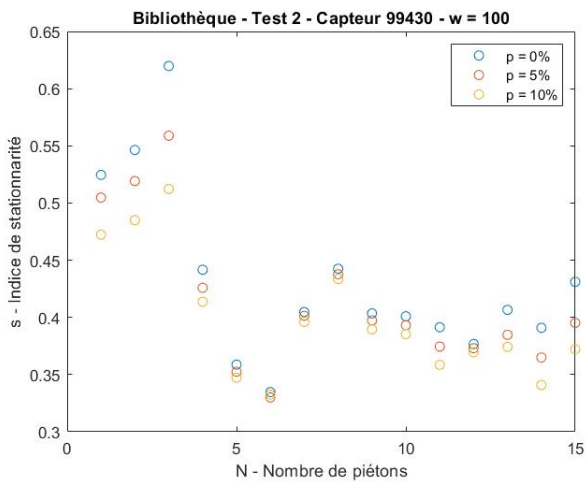
L'autre proposition est de calculer l'écart type mobile "normalement", mais de retirer une certaine proportion une fois qu'il a été calculé. Cela signifie donc que dans ce cas, c'est l'entièreté de l'écart type mobile qui est triée et qui en voit ses extréma tronqués.

Ces deux méthodes vont donc être testées et discutées par la suite. Dans un premier temps, le numérateur et le dénominateur de l'indice de stationnarité sont pensés être calculés sur base du signal tronqué. Les résultats obtenus étaient relativement différents d'un plancher à l'autre ou même d'un test à l'autre. Ceux-ci sont illustrés dans les figures suivantes. La méthode de traitement du bruit utilisée pour ces figures se base sur le troncage de la fenêtre.

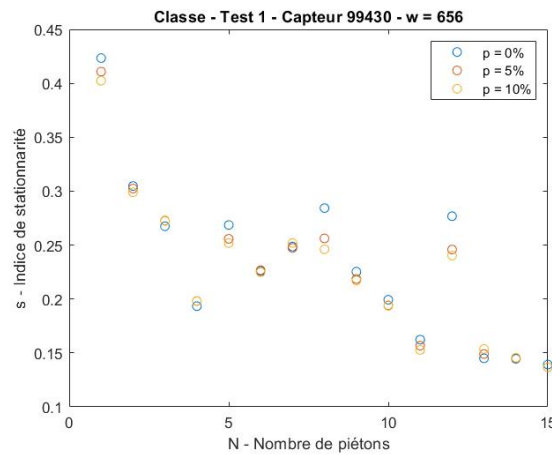
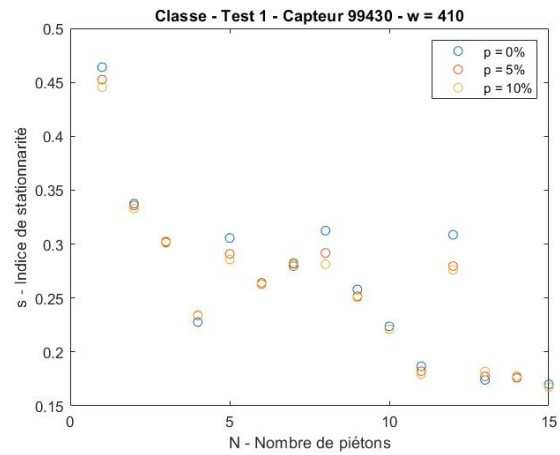
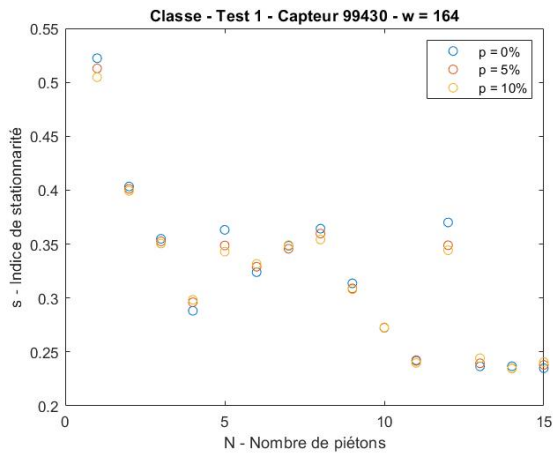




On peut remarquer que dans le cas du plancher de l'étude, l'évolution de l'indice de stationnarité est assez contre-intuitif. En retirant une plus grande proportion de bruit, l'indice de stationnarité augmente. Cet effet n'est donc pas celui recherché. On ne retrouve pas non plus d'effets significatifs de cette proportion en fonction de la taille de la fenêtre. On observe plutôt une translation générale du signal.



Dans le cas de la bibliothèque, l'effet est nettement plus visible et se rapproche de celui recherché. On observe des diminutions locales plus élevées de l'indice, qui sont expliquées par la présence de données aberrantes. Le signal est relativement plus lissé pour une taille de fenêtre élevée, même sans retirer le bruit.



L'indice de stationnarité de la classe évolue de façon difficile à interpréter. Il n'y a pas vraiment d'effets observés. On y retrouve une diminution de celui ci mais aussi des augmentations, cela même en faisant varier la taille de fenêtre. Des effets locaux sont observés également.

De manière assez évidente, la méthode d'analyse n'est pas adéquate. Les effets sur l'indice doivent être relativement communs et prévisibles. Nous pouvons donc conclure que le traitement des données doit être repensé.

Les effets observés précédemment peuvent en réalité être expliqués. Comme le numérateur  $\sigma_{\sigma_{mob}}$  et le dénominateur  $\mu_{\sigma_{mob}}$  dépendent tout deux du signal tronqué, ils varient tous les deux. Il arrive donc que l'un varie plus que l'autre en fonction du signal donné. On y retrouve donc deux configurations :

1. La distribution des pics au niveau de l'accélération est relativement uniforme sur l'ensemble du signal. Dans ce cas, le dénominateur et donc la moyenne diminue plus fort que le numérateur. L'indice de stationnarité augmente. Cela s'explique par le fait que la dispersion des données est plus faible. De plus, le numérateur n'est qu'une mesure de dispersion de l'écart type et non une mesure directe de la dispersion des données.
2. La distribution des pics est localisée dans le signal. Le phénomène inverse se produit. Les données aberrantes se retrouvent localisées dans certaines fenêtres et cela peut alors avoir un plus gros effet sur l'écart type lorsqu'il y a une troncature sur la fenêtre. L'indice de stationnarité diminue.

Après réflexion, il est intéressant de comparer les deux méthodes de troncature lorsque le dénominateur de  $s$  est établi sur le signal non tronqué. Cela permettrait d'avoir un dénominateur qui ne varie qu'en fonction de la fenêtre et un numérateur qui diminue lorsqu'une proportion du bruit est enlevée. Commençons par comparer les deux approches sur une taille de fenêtre donnée et une proportion tronquée donnée. La méthode visant à tronquer le signal sur la fenêtre est désignée par la *méthode 1* et celle tronquant l'écart type mobile après calcul par la *méthode 2*.

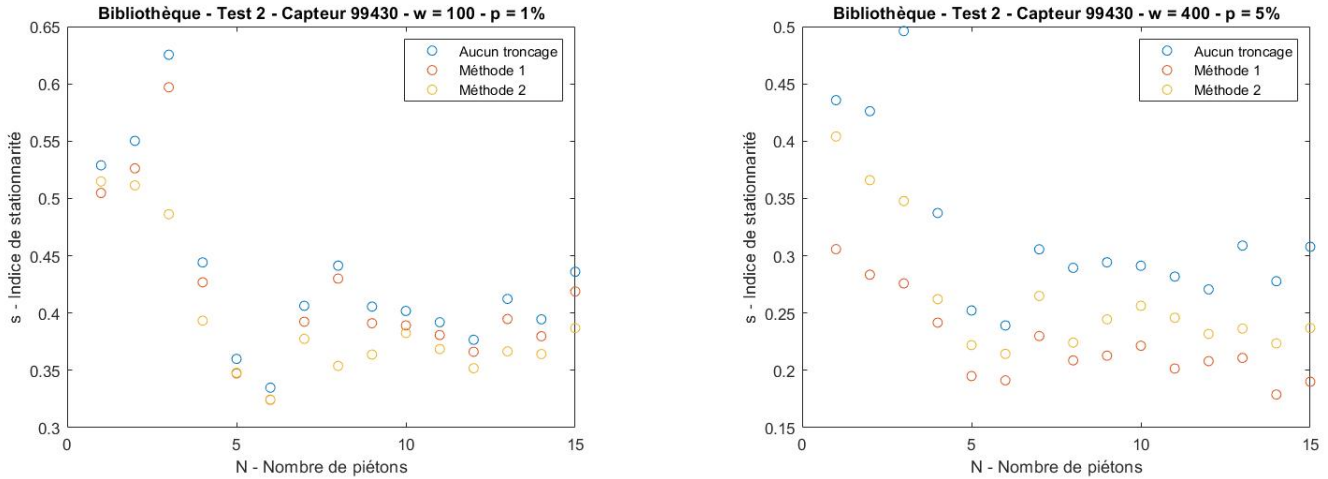


FIGURE 2.8 – Bibliothèque - Comparaison des méthodes de troncature

Nous pouvons constater que dans le cas d'une petite fenêtre d'observation avec une faible proportion de bruit enlevée, l'effet de la première méthode est relativement faible. Elle a tendance à simplement translater les résultats sans apporter de modifications particulières. D'un autre côté, la deuxième méthode donne un résultat très satisfaisant. L'indice de stationnarité est réduit localement où l'on aurait pu prédire qu'il y avait des données parasites dans le signal. De plus, il reste relativement fidèle à la distribution sans troncature pour le reste du signal.

En augmentant la taille de la fenêtre mais aussi la proportion enlevée, on constate que la première méthode lisse de manière intéressante les résultats mais s'écarte de manière importante de l'ordre de grandeur initial. La deuxième méthode quant à elle lisse également de manière plus conséquente l'indice de stationnarité mais en suivant d'une meilleure façon les données d'origine.

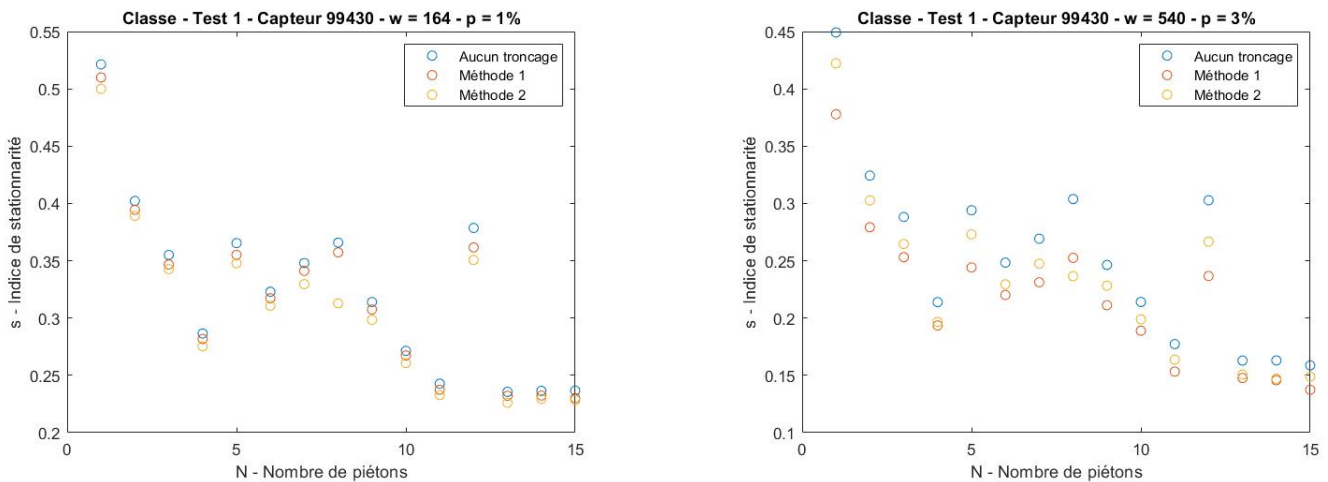


FIGURE 2.9 – Classe - Comparaison des méthodes de troncature



En reproduisant les mêmes comparaisons mais sur un autre plancher, nous pouvons observer les mêmes points que discutés dans le cas de la bibliothèque. Cela a été répété pour les autres planchers également. La régularité de l'effet des deux méthodes sur différents types de signaux a pu être observée et donc confirmée.

A ce stade, il peut être conclu que la seconde méthode est meilleure et cela pour deux raisons principales.

- En utilisant une proportion tronquée constante sur l'ensemble du signal, la deuxième méthode permet d'observer un effet sur les données affectées par des données aberrantes sans que les autres en soient trop impactées
- Il est plus simple de contrôler les résultats rendus par la deuxième méthode, car malgré une augmentation de la proportion tronquée, les résultats suivent de manière satisfaisante les résultats initiaux contrairement à la première méthode.

Le fait d'agir directement dans la fenêtre, diminue d'une façon limitée la variabilité du signal. On observe plus un effet de la taille de la fenêtre qu'un effet de l'enlèvement des valeurs extrêmes dans la première méthode.

Il reste maintenant à déterminer la taille de la fenêtre pour la méthode déterminée. Il est donc intéressant d'observer pour différentes tailles de fenêtres l'effet du degré du troncage.

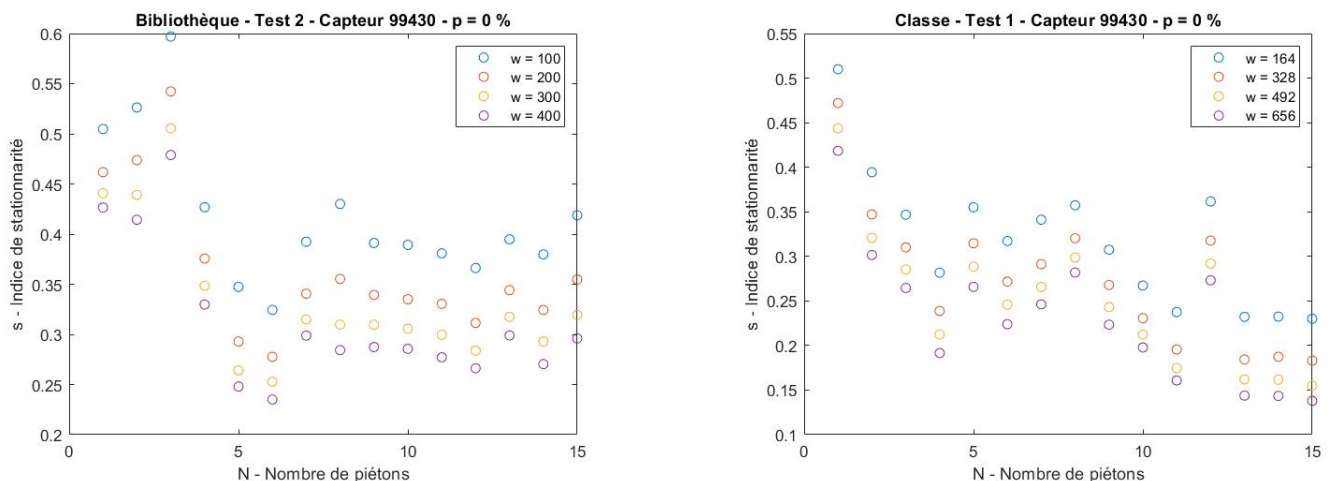


FIGURE 2.10 – Effet de la taille de la fenêtre sur l'indice de stationnarité

Comme illustré à la figure ci-dessus, l'effet de la taille de la fenêtre se traduit majoritairement par une translation du signal. Plus la fenêtre est grande et plus l'indice de stationnarité devient petit. Cela a du sens, car comme l'observation se fait sur une plus grande échelle, la variabilité de l'écart type diminue. On peut tout de même constater que dans certains cas, certaines valeurs sont lissées. Cela peut être observé dans le cas de la bibliothèque. On retrouve donc l'effet observé dans la première méthode écartée précédemment. Cependant, comme illustré par le test effectué dans la classe, l'effet de lissage par variation de la taille de fenêtre n'est pas forcément conséquent.

Afin d'illustrer ensuite l'effet de la proportion du troncage, nous utilisons le deuxième test effectué dans la bibliothèque. Ces mêmes graphiques pour un test donné sur les différents planchers peuvent être retrouvés à l'annexe A.3.

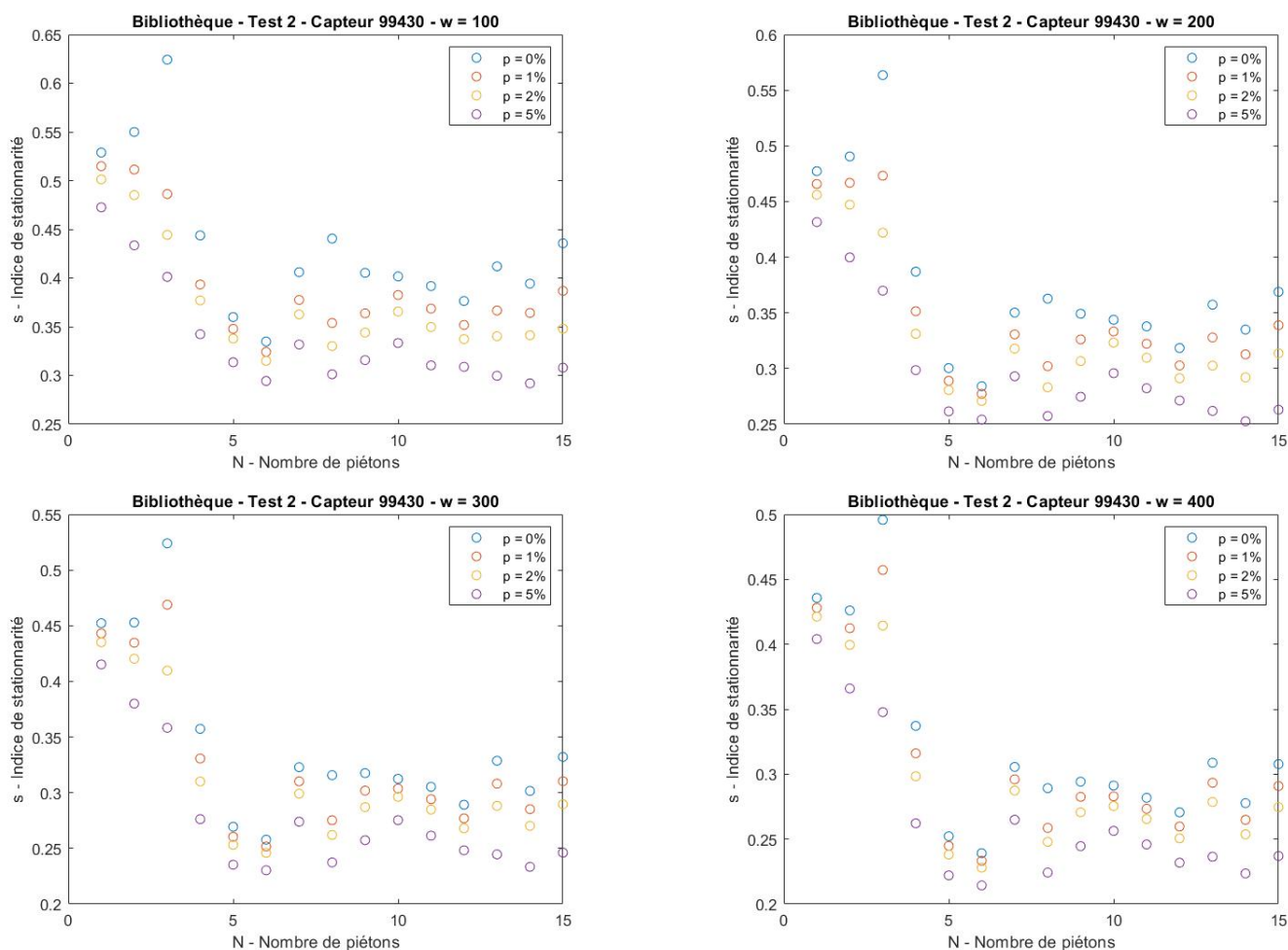


FIGURE 2.11 – Effet du troncage pour une taille de fenêtre donnée sur l'indice de stationnarité

D'après la figure A.35, nous pouvons observer que plus la taille de fenêtre augmente et plus il faut augmenter la proportion tronquée pour obtenir un signal lissé. Pour une fenêtre assez petite ( $w = 100$ ) on constate qu'une proportion de 1% suffit pour lisser les résultats tandis que pour une plus grande fenêtre ( $w = 400$ ), il faut atteindre une proportion de 5%. Cela est expliqué par le fait que lorsqu'un pic d'accélération se retrouve dans le signal, si la fenêtre est petite, il influencera une moins grande proportion de l'écart type mobile calculé. Ce pic augmentera effectivement plus fort les valeurs de l'écart type mais localement, et sur un moins grand nombre de données. En enlevant donc même une petite proportion, leur effet est retiré.

En analysant cet effet du troncage sur les autres planchers, nous pouvons conclure qu'il est préférable de s'orienter vers une taille de fenêtre plus réduite. En effet, comme discuté précédemment, l'effet des pics se retrouve dans une proportion plus importante de données lorsque la fenêtre est plus grande. Cela mène à devoir éliminer une plus grande proportion de l'écart type mobile. En faisant cette manipulation, on risque d'impacter les parties du signal possédant moins de valeurs aberrantes. Cela pourrait revenir à introduire soi-même une erreur dans les données, ce qui va à l'encontre du but initial de l'opération. Afin de garder une certaine cohérence dans le traitement du signal, la proportion à enlever doit être constante d'un nombre de personnes à l'autre ainsi que d'un test à l'autre.

De plus, augmenter la taille de fenêtre revient à diminuer le contrôle qu'on peut avoir sur le traitement du signal. Plus la fenêtre augmente et plus on introduit un effet de lissage supplémentaire difficile à anticiper car il n'apparaît que dans certains signaux.

On constate notamment que dans le cas de la salle de répétition située en annexe, il faudrait une proportion supérieure à 5% pour lisser les résultats d'une façon aussi satisfaisante que pour une plus petite taille de fenêtre, tout en écartant de manière importante les résultats obtenus des résultats initiaux de manière significative.

Il semble que pour la plupart des tests réalisés, une proportion de troncage de 2% convienne de façon satisfaisante pour des tailles de fenêtres comprises entre  $\frac{5}{f_1}$  et  $\frac{7}{f_1}$ . Cependant, dans le cas de la classe située en annexe, on observe que 2% est un peu trop pour une fenêtre de  $\frac{5}{f_1}$ . D'un autre côté, 1% est trop peu.

Pour l'ensemble des raisons mentionnées, la taille de fenêtre est donc définie à  $\frac{6}{f_1}$ . La proportion du signal tronqué est alors de 2%. Cela permet d'obtenir un bon compromis entre la neutralisation des valeurs aberrantes, la conservation de l'identité du signal d'origine et le contrôle de la méthode pour les différents types de signaux.

Dans le tableau 2.3, on retrouve les tailles de fenêtres définitives exprimées en pas de temps. Rappelons que le pas de temps du traitement des données expérimentales est défini par l'instrument de mesure et vaut 0.004s et que le pas de temps numérique est de 0.01s. La valeur de ce dernier est définie afin d'obtenir une discrétisation assez précise sans obtenir de temps de calculs trop longs. Comme discuté précédemment, il est important de notifier qu'il a bien été vérifié que celles-ci sont inférieures à  $\frac{L}{4v_{moy}}$ .

Plancher	Classe	Bibliothèque	Etude	Salle de répétition	Salle d'expression
$w_{expérimental}$	196	120	162	134	128
$w_{numérique}$	78	48	65	54	52

TABLE 2.3 – Tailles de fenêtres définitives

---

## 2.5 Données et résultats des tests principaux

Dans cette section sont présentés les différents résultats expérimentaux ainsi que les données y relatives. Pour chaque plancher,

- Le contexte spécifique à chaque test est présenté
- Les fréquences propres sont identifiées
- L'évolution de l'écart type des signaux est illustré et commenté
- Des hypothèses sont émises sur la forme des modes
- L'indice de stationnarité expérimental est illustré et commenté.

### 2.5.1 Classe

#### 2.5.1.1 Contexte

Afin de réaliser le test dans ce local, les meubles scolaires ont été placés le long du mur indiqué sur la figure 2.12. Ils sont placés sur toute la longueur de ce mur et prennent environ 1m de large. A cet endroit se trouve une estrade. Cet aménagement permet ainsi d'en empêcher l'accès aux étudiants lors des tests. Si les piétons venaient à y monter et en descendre tout le long de la prise de mesure, un impact aurait pu être perçu sur les mesures. Les trois tests ont été réalisés l'un à la suite de l'autre. Les capteurs ont été placés aux positions indiquées sur la figure 2.12. La figure 2.13 ne représente pas l'emplacement réel des capteurs, ils ont été déplacés afin de laisser plus d'espace pour circuler entre eux. Des chaises ont été placées au dessus des instruments de mesure afin d'éviter que les participants s'en approchent de trop près.

Lors des tests, les classes voisines étaient vides. Il n'y a donc pas eu de potentiel impact dû à des déplacements non contrôlés. Les murs séparant les locaux sont des cloisons et ne sont pas continus à l'étage inférieur. Cela signifie donc qu'il est possible qu'en marchant dans une classe, des vibrations soient induites dans les autres par continuité entre les planchers. Les participants ont soit attendu leur passage assis dans le couloir ou bien assis dans une classe voisine. Il leur était demandé de ne plus se déplacer pendant le test avant qu'ils soient appelés. Il est tout de même possible qu'un faible nombre de personnes extérieures au test soient passées brièvement dans le couloir. L'impact de ces personnes est difficile à quantifier.

Les résultats enregistrés par le capteur 02393 lors de la troisième répétition du test ont été jugés non fiables en raison des déplacements trop importants dans les trois directions du capteur. Ils ont donc été écartés de la base de données.

Dans le tableau 2.4 sont listées les masses des différents piétons pour chaque test. Elles sont organisées en fonction de l'ordre de passage des participants. Notons qu'elles sont déjà exprimées en Newton au vu des unités considérées dans la modélisation. Les trois prises de mesures ont été réalisées avec 15 participants. Afin de faire le nombre, j'ai participé au premier test en dernière position.

N° piéton	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Test 1	310	450	510	520	550	490	510	480	600	320	480	460	410	450	1000
Test 2	340	400	440	365	400	500	400	470	500	510	390	380	450	400	650
Test 3	390	580	410	460	390	320	500	665	600	585	520	350	480	420	550

TABLE 2.4 – Classe - Masses des piétons suivant l'ordre de passage [N]

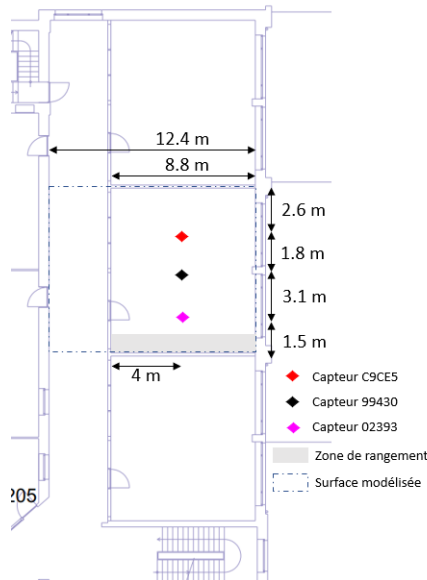


FIGURE 2.12 – Classe - Plan annoté



FIGURE 2.13 – Configuration de la classe

### 2.5.1.2 Fréquences propres

Le contenu fréquentiel montre un grand nombre de pics selon les différents capteurs. De plus, le capteur 02393 présente des amplitudes de pics bien différentes. Il semblerait qu'il ne soit pas non plus affecté par un des modes.

Le test réalisé dans la classe, exprime un contenu fréquentiel laissant penser que la structure du plancher est constituée de poutres relativement raides. La proximité des pics ainsi que leur nombre permettent de le supposer. Il est donc assez difficile de comprendre ce qu'il se passe, sachant qu'aucune information sur la présence de poutres n'a été trouvée. La structure dessinée sur plan peut aider, mais les hypothèses sont dès lors conséquentes pour déterminer la forme des modes.

Il aurait fallu en réalité prendre plus de mesures à partir d'un capteur de référence. Cela aurait permis, en fonction des rapports d'amplitudes, de déterminer les positions des poutres. L'accélération au droit des poutres est théoriquement nulle pour une rigidité infinie. D'un point de vue expérimental, les poutres ont tout de même une accélération, mais très faible par rapport à des mesures à mi-travée.

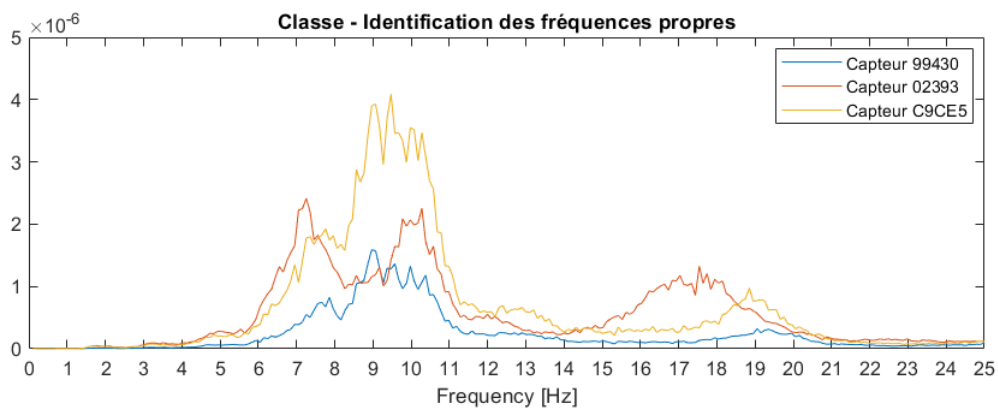


FIGURE 2.14 – Classe - Contenu fréquentiel

### 2.5.1.3 Écart type

L'évolution de l'écart type est illustrée séparément pour chaque capteur à la figure 2.15. Il peut être constaté que les tests 1 et 2 ont fourni des résultats relativement semblables. De plus, l'évolution de l'écart type pour ces tests présente de moins grandes fluctuations que le troisième test. Ce dernier montre des amplitudes de vibrations plus importantes.

On remarque également qu'à partir de 7 piétons pour les deux premiers tests et 5 piétons pour le troisième, l'évolution de l'indicateur fluctue de manière plus importante. Le nombre de piétons influence la variabilité des résultats.

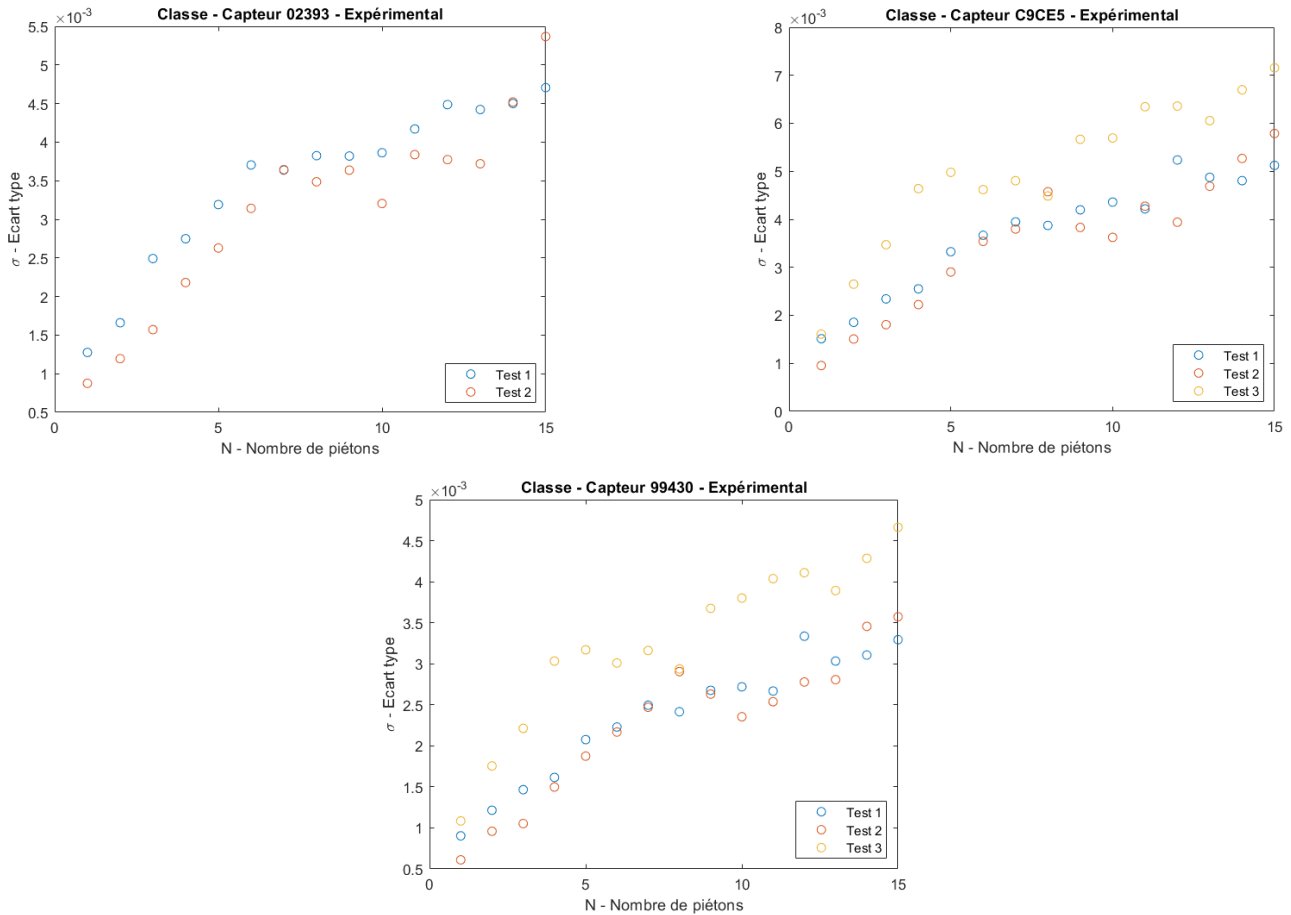
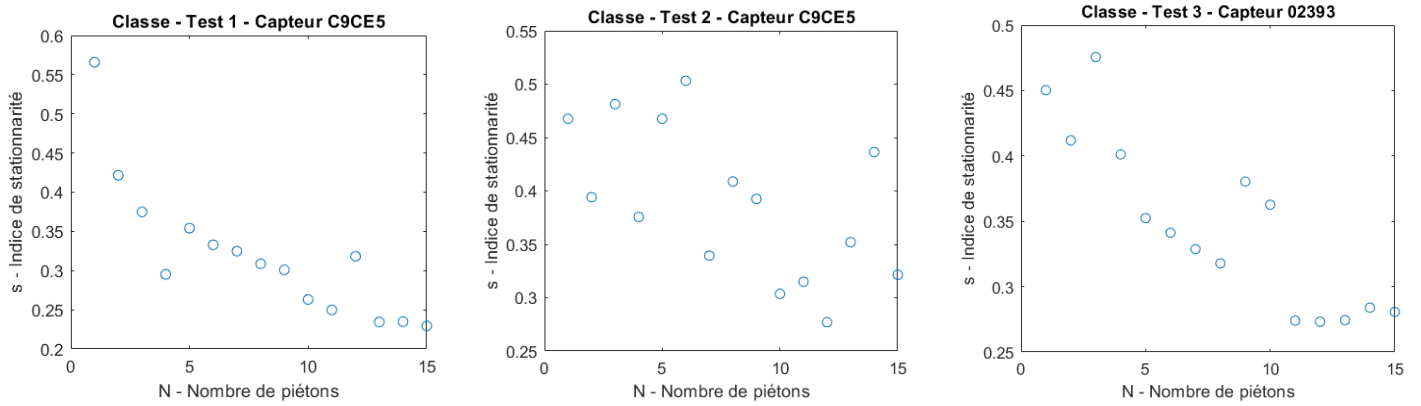


FIGURE 2.15 – Classe - Évolution de l'écart type du signal en fonction du nombre de piétons

### 2.5.1.4 Indice de stationnarité

Au niveau de l'indice de stationnarité mesuré dans la classe, la tendance des courbes peut assez bien être identifiée. On observe malgré tout un certain nombre de variations, principalement au deuxième test. L'atteinte d'un état stationnaire ne peut pas vraiment être statuée sur base de ces observations. Cependant, il semblerait que l'indice se stabilise aux alentours de 10 piétons. Cela est observé lors du premier et dernier test. Les différentes figures illustrant l'évolution de l'indicateur selon les autres capteurs se trouvent à l'annexe A.4.1



Il peut être intéressant d'observer les résultats d'un point de vue global. Pour ce faire, la moyenne de l'indice de stationnarité pour un capteur donné a été calculée. Cela permet d'observer si une potentielle tendance dans l'évolution de l'indice se manifeste. Dans ce cas, il est clair qu'une tendance se dessine. L'indicateur diminue pratiquement de moitié entre le début et la fin du test. On observe à nouveau que le signal semble se stabiliser à partir du 10ème piéton.

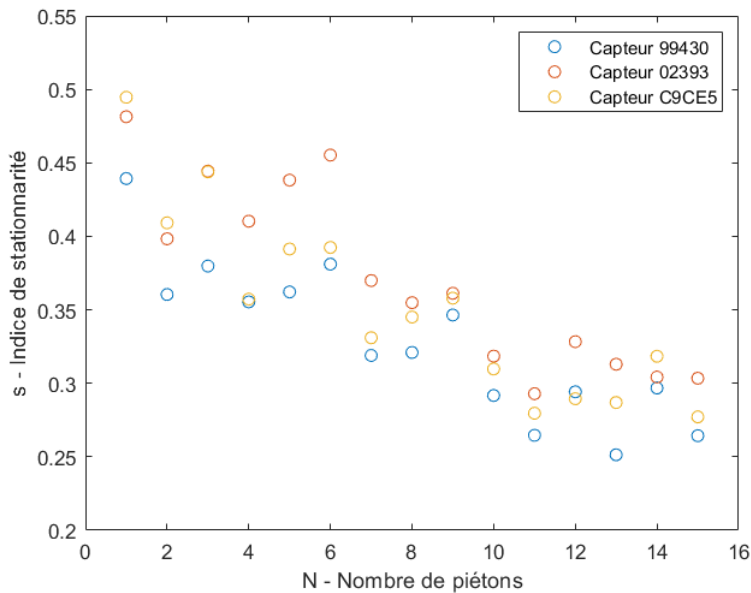


FIGURE 2.16 – Classe - Indice de stationnarité moyen

## 2.5.2 Bibliothèque

### 2.5.2.1 Contexte

La disposition de la bibliothèque est relativement particulière. Elle est divisée en deux parties, une zone surélevée où se trouve l'entrée du local et une zone en contre-bas où se situent des bancs scolaires et les livres. Ces deux parties sont séparées par quelques marches, ce qui mène à penser que les comportements des planchers peuvent être considérés indépendants. La prise de mesure est effectuée sur la plancher situé en contre-bas.

De plus, comme mentionné précédemment, la présence d'une cloison a pu être constatée au niveau de la zone inférieure. Cela signifie qu'un local avec une disposition similaire se trouve de l'autre côté de celle-ci. Le plancher sur lequel est effectué le test est donc plus long que prévu car aucun mur porteur ne se trouve à l'étage inférieur. Il a donc fallu s'assurer qu'aucune activité ne se produise dans ce second local lors des tests. Ceci, dans le but de contrôler au maximum les vibrations induites dans le plancher. La disposition de la bibliothèque est illustrée à la figure 2.17.

Uniquement les tables et les chaises ont été enlevées de la zone de test. Elles ont été placées au niveau de la partie surélevée du local. Les étagères avec les livres sont placées le long des murs et n'ont donc pas été déplacées. Les élèves ont attendu leur passage dans le même espace où le mobilier a été déplacé. Comme les participants devaient descendre des marches pour accéder au plancher, il a été donné comme consigne de le faire calmement et de ne plus y remonter avant la fin du test.

Les deux premiers tests ont été réalisés l'un après l'autre. Le troisième a été répété plus tard. Afin de placer les capteurs exactement aux mêmes endroits, des marques ont été faites au sol. Sur les figures 2.17 et 2.18, la présence de poutres supportant le plancher peut être déduite. Elles sont situées au niveau des colonnes et sont espacées de 4m.

Le poids des piétons se retrouve sous le même format que précédemment au tableau 2.5. J'ai également participé au premier test afin d'obtenir le nombre de participants désiré. Les trois tests dans la bibliothèques ont donc pu être réalisés avec un nombre de 15 personnes.

N° piéton	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Test 1	500	470	530	460	400	350	480	550	460	390	610	630	480	580	1000
Test 2	500	470	530	460	700	780	520	550	530	550	530	670	530	580	620
Test 3	570	660	520	520	600	470	550	500	600	650	660	460	740	710	660

TABLE 2.5 – Bibliothèque - Masses des piétons suivant l'ordre de passage [N]

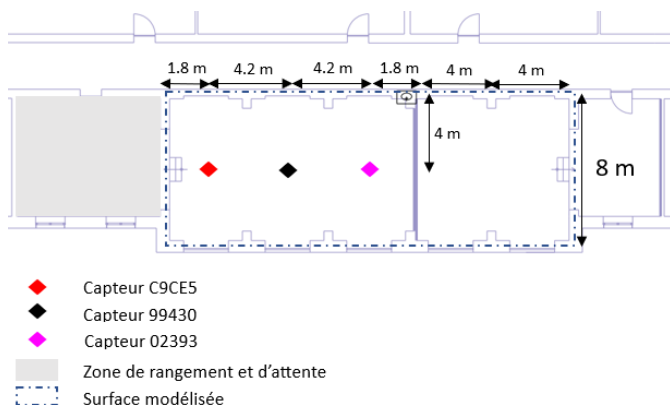


FIGURE 2.17 – Bibliothèque - Plan annoté

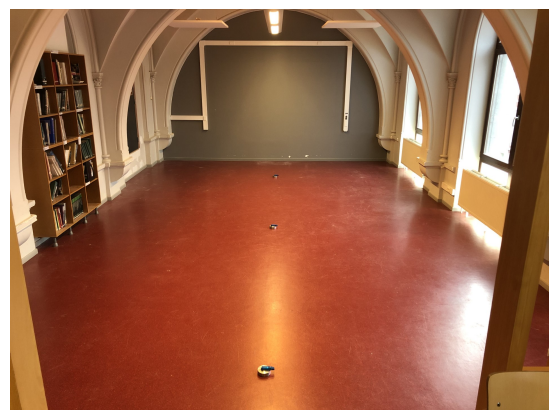


FIGURE 2.18 – Configuration de la bibliothèque



### 2.5.2.2 Fréquences propres

En observant le signal dans le domaine fréquentiel, plusieurs pics principaux peuvent être identifiés. Ils sont au nombre de cinq. Seuls les modes de vibrations se produisant en dessous de 20 Hz sont considérés.

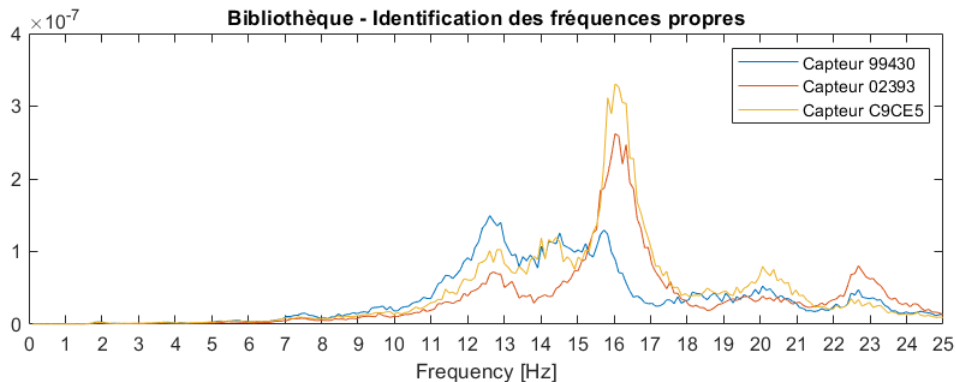


FIGURE 2.19 – Bibliothèque - Contenu fréquentiel

Il peut être constaté que le deuxième mode n'apparaît pas au niveau du capteur 02393. Les trois premières fréquences propres sont les suivantes.

- $f_1 = 12.7$  Hz
- $f_2 = 14.3$  Hz
- $f_3 = 16.1$  Hz

Les pics définissant les modes ne sont pas vraiment distincts et montrent une certaine variabilité. Cela montre qu'il peut y avoir une forte interaction entre les modes. De plus, ce genre de signal est caractéristique d'un plancher composé de poutres de grandes raideurs comme dans le cas précédent. La position des poutres est connue dans le cas de la bibliothèque.

### 2.5.2.3 Écart type

Il peut être observé ici que plus le nombre de piétons augmente et plus une fluctuation de l'indicateur est importante. Les signaux montrent une amplitude assez semblable d'un test à l'autre jusqu'à atteindre 6 piétons. L'amplitude du signal est également plus importante de manière globale au capteur C9CE5 placé proche du milieu de la première travée. Les deux autres capteurs ont enregistré des écarts types assez semblables.

La gamme de fréquence du pas atteinte dans les différents tests semble être relativement différente d'un cas à l'autre. L'amplitude obtenue lors du troisième test est bien différente de celle du second. Un palier peut également être identifié lors du second test. Les piétons ont commencé à marcher au même rythme et en petits groupes vers la fin du test. Ce genre de phénomène peut se produire sans même que les participants s'en rendent compte. Cela se produit en réalité lorsque le nombre de piétons commence à augmenter ainsi que la durée du test. Les piétons, en l'occurrence les élèves, se sont de moins en moins concentrés sur la procédure.

L'allure de l'indicateur en fonction du nombre de piétons est similaire d'un capteur à l'autre. Afin de vérifier notamment les suppositions effectuées à la section 2.2.2 sur les modes de vibrations, regardons le signal d'un point de vue fréquentiel.

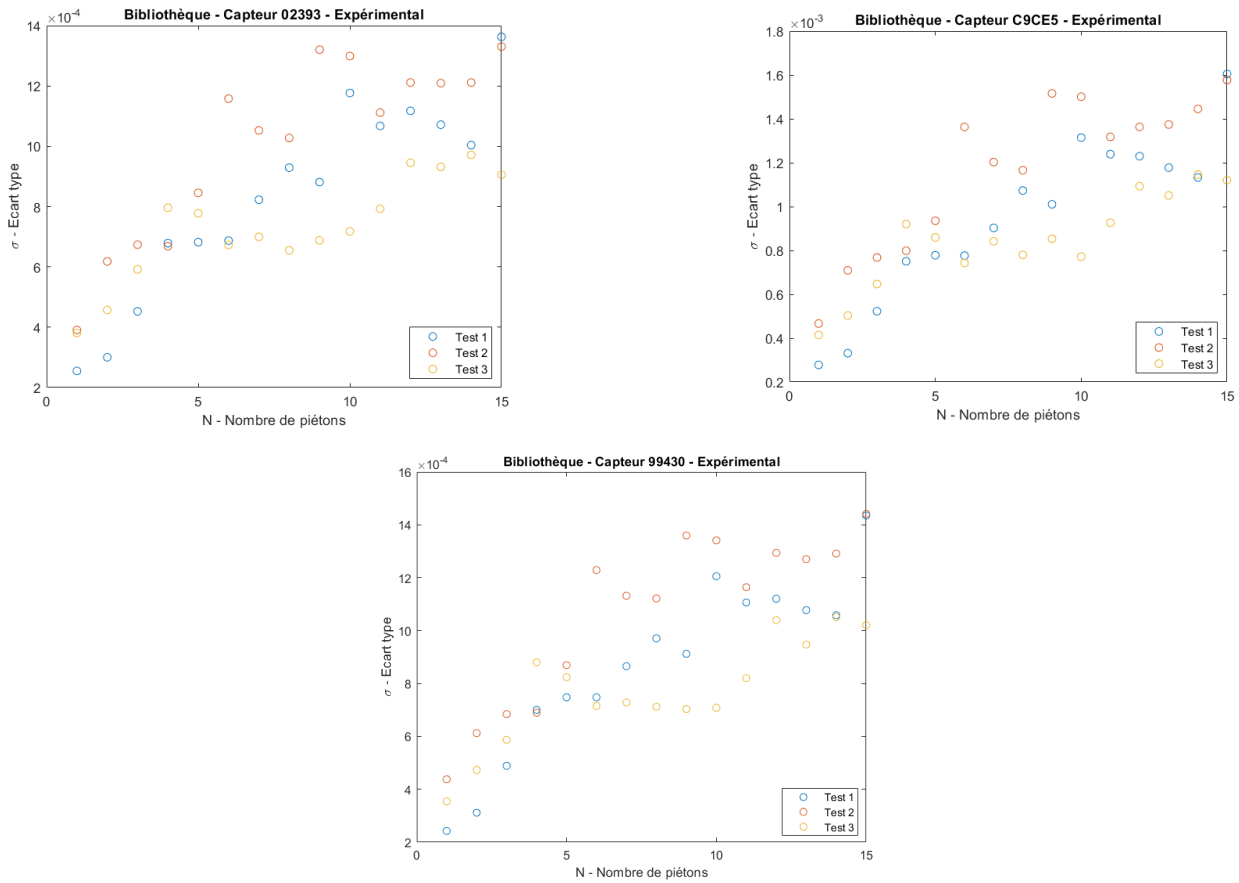


FIGURE 2.20 – Bibliothèque - Évolution de l'écart type du signal en fonction du nombre de piétons

### 2.5.2.4 Formes des modes

Sur base du contenu fréquentiel et de l'évolution de l'écart type du signal, il est supposé que le plancher est composé de poutres très raides. Celles-ci sont situées tous les 4m. Le comportement du plancher peut être assimilé à un comportement d'une poutre sur différents appuis. La bibliothèque peut donc être assimilée à une poutre continue composée de 5 travées. Via un code fourni par le professeur Vincent Denoël, la forme des modes propres d'une poutre sur plusieurs appuis peuvent être obtenus. Le nombre de travées ainsi que les dimensions de celles-ci sont prises en compte. Cependant, cette modélisation suppose que la sollicitation est répartie sur tout le plancher. De plus, les modes sont considérés dans une seule dimension.

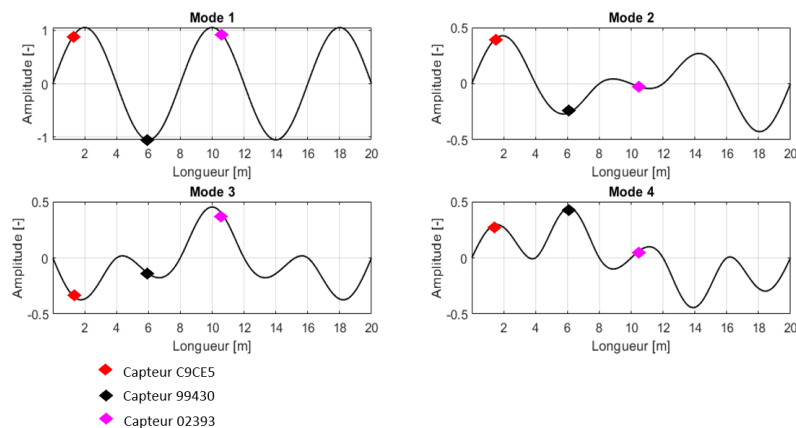
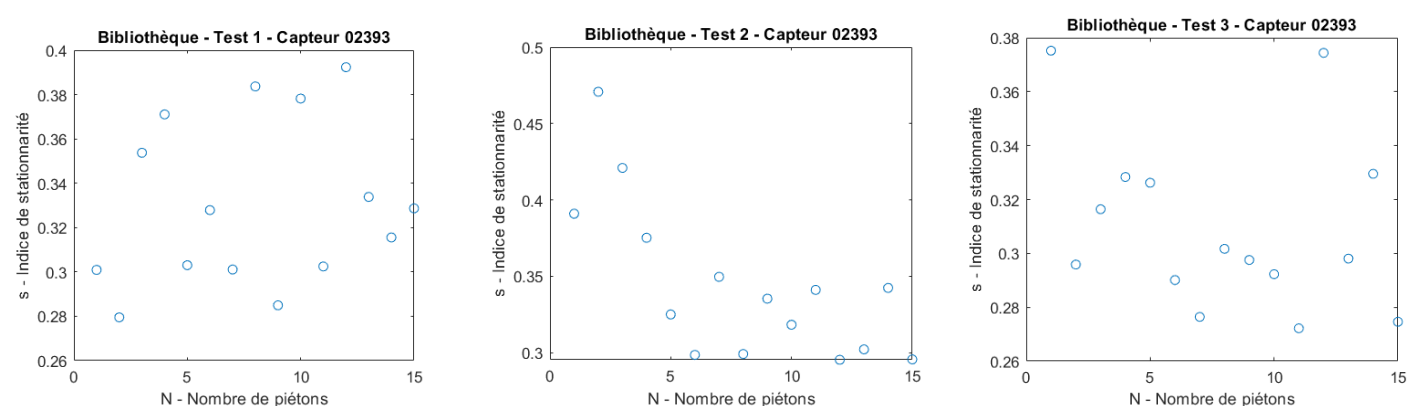


FIGURE 2.21 – Bibliothèque - Formes des modes

En analysant la forme des modes obtenus, il se pourrait que cela coïncide avec l'accélération mesurée. L'accélération obtenue au capteur C9CE5 pourrait bien être supérieure. De plus, l'amplitude observée dans le premier mode était légèrement plus grande pour le capteur 99430, cela est également le cas ici. Un dernier élément qui permet de poser comme hypothèse que ces modes sont les bons, est la présence d'un noeud au capteur 02393 dans le deuxième mode. On retrouve donc un certain nombre de concordances.

### 2.5.2.5 Indice de stationnarité

L'indice de stationnarité montre une grande variabilité dans les résultats. Cela empêche d'observer une certaine tendance dans l'ensemble des résultats. Cependant, le second test donne des résultats plus intéressants. L'ordre de grandeur de l'indice pour les premiers piétons est plus élevé que pour les autres tests. Une diminution de celui-ci est observée avec l'augmentation du nombre de piétons. Il semblerait que l'indice se stabilise aux alentours du cinquième piéton.



La moyenne de l'indicateur expérimental montre également une certaine tendance à diminuer. Celle-ci est tout de même moins marquée. Il diminue au plus aux alentours de 25%. Ce qui est deux fois moins par rapport aux résultats observés dans la classe. L'indice de stationnarité ne diminue plus vraiment à partir de 8 piétons. Il est difficile d'estimer si l'évolution du signal s'est stabilisée.

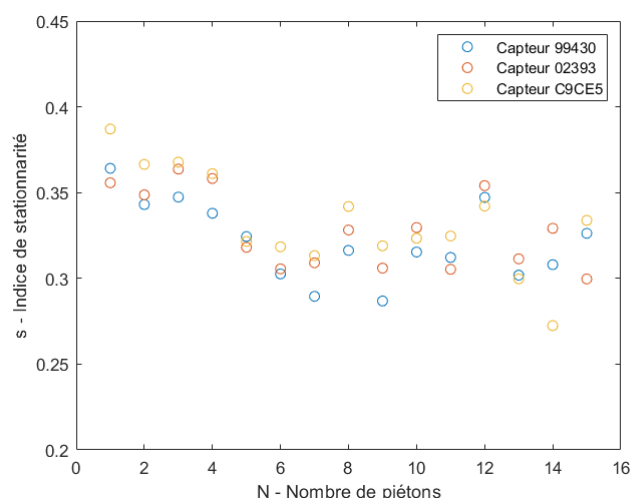


FIGURE 2.22 – Bibliothèque - Indice de stationnarité moyen

## 2.5.3 Salle d'étude

### 2.5.3.1 Contexte

Lorsque les tests ont été effectués dans ce local, l'établissement scolaire était en pleine activité. Le responsable a accepté mon intervention à condition qu'une partie du local puisse rester en activité. Certains élèves devaient avoir accès à un local dans lequel ils pouvaient passer les tests et travaux demandés par leurs professeurs absents avec un surveillant. De cette manière, une partie du plancher seulement a été exploitée. Cependant, j'ai insisté sur la nécessité de n'avoir aucun mouvement autre que les participants dans le local.

Les chaises et bancs ont été placés sur différents côtés afin de prendre le moins de place possible. Il n'y avait pas d'autres endroits où déplacer le mobilier au vu de sa grande quantité présente dans la salle d'étude. Ce plancher est situé entièrement au-dessus d'un hall de sport. Il est donc supporté par un certain nombre de poutres formant 7 travées de 2.5m. Elles sont situées au niveau des colonnes visibles sur la figure 2.23.

Les piétons attendaient leur tour dans le couloir à l'entrée de l'étude. Il m'avait été demandé s'il était possible de les laisser assis sur un banc dans la salle d'étude et qu'ils se lèvent chacun à leur tour pour participer au test mais j'ai décliné. Il a été supposé que le fait de reculer la chaise pour se lever, pousser le banc et passer entre les bancs aurait pu engendrer des vibrations non contrôlées.

Dans le cas de l'étude, le premier test a été réalisé avec 14 personnes, le second avec 20 personnes et le dernier avec 15. Le premier test a dû se terminer plus tôt que prévu en raison d'un souci de communication entre différents intervenants de l'établissement scolaire. Le second a été réalisé en 15 périodes de 120s, ce qui signifie que durant les 5 premières périodes du test, les piétons étaient envoyés deux par deux. Le récapitulatif des poids des piétons se trouve dans le tableau 2.6.

Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Test 1	380	450	460	430	500	350	500	600	450	380	530	400	410	350	/
Test 2	520/600	500/550	370/520	340/450	430/530	800	450	400	390	490	810	700	650	660	750
Test 3	700	520	700	500	580	570	470	580	530	400	400	600	450	650	430

TABLE 2.6 – Salle d'étude - Masses des piétons suivant l'ordre de passage [N]

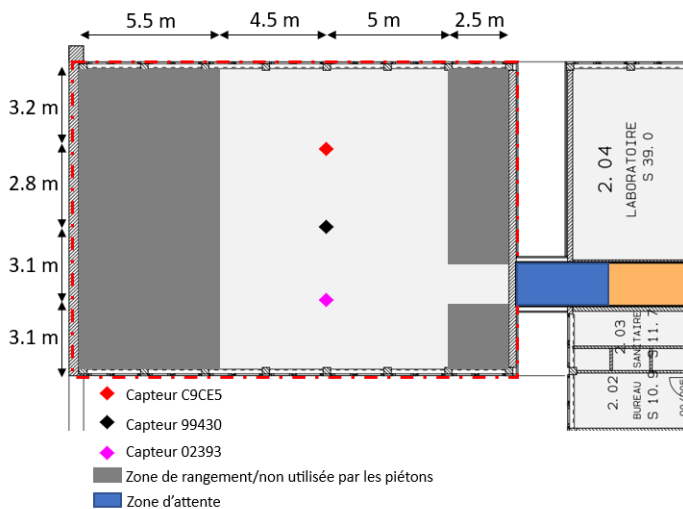


FIGURE 2.23 – Salle d'étude - Plan annoté

FIGURE 2.24 – Configuration de l'étude

### 2.5.3.2 Fréquences propres

Avant d'interpréter les résultats, il est intéressant d'identifier les fréquences propres du plancher. En exprimant le signal enregistré dans le domaine fréquentiel, trois fréquences propres principales sont identifiées. Le contenu fréquentiel obtenu aux trois capteurs est superposé à la figure 2.31.

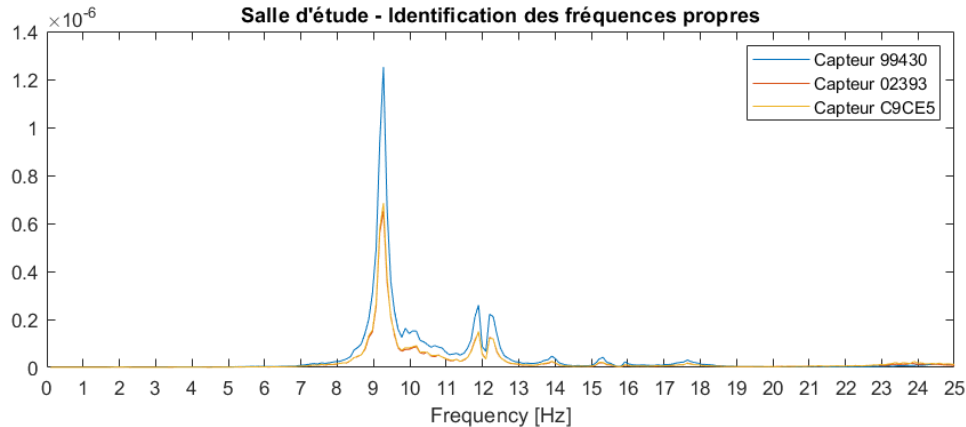


FIGURE 2.25 – Salle d'étude - Contenu fréquentiel

Les trois pics principaux sont observés à des fréquences égales d'un capteur à l'autre. Ils sont observés aux fréquences suivantes :

- $f_1 = 9.3$  Hz
- $f_2 = 11.8$  Hz
- $f_3 = 12.2$  Hz

Un autre maxima assez léger est observé aux alentours de 10 Hz. Il est cependant moins défini que les autres. Cela prêche alors à penser qu'il provient plutôt de la fréquence de marche. Il peut également être constaté que le capteur 99430 a enregistré de plus grandes amplitudes dans les trois modes observés. Il est donc attendu d'en observer les effets dans l'évolution de l'écart type du signal.

### 2.5.3.3 Écart type

L'évolution des écarts types des tests dans la salle d'étude présente peu de fluctuations. L'écart type augmente similairement d'un test à l'autre mais aussi d'un capteur à l'autre. Il peut être constaté que le capteur 99430 a enregistré des données plus élevées que les deux autres. De plus, ces deux derniers présentent des amplitudes similaires.

Il peut être sensé d'imaginer qu'un test réalisé avec plus de piétons engendre une plus grande amplitude à la fin du test. Cependant, il peut être constaté que l'évolution de l'indicateur lors du second test est moins importante qu'au premier. En réalité, cela est expliqué par le fait que la vitesse moyenne des piétons diffère d'un test à l'autre. Lors du premier test, la plage de fréquences engendrées par les pas correspond mieux aux fréquences propres du plancher. Celui-ci est alors entré en résonance de manière plus conséquente.

Une dispersion des résultats est tout de même observée lorsque le nombre participants atteint une dizaine de piétons.

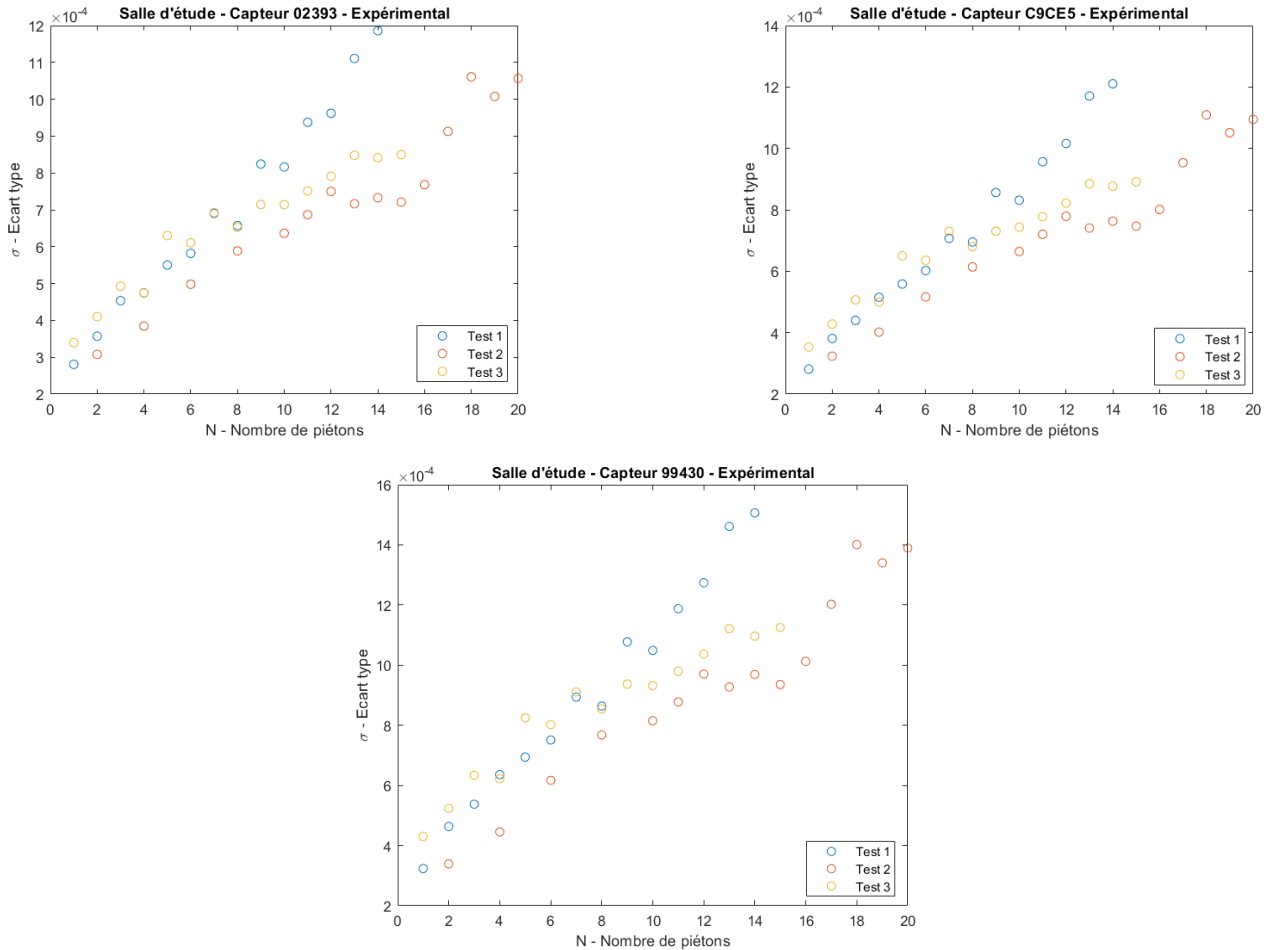


FIGURE 2.26 – Salle d'étude - Évolution de l'écart type du signal en fonction du nombre de piétons

### 2.5.3.4 Formes des modes

Des hypothèses peuvent être posées quant à la forme des modes suite à l'analyse des différentes données. Les informations suivantes ont été considérées dans la réflexion.

- Le capteur central enregistre une plus grande accélération
- Les trois modes identifiées sont relativement bien distincts
- Ces mêmes modes sont tous visibles du point de vue de chaque capteur
- Les capteurs sont alignés dans la plus petite dimension du plancher.

Il a été estimé que la forme des modes varie dans la longueur du plancher. Une variation de la forme du mode dans la largeur a été écartée car s'il y en avait une, les capteurs extérieurs enregistreraient une fréquence propre non identifiée sur le capteur central. Ce qui n'est pas le cas ici.

Les formes des modes sont illustrées à la figure 2.27. Les capteurs ont également été représentés afin de visualiser l'effet des modes sur l'accélération enregistrée aux différents points. Il faut garder en tête que le deuxième et le troisième mode ont une contribution à cette dernière moins importante. Cela est justifié par leur fréquence plus élevée et illustré par l'amplitude des pics du contenu fréquentiel.

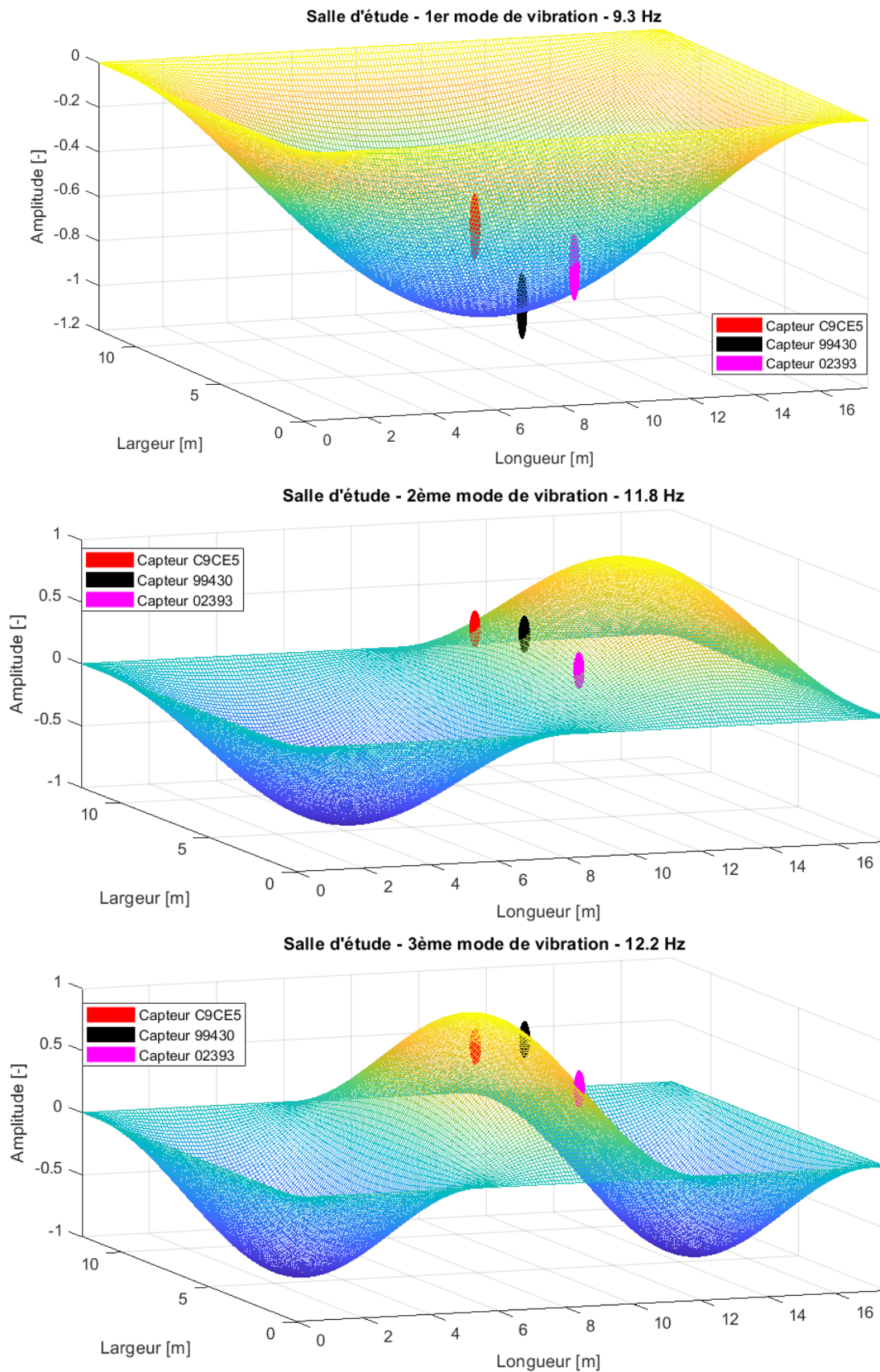


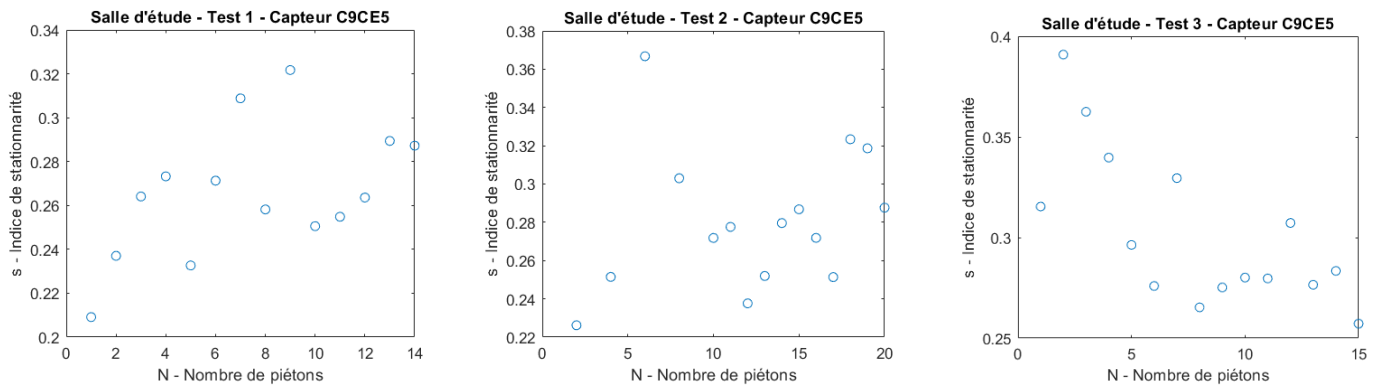
FIGURE 2.27 – Salle d'étude - Modes de vibrations

### 2.5.3.5 Indice de stationnarité

L'indice de stationnarité mesuré lors des tests varie énormément. Il est assez difficile d'identifier une certaine tendance générale dans les résultats. Il peut tout de même être notifié que l'indice obtenu lors d'un troisième test tend à diminuer avec le nombre de piétons.

L'évolution de cet indicateur est relativement semblable d'un capteur à l'autre. Cependant, les valeurs de l'indice varient tout de même légèrement. La position du capteur influence d'une certaine façon la stationnarité mesurée.

De manière plus générale, l'ordre de grandeur obtenu est relativement similaire aux trois tests. Une telle variabilité dans les résultats peut être expliquée par de grandes variations dans le comportement des piétons. Il est également possible qu'au début des tests, des élèves présents dans le local soient à l'origine de vibrations. Le traitement des données réalisé a pour but d'uniquement diminuer l'effet de pics d'accélération. Si une vibration est induite de manière quasi-permanente, l'indice de stationnarité en est directement impacté.



L'évolution de la moyenne de l'indicateur montre deux phases. Dans un premier temps, une augmentation de l'indice de stationnarité, puis une diminution. La forme des résultats laisse penser que les indicateurs relatifs aux premiers piétons devraient être plus grands. De cette façon, l'indice de stationnarité se rapprocherait fortement de ce qui pourrait être attendu. Comme mentionné précédemment, cela peut être dû à des vibrations non contrôlées apparues lors des tests. Cependant, aucune conclusion ne peut être prise sur base de suppositions. Il sera intéressant d'observer ce que les modèles numériques prédisent de manière plus précise.

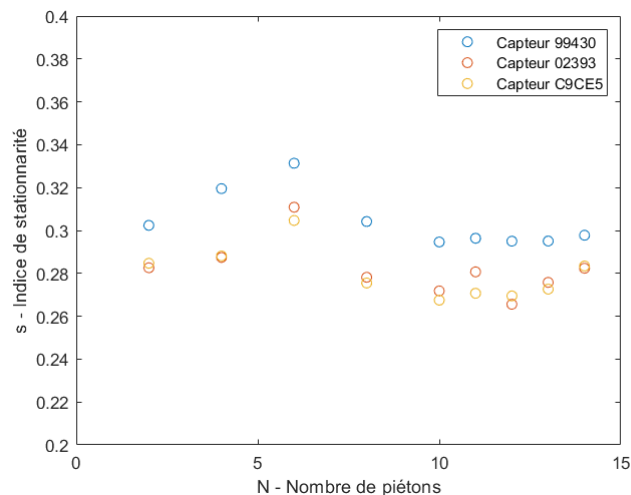


FIGURE 2.28 – Salle d'étude - Indice de stationnarité moyen



## 2.5.4 Salle d'expression

### 2.5.4.1 Contexte

La salle d'expression est à la base une salle de danse. Il n'y avait donc pas énormément de mobilier ou de matériel gênant le déroulement de la prise de mesures. Seuls une armoire et quelques équipements étaient rangés le long d'un mur sur un mètre de large. Le revêtement du plancher est en caoutchouc et permet d'absorber les vibrations compte tenu de la fonction initiale de la salle. Il a été supposé que le comportement vibratoire du plancher est indépendant des locaux voisins. La disposition des murs ainsi que des colonnes permet de le supposer. Les étudiants attendaient dans le couloir leur passage assis sur des bancs.

Le plancher est soutenu par des poutres en béton au niveau des colonnes visibles sur la figure 2.35. Le nombre de travées est donc égal à 6. Sur le plan reçu du directeur de l'établissement, seules deux poutres sont représentées. Cependant, en vérifiant à l'étage inférieur, j'ai pu en identifier d'autres.

Le premier test s'est déroulé avec 16 personnes et les deux suivants avec 15. Les trois prises de mesures se sont déroulées en 15 périodes. J'ai à nouveau participé aux deux dernières. Le poids des participants se retrouve dans le tableau 2.7.

Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Test 1	430/550	520	500	430	500	550	520	630	450	460	650	550	650	710	660
Test 2	530	430	650	700	480	500	470	560	600	600	630	530	700	650	1000
Test 3	430	500	600	600	580	460	630	450	530	510	560	400	550	710	1000

TABLE 2.7 – Salle d'expression - Masses des piétons suivant l'ordre de passage [N]

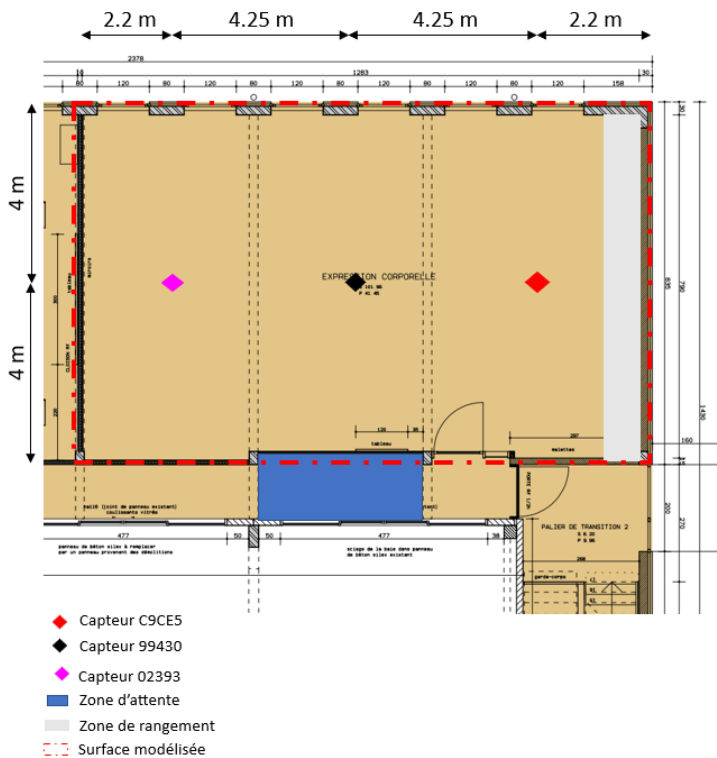


FIGURE 2.29 – Salle d'expression - Plan annoté



FIGURE 2.30 – Salle d'expression

### 2.5.4.2 Fréquences propres

En observant le contenu fréquentiel des tests réalisés dans la salle d'expression, trois fréquences propres principales sont identifiées. Les pics sont relativement bien définis et se superposent presque parfaitement. Le contenu fréquentiel obtenu aux trois capteurs est superposé à la figure 2.31.

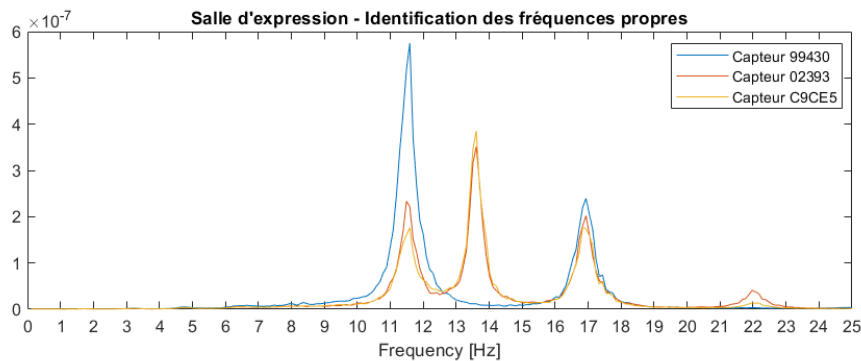


FIGURE 2.31 – Salle d'expression - Contenu fréquentiel

Le capteur 99430 n'a pas enregistré la présence du second mode de vibrations. Cela signifie qu'il est placé exactement à un noeud de ce dernier. Les fréquences propres prennent les valeurs suivantes :

- $f_1 = 11.7$  Hz
- $f_2 = 13.6$  Hz
- $f_3 = 16.9$  Hz

Le premier mode propre influence plus particulièrement le capteur situé au centre. Cependant, avec la présence du second mode qui n'influence pas le capteur 99430 et le troisième qui induit des vibrations équivalentes, l'amplitude enregistrée doit être relativement semblable d'un point de mesure à l'autre.

Un autre léger pic peut être observé à 22 Hz. Cependant, sa fréquence est trop élevée pour être prise en compte dans ce travail. De plus, l'amplitude du mode est relativement petite.

### 2.5.4.3 Écart type

Une variabilité entre les différents tests peut être remarquée. Lors du troisième test, une forte augmentation de l'accélération apparaît dès le deuxième piéton. Il est possible que cela soit dû à un bon calibrage de la fréquence de marche sur les fréquences propres du plancher. Cela n'a duré qu'un certain temps jusqu'à retrouver une évolution semblable au second test.

L'indicateur est relativement similaire d'un capteur à l'autre comme prédit lors de la détermination des fréquences propres.

Lors du premier test qui s'est déroulé avec 16 piétons, l'accélération a atteint une sorte de palier à partir de 10 personnes. Cela paraît être un effet du comportement des piétons, car l'amplitude du signal a fini par augmenter vers des valeurs similaires aux deux autres tests. D'après les observations faites lors de la réalisation de la prise de mesure, les piétons ont eu tendance à marcher en groupe et à tourner en rond. Ce phénomène s'est produit inconsciemment. Il est donc possible qu'un rythme de marche général se soit installé. La probabilité que les piétons marchent en opposition de phase est plus élevée. De plus, il est également possible que la fréquence du pas, liée à cette vitesse moyenne, ne concorde pas bien avec les fréquences propres.

Lorsque je me suis aperçu du phénomène, il a été demandé aux piétons de se disperser. Cela peut donc justifier cette remontée de l'amplitude.

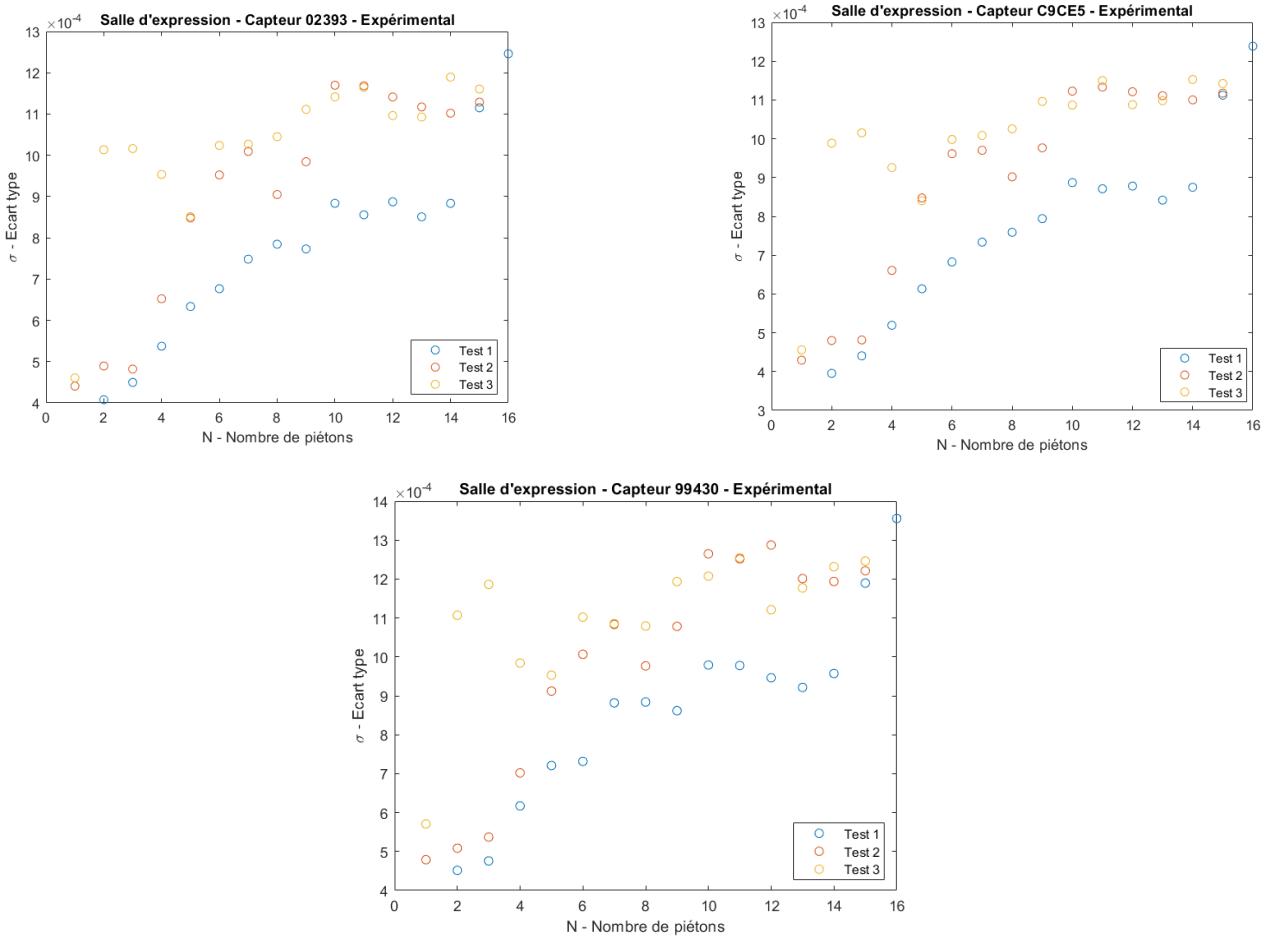


FIGURE 2.32 – Salle d’expression - Évolution de l’écart type du signal en fonction du nombre de piétons

#### 2.5.4.4 Formes des modes

Afin d’émettre des hypothèses sur la forme des modes, certaines informations permettent de guider la réflexion.

- Le capteur 99430 est situé sur un noeud du second mode
- Le troisième mode fournit une accélération équivalente aux trois capteurs
- L’amplitude dans le premier mode est beaucoup plus importante au capteur central
- Les fréquences propres sont relativement bien distinctes.

Il est donc à nouveau supposé que les modes de vibrations varient spécifiquement dans la longueur du plancher. Ils sont illustrés à la figure 2.33.

Il reste important de noter que, comme les capteurs sont tous les trois placés sur une médiane du plancher, si la forme du mode varie dans la largeur de celui-ci, aucun point de mesure ne l’identifierait. Cela est valable si on part de l’hypothèse que la forme passerait d’un demi sinus à un sinus entier (2 ventres avec le noeud au centre). Comme la modélisation se basera sur les données obtenues aux trois points de mesure, il n’est pas très important d’avoir l’information comme aucun impact n’est relaté du point de vue des capteurs.

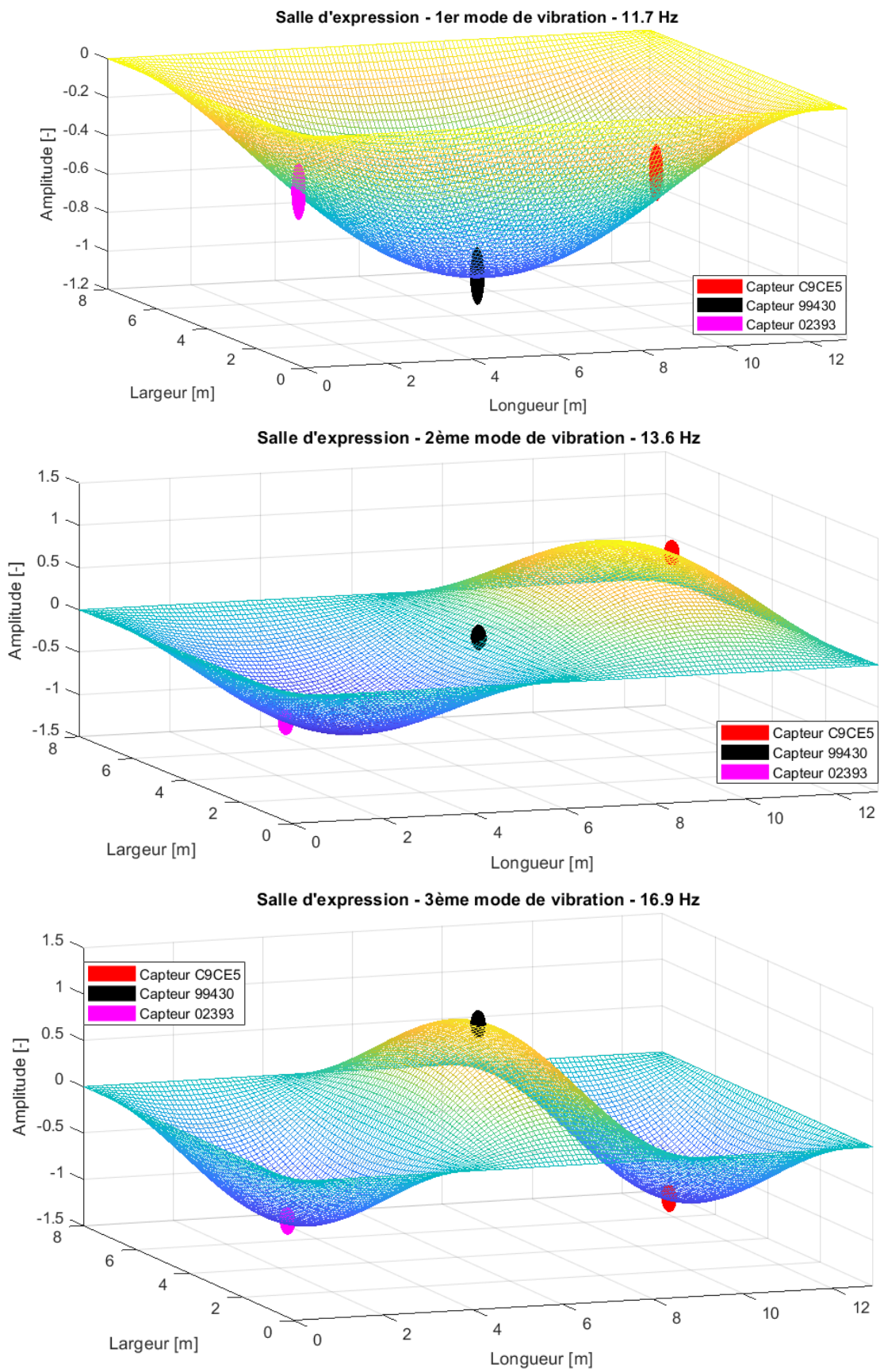
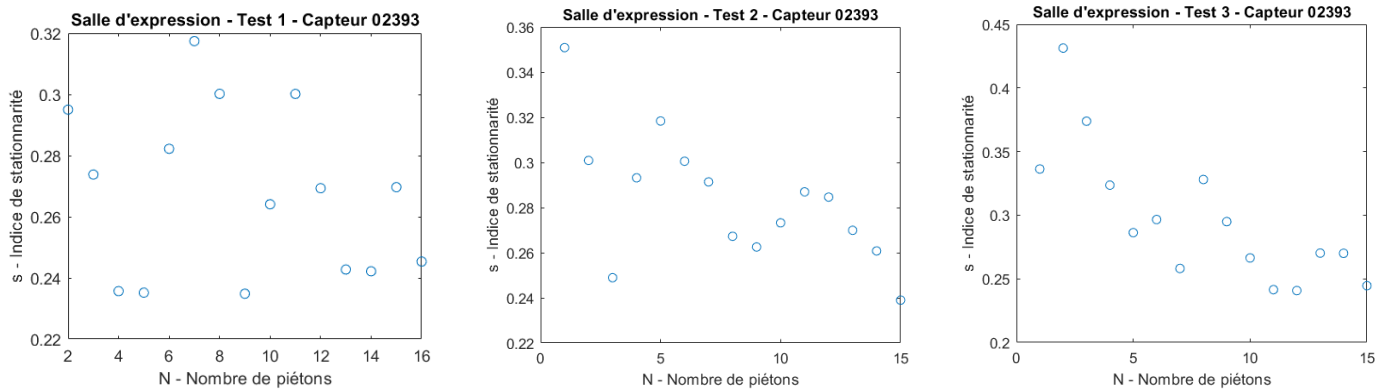


FIGURE 2.33 – Salle d'expression - Modes de vibrations

### 2.5.4.5 Indice de stationnarité

La variabilité au niveau de l'indice de stationnarité est à nouveau relativement importante. Il est cependant possible d'observer une tendance au niveau du second et du troisième test.

L'ordre de grandeur de l'indice de stationnarité au troisième test est plus élevé pour les premiers piétons. Cela laisse penser que le plancher aurait été sollicité par des éléments extérieurs au début des tests. Il est alors possible qu'en marchant dans les couloirs, des personnes aient induit des vibrations sans le vouloir dans la zone de test. Comme les participants attendaient justement dans ce couloir, ils ont pu faire vibrer le plancher en se déplaçant.



Une nouvelles fois, l'indicateur moyen a tendance à diminuer avec le nombre de piétons. On n'observe pas vraiment de stabilisation dans l'évolution du signal mis à part aux alentours du treizième piéton. Cependant, il pourrait simplement s'agir de fluctuations. La diminution de l'indice de stationnarité se trouve autour de 25% entre le début et la fin des prises de mesure.

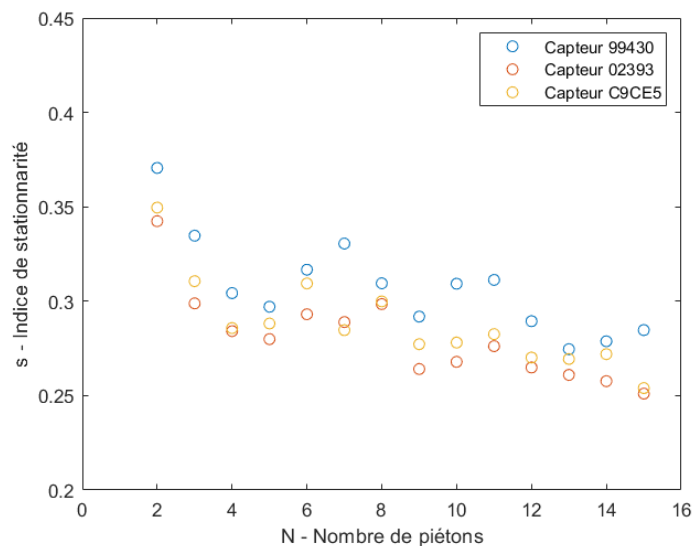


FIGURE 2.34 – Salle d'expression - Indice de stationnarité moyen

## 2.5.5 Salle de répétition

### 2.5.5.1 Contexte

Ce local a été construit récemment dans le cadre d'un agrandissement de l'établissement scolaire. Les travaux entrepris consistaient en la construction d'un étage supplémentaire par dessus la structure existante. Les planchers de cette extension sont tous réalisés à partir d'éléments en bois. Plus particulièrement, il s'agit de panneaux en bois lamellé collé avec une structure faite de poutres en bois. Cependant, une certaine incertitude persiste en ce qui concerne la structure construite directement au dessus de l'ancien bâtiment.

Ce plancher est un peu plus étroit que les précédents mais est cependant plus long. Le mobilier a été placé dans le fond du local sur une largeur de 1m. Les élèves n'ont pas pu attendre leur passage dans le couloir et ont donc dû rester dans la salle de répétition. Pour ce faire, une zone dédiée à cet effet a été délimitée à l'entrée du local. Lors des tests, les piétons n'y circulent donc pas.

Un revêtement en caoutchouc se retrouve à la surface du plancher. Au vu des informations reçues, il est cependant difficile de déterminer si l'amortissement associé est significatif.

Le premier test a été réalisé avec 18 piétons. Cependant, par manque de disponibilité d'élèves, les deux autres ont été réalisés avec 13 et 14 personnes. Le poids des piétons est repris dans le tableau 2.8.

Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Test 1	720/850	580/460	550/550	600	720	550	550	650	610	690	450	530	500	630	650
Test 2	550	560	580	780	490	530	480	600	580	700	760	650	1000	/	/
Test 3	600	700	610	640	820	560	580	540	640	630	760	780	690	1000	/

TABLE 2.8 – Salle de répétition - Masses des piétons suivant l'ordre de passage [N]

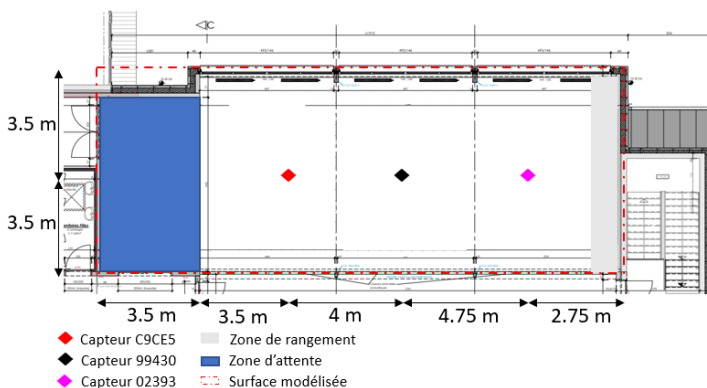


FIGURE 2.35 – Salle de répétition - Plan annoté



FIGURE 2.36 – Salle de répétition

### 2.5.5.2 Fréquences propres

En analysant le contenu fréquentiel, il peut être observé qu'un des capteurs montre des pics se produisant à des endroits différents. Cela est uniquement le cas pour les premiers modes. A partir du troisième mode, la même fréquence est enregistrée selon les trois capteurs.

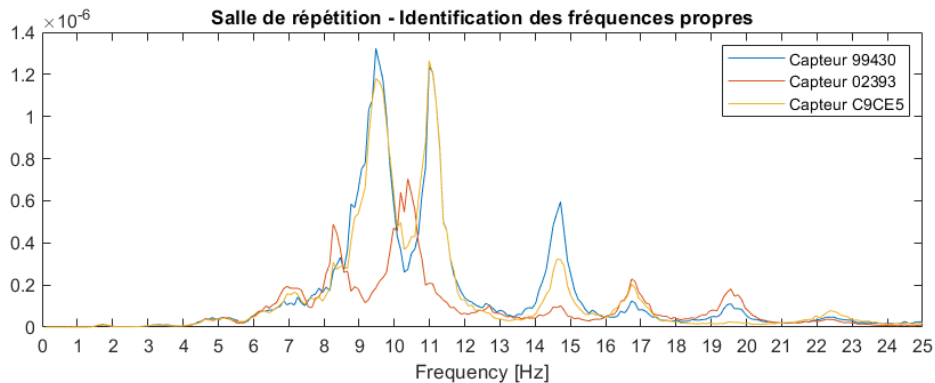


FIGURE 2.37 – Salle de répétition - Contenu fréquentiel

Ce genre de disposition peut être causé par des modes de vibrations locaux. Cela voudrait dire qu'à l'endroit où était positionné le capteur 02393, le plancher fonctionne différemment que quelques mètres plus loin. Comme une incertitude réside au niveau de la structure portante, il est difficile d'en comprendre la raison. Il paraît logique que le plancher soit conçu d'une manière similaire étant donné la symétrie dans la structure. Il peut être rappelé que l'entièreté du mobilier a été condensée à côté du capteur concerné. Cela pourrait potentiellement avoir un impact sur la mesure.

Afin de simplifier la situation, il est considéré que les modes se produisent tous aux mêmes fréquences. Il devra être vérifié par la suite que le modèle numérique approche tout de même les données expérimentales. Les trois premiers modes propres se produisent alors aux fréquences suivantes.

- $f_1 = 9.8$  Hz
- $f_2 = 11.2$  Hz
- $f_3 = 14.7$  Hz

Un quatrième voire un cinquième mode pourraient être pris en compte. Cependant, en considérant l'hypothèse énoncée ci dessus, il est préférable de se concentrer sur les trois premiers modes et observer s'il y a des grosses différences. De plus, les amplitudes des modes suivants sont relativement faibles comparées aux autres pics.

### 2.5.5.3 Écart type

L'évolution de l'écart type est assez similaire d'un test à l'autre. la variabilité entre les résultats est relativement faible. Il peut tout de même être remarqué que l'amplitude du signal est relativement élevée au début du premier test. Il en est de même pour la fin du troisième test. Ce dernier atteint des accélérations plus importantes que le premier test se déroulant à 18 personnes. Il est fort probable que les piétons ont donc marché à des vitesses dont les fréquences associées sont plus proches de fréquences propres.

Le capteur 02393 a enregistré des amplitudes un peu plus faibles. Cela coïncide avec les amplitudes observées dans le domaine fréquentiel.

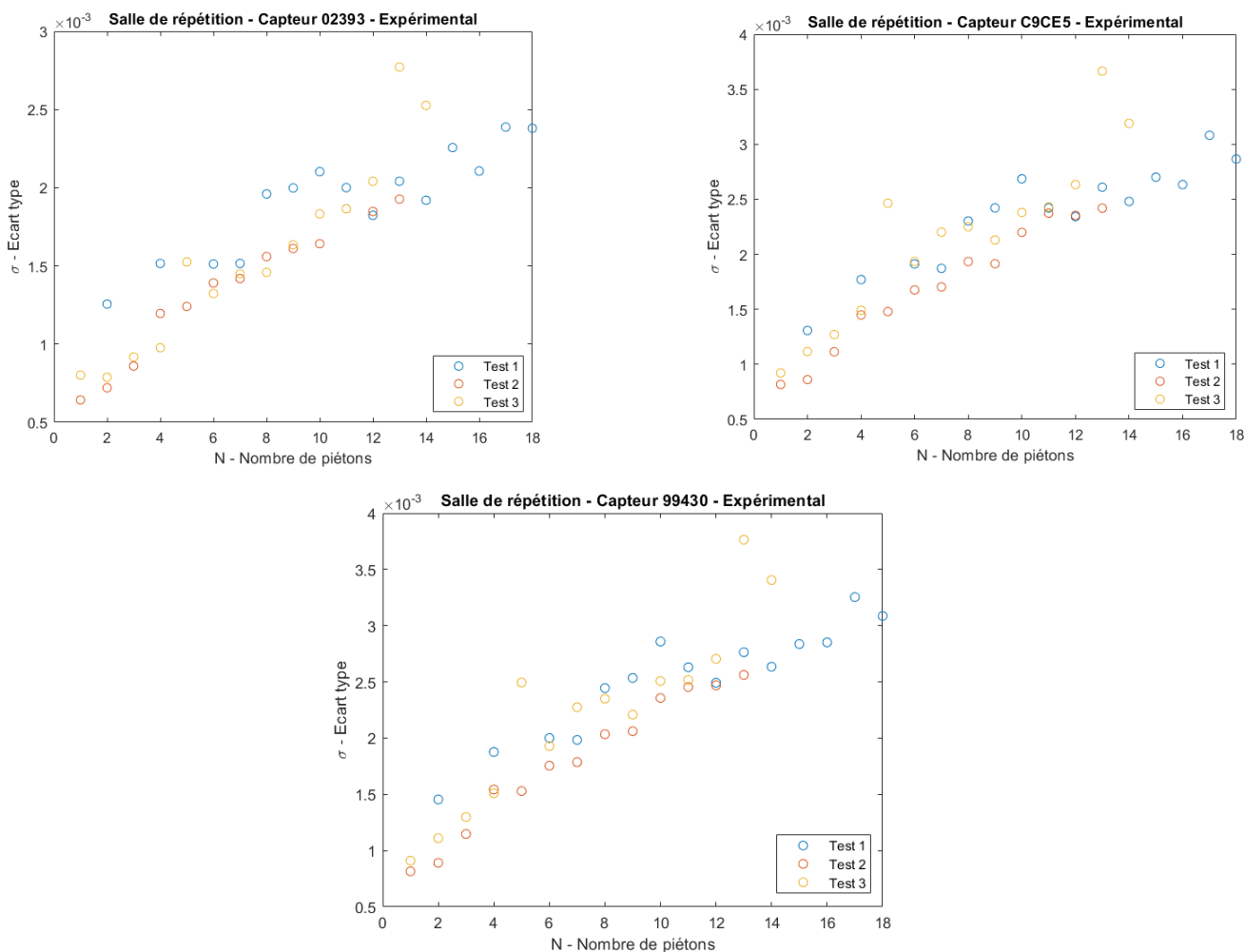


FIGURE 2.38 – Salle de répétition - Évolution de l'écart type du signal en fonction du nombre de piétons

#### 2.5.5.4 Formes des modes

Dans le cas de la salle de répétition, il y a un peu moins d'indices permettant de déterminer la forme des modes. On retrouve tout de même les informations suivantes :

- Les fréquences sont relativement distinctes
- Le capteur 99430 et C9CE5 semblent enregistrer une amplitude similaire dans les deux premiers modes
- Le même nombre de pics est enregistré pour tous les capteurs.

Il semblerait que le capteur 99430 et C9CE5 se trouvent de part et d'autre d'un maxima du premier mode et du second mode. Lors de ce test, les capteurs ont été placés préférentiellement sur un côté du plancher. Cela explique la difficulté de comprendre comment les modes de vibrations fonctionnent. Les formes des modes sont à nouveau supposées varier dans la longueur du plancher. Cela est dû au fait que le plancher est trop étroit pour que la forme du mode varie sur la largeur. Ce genre de mode peut se produire à des fréquences plus élevées.

L'hypothèse posée quant à la forme des modes est illustrée à la figure 2.39.



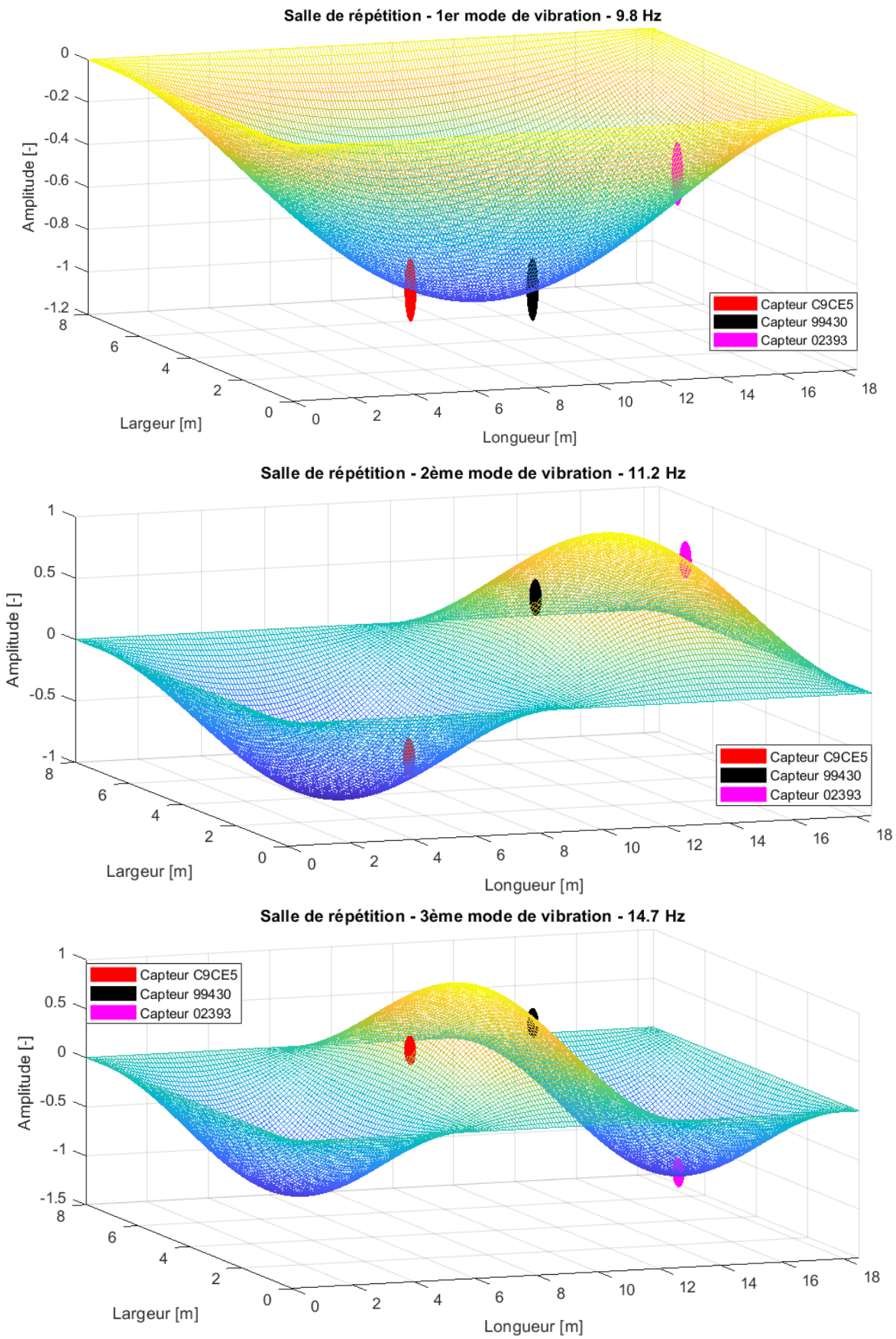
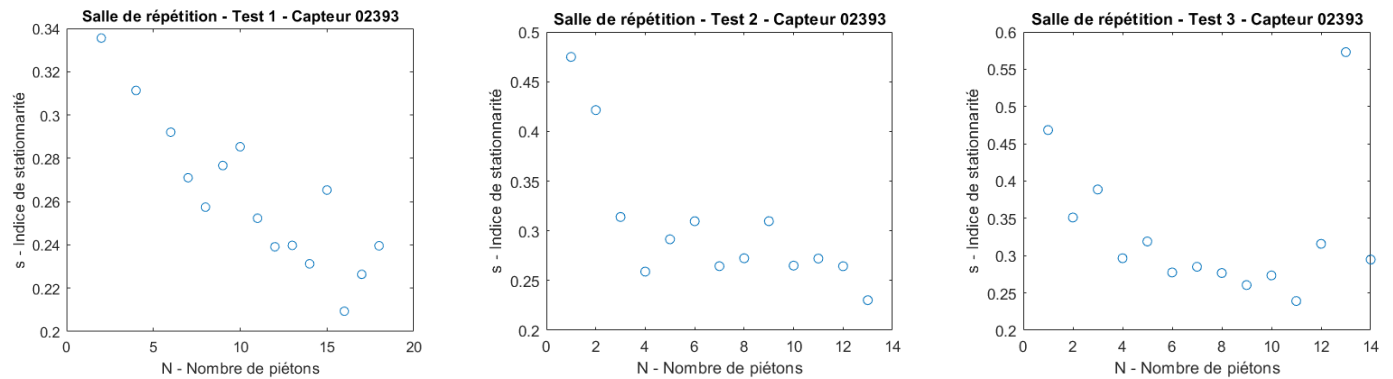


FIGURE 2.39 – Salle de répétition - Modes de vibrations

### 2.5.5.5 Indice de stationnarité

L'évolution de l'indice de stationnarité mesuré au niveau de la salle de répétition montre une certaine tendance à décroître. Le premier test illustre toujours la présence d'une variabilité assez importante.

L'évolution des indices au niveau des deux autres tests ressemble plus à des résultats auxquels on aurait pu s'attendre. On observe la formation d'un palier à partir d'un certain nombre de personnes. A partir de 5 piétons, il semblerait que le plancher considéré puisse atteindre un état stationnaire.



La moyenne de l'indice de stationnarité ne fait que confirmer la tendance observée dans les tests séparément. Sa diminution est aux alentours de 30% également. la formation d'un palier d'un point de vue général est alors observée à partir de 7-8 piétons.

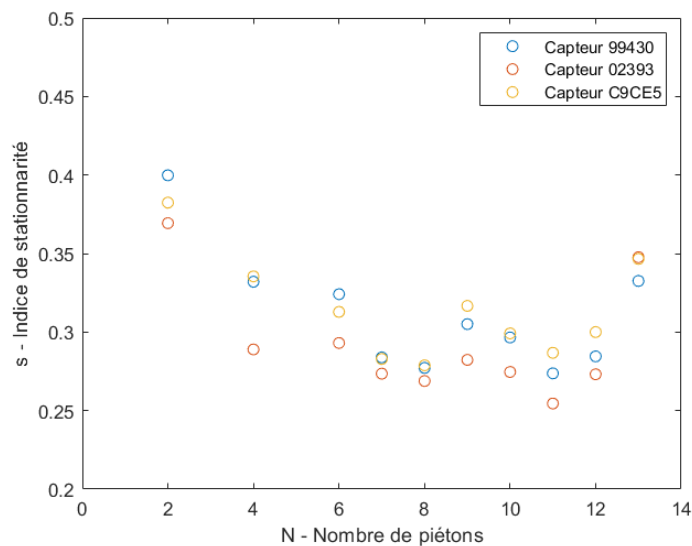


FIGURE 2.40 – Salle de répétition - Indice de stationnarité moyen

---

## 2.6 Conclusion

Lors de cette partie expérimentale, un certain nombre d'observations ont pu être réalisées. De plus, les résultats ont été analysés et discutés. Les différents points de ce premier chapitre sont synthétisés dans cette première conclusion.

Tout d'abord, la réalisation des prises de mesures s'est organisée en trois grandes étapes.

- La phase de recherche
- La réalisation de tests préliminaires
- La prise de mesures principales.

Quelques désavantages des tests *in situ* ont été identifiés lors de ces différentes phases. La phase de recherche est la plus chronophage. Il faut se renseigner afin d'avoir des pistes pour trouver l'objet de la recherche, prendre contact avec les différents acteurs, obtenir les accords et accorder les agendas de chacun. Cela uniquement pour avoir accès à un plancher, qui ne correspond pas forcément aux attentes "idéales".

De plus, il faut s'adapter à la configuration des lieux. Il n'est pas toujours envisageable de changer entièrement la disposition d'un local. Certains mobiliers ne peuvent être déplacés, l'espace pour stocker les biens n'est pas toujours disponible. On retrouve également des habitudes quant à l'utilisation des lieux. L'accès au plancher testé peut être privatisé, mais les déplacements dans les couloirs par exemple sont difficiles à contrôler. Cela peut donc engendrer des perturbations dans les données. Ces observations mènent donc au problème d'incertitudes qui persistent autour des tests expérimentaux. Les informations techniques, concernant les bâtiments en exploitation depuis un certain temps, sont difficiles à trouver. Il faut donc parfois se baser principalement sur les observations faites sur site, mais aussi sur des hypothèses.

Le professionnalisme de la réalisation des tests joue alors un rôle majeur. Comme la source d'incertitudes peut être élevée, il est important de faire en sorte de la limiter. Les capteurs doivent donc être placés aux mêmes positions d'une répétition de test à l'autre, il faut prendre le plus de notes possibles sur les informations accessibles, insister sur le respect du procédé ... Dans certaines situations, il faudrait même prendre des mesures supplémentaires afin de déterminer par exemple la structure du plancher. Ceci peut être exemplifié par le cas de la classe. L'incertitude sur la structure portante est trop importante pour être représentée numériquement.

Afin de pouvoir ensuite analyser les résultats, il est important de traiter le signal en amont. Pour ce faire, différents moyens peuvent être utilisés. Il est alors nécessaire de les comparer, afin de déterminer la meilleure méthode à utiliser pour le type de signal étudié. Dans le cadre de ce travail, une longue démarche a été entreprise. Le signal est alors traité de façon à observer une diminution de l'effet des valeurs aberrantes. De plus, il a été fait en sorte que cet effet soit principalement localisé afin de ne pas impacter le reste du signal. Le signal brut a également dû être recoupé afin d'obtenir les données sur la période temporelle désirée.

Dans ce travail, deux indicateurs sont principalement utilisés pour l'analyse des signaux : l'écart type et l'indice de stationnarité. Ce dernier a été défini de façon à exprimer la variabilité du comportement du signal par rapport à son comportement moyen. Il est donc attendu que ce dernier diminue en fonction du nombre de personnes.

Il est également important de définir une même base d'observation pour ces indicateurs. Dans le cas contraire, les comparaisons faites entre différents signaux perdent de l'intérêt. L'écart type est déterminé sur une même base temporelle (durée de marche à  $N$  constant) tandis que l'indice de stationnarité est établi sur une même base fréquentielle (Nombre de répétitions de la période).

---

De manière générale, l'écart type augmente avec le nombre de piétons. Des fluctuations sont cependant observées d'une manière plus ou moins importante. On constate différents effets principaux :

- Forte augmentation et diminution de l'amplitude du signal
- Apparition de paliers temporaires dans l'évolution de l'écart type
- Variabilité accentuée à partir d'un certain nombre de piétons.

Certaines observations faites lors des tests permettent de donner des éléments de réponses aux effets mentionnés.

- La concentration mentale des étudiants décroît avec le temps. A partir de dix piétons, il est important de rappeler les consignes.
- Plus le nombre de piétons augmente, plus ceux-ci ont tendance à se regrouper en petits groupes et ce, inconsciemment.
- Il arrive que petit à petit, les piétons se mettent à tourner en rond dans un sens commun.
- La vitesse des piétons est extrêmement variable au cours du temps.
- Les élèves les plus jeunes ont tendance à marcher plus vite que les plus âgés.

Les fluctuations observées entre les signaux sont probablement dues à la grande variabilité du comportement humain. Les augmentations et diminutions de l'amplitude peuvent s'expliquer par l'approche ou l'éloignement de la fréquence propre par la fréquence de la marche. Les planchers testés ne sont pas très grands, les piétons se croisent donc un nombre important de fois. Afin d'éviter de se rentrer dedans, les variations de vitesse et de direction apparaissent de plus en plus. Il sera donc intéressant d'observer par la suite la prédiction théorique faite par le modèle réalisé, et donc l'écart par rapport à ces variations.

De plus, l'évolution de l'écart type avec une analyse du signal dans le domaine fréquentiel permet d'anticiper la forme des modes de vibrations. Cela est très important pour la modélisation. Ces analyses expérimentales servent alors d'hypothèses pour la suite et doivent donc être vérifiées lors de la validation du code.

On retrouve deux comportements principaux au sein des planchers étudiés :

- Mode de vibration global dans les deux dimensions du plancher
- Mode de vibration assimilé à celui d'une poutre sur plusieurs appuis.

Ce deuxième cas se produit lorsque le plancher est constitué d'éléments porteurs dont la rigidité est très élevée par rapport aux autres éléments.

L'indice de stationnarité montre quant à lui de grandes variations d'un test à l'autre. Il est difficile d'observer directement une tendance sur base des données isolées. Certains tests montrent tout de même une tendance à diminuer. La présence de vibrations non-contrôlées au début des tests pourrait justifier le fait que pour certaines prises de mesures, une diminution nette de l'indicateur n'est pas observée. Le traitement des données réalisé ne permet pas de se prémunir de ce genre d'effets, car ces vibrations non-contrôlées ne causent pas forcément des augmentations soudaines au niveau de l'accélération du plancher.

Il peut être notifié qu'en établissant la moyenne de l'indice de stationnarité pour un test donné, une tendance commune aux différents tests à décroître est tout de même observée.

Pour justifier cela, il serait intéressant de réaliser des tests sur un plancher en laboratoire. Le contrôle des vibrations serait donc beaucoup plus important.

La suite du travail se base sur les hypothèses émises dans cette section. Elles doivent donc être vérifiées ou du moins non-réfutées afin de valider les modèles.

# Chapitre 3

## Modélisation

Afin de pouvoir comparer ce qu'un modèle théorique pourrait prédire par rapport à des données expérimentales, un modèle a été implémenté sur Matlab. Il permet de modéliser l'évolution des vibrations dans un plancher en fonction du nombre de piétons. Il s'agit d'un modèle 2D permettant de représenter le déplacement des piétons dans les deux directions du plancher. Cela signifie que les modes de vibrations sont également considérés dans les deux dimensions du plancher.

Quelques particularités du code peuvent être mentionnées :

- Le domaine est de géométrie rectangulaire dont les dimensions peuvent être adaptées
- L'origine du repère cartésien est positionné dans le coin inférieur gauche
- Le démarrage du piéton se fait idéalement sur un bord du domaine
- Le pas temporel a été déterminé à 0.01s. Ce dernier semble être un bon compromis entre précision et temps d'exécution du code.

### 3.1 Description du développement mathématique implémenté

Tout d'abord, la position du piéton au cours du temps doit être déterminée. Afin d'obtenir des déplacements les plus aléatoires possible, la vitesse ainsi que l'orientation de la marche  $\alpha$  sont définis aléatoirement dans un intervalle donné. L'angle  $\alpha$  est formé par la direction de marche du piéton et le bord extérieur d'où le piéton démarre. Dans ce modèle, le piéton se déplace en ligne droite avec une vitesse constante jusqu'à rencontrer une extrémité du domaine. La vitesse est définie selon l'orientation de la marche et doit donc être reportée dans les deux directions principales du plancher. On obtient donc un comportement similaire à un MRU dans ces deux dimensions : la longueur et la largeur. Deux vecteurs séparés sont alors utilisés pour stocker la position selon x et selon y. La position initiale d'un piéton est commune à tous.

$$x(t) = x_{0,i} + v_{sx,i}t \quad (3.1)$$

$$v_{sx,i} = v_{s,i}\cos(\alpha)$$

$$y(t) = y_{0,i} + v_{sy,i}t \quad (3.2)$$

$$v_{sy,i} = v_{s,i}\sin(\alpha)$$

- $x_{0,i}$  et  $y_{0,i}$  sont les coordonnées de la position initiale du piéton i [m].
- $v_{s,i}$  est la vitesse du piéton i [m/s].
- t est le temps [s].
- $v_{sx,i}$  et  $v_{sy,i}$  sont les vitesses exprimées dans les axes principaux [m/s].

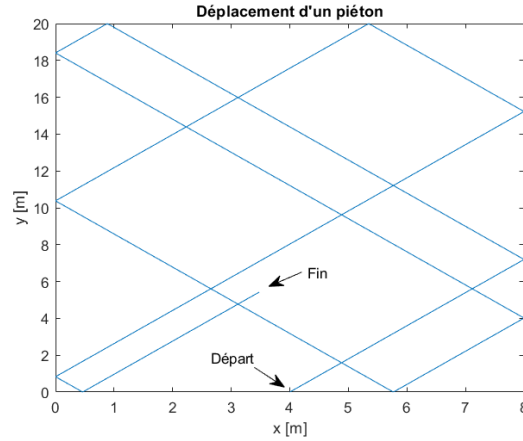


FIGURE 3.1 – Modélisation du déplacement d'un piéton

Afin de représenter un déplacement semblable aux tests expérimentaux, la position du piéton évolue de façon similaire au comportement d'une balle de billard. Cela signifie que lorsque le piéton rencontre un bord du domaine, il « rebondit » et repart dans l'autre direction. Le phénomène représenté peut s'apparenter à la réflexion d'un faisceau sur un miroir.

Cela se traduit par une modification du signe de la vitesse dans l'une ou l'autre direction en fonction du bord rencontré. Lorsque le piéton arrive sur le bord gauche ou droit, le signe de la composante de vitesse selon  $x$  est modifié. S'il s'agit du bord supérieur ou inférieur, c'est alors le signe de la composante selon  $y$  qui est changé. Il existe cependant un cas particulier à prendre en compte : lorsque le piéton rencontre un coin, les deux composantes de vitesses sont alors modifiées.

En se basant sur le cours « Analyse des structures 2 » donné par le professeur Vincent Denoël [6], les travaux de Bachmann et Ammann [1] et le travail de fin d'étude d'Estelle Huysmans [11], les différentes équations nécessaires à la modélisation de la charge dynamique induite par un piéton ont pu être déterminées. Ces développements font donc suite à l'état de l'art évoqué dans la section 1.2.

La sollicitation de la marche peut être décomposée en une série de Fourier. Cela permet d'exprimer la sollicitation comme une série de fonctions sinusoïdales. La force dynamique verticale induite par un piéton est donc définie par la formule suivante :

$$F_i(t) = \sum_{k=1}^5 W_i \alpha_k \sin[2\pi k f_s (t - t_i) - \phi_k] \quad (3.3)$$

Les normes proposent d'utiliser uniquement les trois premières harmoniques. Au-delà, leur effet est rarement significatif. Cependant, dans les cas étudiés, les fréquences propres des planchers sont relativement élevées. Cela implique donc de prendre en considération un plus grand nombre d'harmoniques. La littérature fournit très peu de documentation sur les amplitudes de Fourier au-delà de la cinquième. De ce fait, la modélisation de la sollicitation se limitera à cinq harmoniques.

Les différents paramètres de l'équation sont :

- $W_i$  est le poids du piéton  $i$  [N].
- $\alpha_k$  est l'amplitude de Fourier [%].
- $f_s$  est la fréquence du pas [Hz].
- $t$  est le temps auquel la force est considérée [s].
- $t_i$  est le temps initial auquel le piéton  $i$  a démarré [s].
- $\phi$  est le déphasage par rapport à la première harmonique [rad].

Ensuite, afin d'obtenir la force dynamique exprimée par unité de surface. La force  $F_i(t)$  est multipliée par une fonction de Dirac selon chaque direction. On obtient alors  $P_i(x, y, t)$  exprimé en  $[N/m^2]$ .

$$P_i(x, y, t) = F_i(t)\delta(x - v_{sx,i}t - x_{0,i})\delta(y - v_{sy,i}t - y_{0,i}) \quad (3.4)$$

La forme des modes peut être exprimée comme le produit de deux fonctions sinusoïdales. La forme finale dépend donc de la forme du mode exprimée dans les deux directions principales. Elle s'exprime comme suit :

$$\phi_{jl}(x, y) = \sin\left(\frac{j\pi x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{l\pi y}{L_y}\right) \quad (3.5)$$

En intégrant sur le domaine la somme des contributions de tous les piétons, on obtient la force totale dans le mode considéré. Cette contribution s'exprime comme la force de marche d'un piéton multipliée par la forme du mode.

$$P_{jl}^* = \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \sum_{i=1}^{N_p} P_i(x, y, t) \phi_{jl,i}(x, y) dx dy \quad (3.6)$$

- $\phi_{jl}(x, y)$  est la forme du mode en fonction de la position du piéton.
- $j$  et  $l$  sont des indices désignant la forme du mode projetée dans les directions principales.
- $L_x$  et  $L_y$  sont les dimensions du domaine [m].
- $N_p$  est le nombre total de piétons.
- $P_{jl}^*$  est la force totale dans le mode considéré.

Cette intégrale peut se réécrire sous la forme suivante.

$$P_{jl}^* = \sum_{i=1}^{N_p} F_i(t) \phi_{jl,i}(x, y) \quad (3.7)$$

Via la méthode d'intégration de Newmark, il est possible de déterminer l'accélération de la structure sur base de la force totale dans un mode donné. Il est également possible d'obtenir sa vitesse et son déplacement avec et sans amplification du signal. La méthode de Newmark est une généralisation des méthodes de l'accélération linéaire et constante. Cette méthode a besoin des arguments suivants :

- La masse modale du plancher  $M_j^*$  [kg].
- Le coefficient d'amortissement structurel  $\xi_j$ .
- La fréquence propre du plancher  $f_j$  [Hz].
- La force dynamique induite par l'ensemble des piétons  $P_{jl}^*$  [N].

L'état de la structure à la fin du pas de temps peut être obtenu en résolvant l'équation du mouvement. Les développements mathématiques ne sont pas illustrés ici mais se retrouvent dans le cours « Analyse des structures 2 » de Vincent Denoël [6] mentionné précédemment. Un code provenant de ce cours a été repris pour utiliser cette méthode d'intégration de Newmark pour un système à un seul degré de liberté. Via cette méthode de Newmark, l'équation du mouvement prend la forme suivante.

$$m\ddot{q}_{t+\Delta t} + f((q_{t+\Delta t}, \dot{q}_{t+\Delta t}) \rightarrow \ddot{q}_{t+\Delta t}) = p_{t+\Delta t} \quad (3.8)$$

Après discrétisation et développement, nous obtenons ces différentes expressions pour le déplacement  $dep(t)$ , la vitesse  $vit(t)$ , l'accélération  $acc(t)$  et le déplacement sans amplification  $qs(t)$ .

$$\mathbf{dep}(\mathbf{t}) = \frac{1}{akf} \left[ P_j^*(t) + m \left( \frac{1}{a\Delta t^2} dep(t-1) + \frac{1}{a\Delta t} vit(t-1) + \left( \frac{1}{2a} - 1 \right) acc(t-1) \right) + c \left( \frac{d}{a\Delta t} dep(t-1) + \left( \frac{d}{a} - 1 \right) vit(t-1) + \frac{\Delta t}{2} \left( \frac{d}{a} - 2 \right) acc(t-1) \right) \right] \quad (3.9)$$

$$\mathbf{vit}(\mathbf{t}) = \frac{d}{a\Delta t} (dep(t) - dep(t-1)) + \left( 1 - \frac{d}{a} \right) vit(t-1) + \Delta t \left( 1 - \frac{d}{2a} \right) acc(t-1) \quad (3.10)$$

$$\mathbf{acc}(\mathbf{t}) = \frac{1}{a\Delta t^2} (dep(t) - dep(t-1)) - \frac{1}{a\Delta t} vit(t-1) - \left( \frac{1}{2a} - 1 \right) acc(t-1) \quad (3.11)$$

$$\mathbf{qs}(\mathbf{t}) = \frac{P_j^*(t)}{k} \quad (3.12)$$

Avec les paramètres suivants.

- $akf = \frac{m}{a\Delta t^2} + c\frac{d}{a\Delta t} + k$
- $c = 2m\omega\xi$  - la viscosité
- $k = m\omega^2$  - la raideur
- $\omega = 2\pi f_j$  - la pulsation
- $a$  et  $d$  sont des paramètres valant respectivement 0.25 et 0.5
- $\Delta t$  - le pas de temps

Afin de résoudre ces équations de manière itérative, il faut définir des conditions initiales. Nous avons donc posé que les inconnues au premier pas de temps sont nulles. Cela signifie que le plancher est considéré initialement au repos.

Chacun des résultats obtenus doit encore être multiplié par la forme du mode à un endroit donné. Cela permet donc de déterminer la valeur de l'accélération et du déplacement au droit des capteurs. Par le principe de superposition modale, il reste ensuite à sommer les résultats obtenus pour chacun des modes considérés.

L'accélération totale en une position donnée peut donc être obtenue via l'équation suivante :

$$Acc_{jl}(x, y, t) = \sum_{k=1}^j \sum_{i=1}^l q_{ji}(t) \sin\left(\frac{k\pi x_c}{L_x}\right) \sin\left(\frac{i\pi y_c}{L_y}\right) \quad (3.13)$$

Notons que pour chaque mode considéré, une fréquence propre différente est associée. Cependant, la masse dynamique et l'amortissement sont considérés constants d'un mode à l'autre.



Les figures 3.2, 3.3 et 3.4 illustrent les données type que rend le modèle. Ces résultats sont obtenus en introduisant un piéton supplémentaire toutes les périodes de 120s. L'accélération est exprimée en fonction de la pesanteur. De cette façon, l'accélération enregistrée expérimentalement et celle numérique sont exprimées sur une même base de comparaison. Le déplacement est exprimé de plusieurs manières différentes. Les déplacements  $dep(t)$  et  $q_s(t)$  sont superposés afin de s'assurer de la présence d'une amplification. Sur la figure 3.4, le déplacement est obtenu uniquement avec la sollicitation de la marche  $F_i(t)$ . Le déplacement total prend en compte la masse des piétons,  $F_i(t) + W$ . C'est pourquoi celui augmente de plus en plus avec le temps.

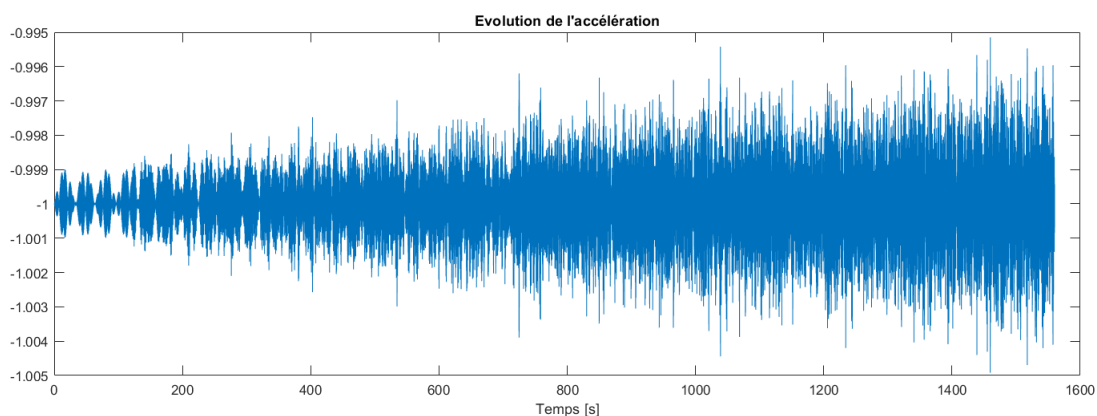


FIGURE 3.2 – Signal type obtenu numériquement

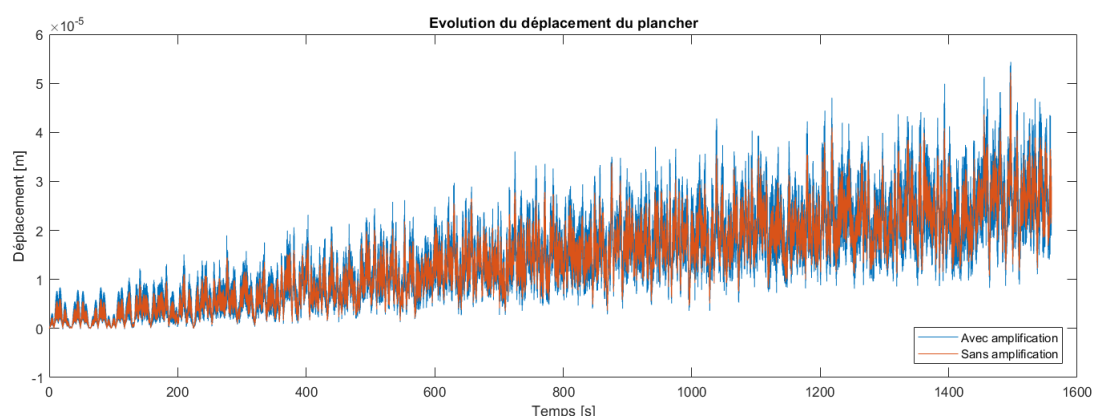


FIGURE 3.3 – Déplacement type total obtenu numériquement

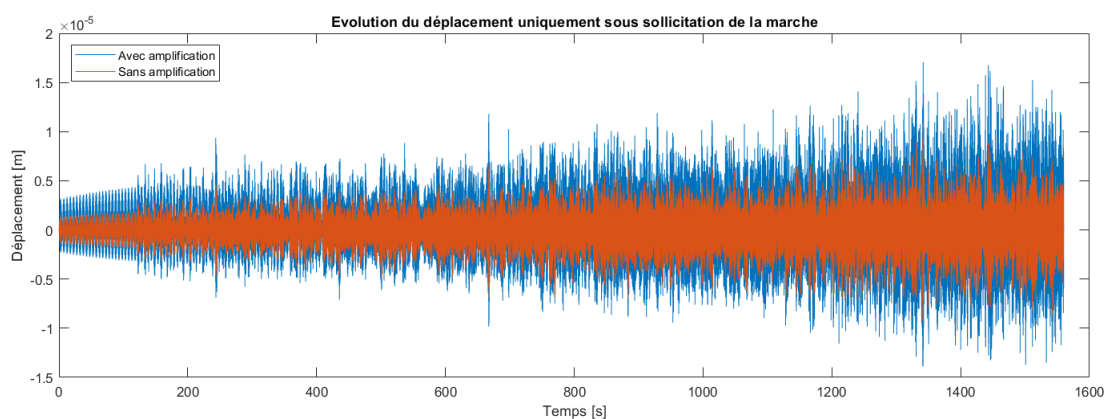


FIGURE 3.4 – Déplacement type obtenu numériquement uniquement sous sollicitation de la marche

---

## 3.2 Établissement des différents paramètres

Comme introduit précédemment, il existe différentes valeurs pour les paramètres à utiliser selon la référence de la littérature utilisée. Ils seront principalement déterminés sur base d'un ouvrage de référence « Vibrations in structures - Induced by man and machines » réalisé par H. Bachmann et W. Ammann [1]. Les paramètres concernés sont :

- L'amplitude de Fourier
- La fréquence du pas
- La vitesse du piéton
- Le poids du piéton

Les valeurs de l'amplitude de Fourier  $\alpha_k$  selon l'harmonique considérée ont été reprises de cet ouvrage. Elles sont indiquées dans la table 3.1. Ces valeurs sont supposées constantes d'une modélisation à l'autre mais pourront faire l'objet d'une discussion particulière par la suite.

$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$
0.37	0.10	0.12	0.04	0.08

TABLE 3.1 – Amplitude de Fourier - Bachmann & Ammann, 1987

La fréquence du pas dépend de la vitesse de la marche. Il est supposé dans le cadre de ce travail que les piétons ne se déplacent pas en courant. Ils circulent uniquement en marche lente, marche normale ou encore en marche rapide. En se basant sur l'ouvrage de référence, des valeurs pour la fréquence et la vitesse sont assignées à la typologie de la marche. Elles se retrouvent dans la table 3.2. Dans la programmation, la vitesse d'un piéton ainsi que sa fréquence est considérée entre la marche lente et la marche rapide. Lors d'une représentation numérique quelconque, la vitesse est choisie aléatoirement dans cet intervalle et la fréquence correspondante est calculée par interpolation linéaire. Nous nous limitons à cet intervalle afin d'être le plus proche possible des vitesses et fréquences approchées lors des tests expérimentaux.

	Marche lente	Marche normale	Marche rapide
$v_s$ [m/s]	1.1	1.5	2.2
$f_s$ [Hz]	1.7	2	2.3

TABLE 3.2 – Vitesses et fréquences d'un piéton - Bachmann & Ammann, 1987

Dans l'ouvrage de référence, le poids type d'une personne est défini aux alentours de 800N. Cela équivaut à une masse de 80kg. Lors d'une modélisation d'un tests expérimental, le poids réel des participants est pris en compte.

Suite à l'implémentation de la méthode de Newmark, d'autres paramètres sont à encoder. Ceux-ci sont fixés via des hypothèses ou des mesures expérimentales.

La fréquence propre du plancher modélisé peut faire l'objet d'une hypothèse. Cependant, suite aux tests préliminaires et principaux, la fréquence propre a déjà été mesurée expérimentalement.

La masse de la structure fait l'objet d'hypothèses car les plans d'exécution des bâtiments n'ont pas pu être obtenus avec de tels détails. En se basant sur les observations sur site, le type de matériau utilisé peut être parfois identifié. Il reste donc à faire une hypothèse sur l'épaisseur mise en oeuvre et la masse volumique.

Il reste ensuite à déterminer le coefficient d'amortissement structurel. D'après le cours « Analyse des structures 2 » (Denoël, 2017) mentionné précédemment, la valeur de ces coefficients est donnée dans la table 3.3. Il est cependant possible qu'un amortissement dynamique faible puisse poser des problèmes au niveau du comportement de la structure lorsque le phénomène de résonance peut être observé. Lors de la modélisation, l'amortissement peut donc être augmenté volontairement et atteindre des valeurs situées entre 5% et 15%.

Matériau	$\xi$
Acier soudé	0.1% - 0.5%
Acier boulonné	0.5% - 1%
Béton	1% - 2%
Bois	2% - 5%

TABLE 3.3 – Coefficient d'amortissement - Denoël, 2017

### 3.3 Validation du code

Avant de pouvoir exploiter les résultats numériques, il est important de valider le code. Cette étape consiste à s'assurer que les résultats numériques s'approchent d'une manière satisfaisante des résultats expérimentaux. Pour ce faire, les propriétés des planchers ainsi que les différents paramètres sont adaptés. Lorsqu'un plancher est modélisé, il faut que les trois tests expérimentaux qui le caractérisent soient approchés avec des paramètres de planchers identiques. Les éléments à considérer pour les différentes modélisation sont les suivants :

- Les dimensions du plancher
- La surface réelle exploitée par les piétons selon l'occupation du mobilier
- La vitesse moyenne des piétons et l'écart type associé
- La masse des piétons
- La fréquence propre de la structure
- L'amortissement dynamique
- La masse du plancher.

Cette comparaison est réalisée sur base des deux indicateurs utilisés précédemment lors du traitement des données expérimentales : l'écart type et l'indice de stationnarité. C'est donc l'évolution de ces indicateurs qui est comparée. Afin d'obtenir des indicateurs numériques représentatifs, une moyenne de ceux-ci est établie sur base d'une vingtaine de modélisations. L'écart moyen par rapport à cette moyenne est également calculé afin d'obtenir un intervalle autour de cette moyenne. L'objectif est donc d'établir des modèles qui enveloppent le plus possible les résultats expérimentaux dans ces plages de données. Comme il s'agit bien de l'écart moyen, il reste tout de même acceptable que les données expérimentales en diffèrent légèrement.

En exprimant l'accélération obtenue numériquement dans le domaine fréquentiel, il a pu être constaté que le contenu fréquentiel s'étend uniquement sur la gamme de fréquences définie par la marche. Cela signifie qu'au-delà de la fréquence maximale obtenue, le signal dans le domaine fréquentiel s'estompe graduellement. La fréquence maximale pouvant être générée numériquement est de 11.5 Hz. Elle correspond à la fréquence induite par la cinquième harmonique d'un piéton marchant à 2.2 m/s.

---

Comme il a pu être observé précédemment, les résultats expérimentaux ont un contenu fréquentiel étendu au-delà de 11.5 Hz. Il n'y a donc pas de sens d'essayer d'approcher les résultats expérimentaux directement via le modèle numérique. Si cela est tout de même réalisé, l'évolution de l'écart type du signal pourrait probablement être approchée, mais sans obtenir le même ordre de grandeur au niveau de l'indice de stationnarité.

On observe alors une limitation du code. Cette modélisation simple considère que la sollicitation induite par la marche est représentée par un sinus parfait. De plus, le nombre d'harmoniques pris en compte est fini. Le contenu fréquentiel obtenu numériquement est donc limité. Cela peut mener à ne pas visualiser les fréquences propres d'un signal généré numériquement, lorsqu'il est exprimé dans le domaine fréquentiel. Il est possible que le phénomène de résonance ne se produise pas lorsque ces fréquences propres sont supérieures aux fréquences introduites par la marche.

Il a donc été décidé de filtrer le signal expérimental sur la gamme de fréquence désirée. Pour cela, un filtre Butterworth du quatrième ordre est utilisé. Il est conçu pour laisser passer les fréquences entre 1.5 Hz et 11.5 Hz. Les fréquences doivent être normalisées par rapport à la fréquence d'échantillonnage qui est de 125 Hz. La filtration est dite bidirectionnelle, cela permet d'éviter d'introduire un décalage temporel. Ce type de filtre est caractérisé par une pente de coupure plus douce par rapport à d'autres types de filtres. Il est généralement utilisé pour atténuer certaines gammes de fréquences non désirées tout en préservant les caractéristiques du signal dans la bande passante.

L'effet du filtre est illustré spécifiquement pour chaque plancher dans les sous-sections suivantes. Le contenu fréquentiel d'un signal numérique est illustré à la figure 3.5. Les différents pics observés représentent principalement les fréquences de la marche. Le plancher représenté est celui de la salle d'étude. Le plus grand pic correspond à la première fréquence propre du plancher. Il se situe bien aux alentours de 9.3 Hz. Les autres pics représentent les fréquences de marche des piétons.

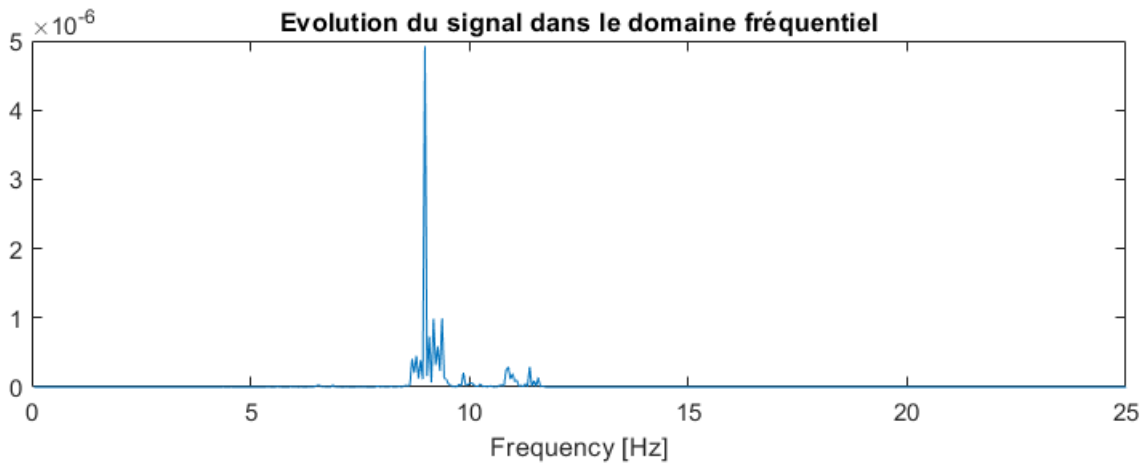


FIGURE 3.5 – Salle d'étude - Signal numérique

Dans cette section, les indicateurs sont uniquement illustrés pour un des tests réalisés. Les graphiques relatifs aux autres tests se retrouvent dans l'annexe A.5.

### 3.3.1 Évolution des fréquences propres et de l'amortissement

Comme les mesures expérimentales sont effectuées sur un nombre de piétons croissant, il est intéressant d'analyser si des propriétés évoluent avec le temps. Dans la note d'hypothèse, le coefficient d'amortissement est supposé constant. La démarche entreprise vise donc à pouvoir justifier cette hypothèse mais aussi vérifier que la fréquence propre ne varie pas. Dans le cas contraire, ces variations doivent être prises en compte afin d'obtenir une modélisation la plus fidèle possible.

Pour cela, le contenu fréquentiel de chaque période, à piétons constants, d'un même test est superposé. De cette façon, il est possible d'en caractériser l'évolution. La figure 3.6 illustre l'évolution du domaine fréquentiel dans le cas de la salle d'expression.

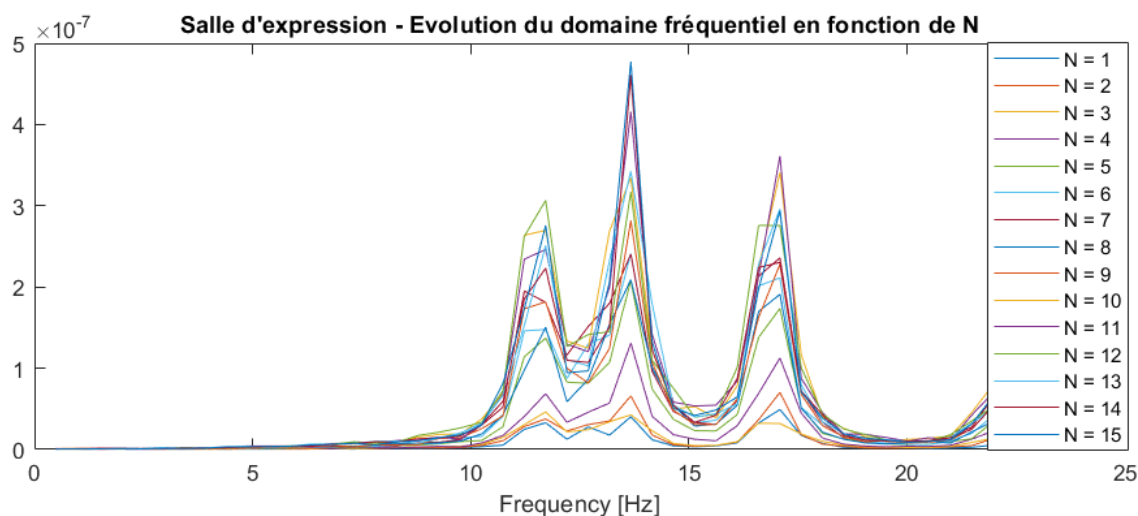


FIGURE 3.6 – Effet de N sur le contenu fréquentiel

Il peut être directement constaté que l'amplitude du contenu fréquentiel a tendance à augmenter avec le nombre de piétons. Cela a du sens car la sollicitation a tendance à évoluer également. Cependant, certaines courbes correspondant à un N inférieur, passent au-dessus de la courbe relative à un N supérieur. Cette constatation est en lien avec les fluctuations observées dans l'évolution de l'écart type des mesures expérimentales. Pour certains nombres de piétons, la sollicitation d'un point de vue fréquentiel est plus importante. Comme déjà mentionné, la vitesse des piétons est à l'origine de ce phénomène. La fréquence liée à la vitesse correspond d'une meilleure façon aux fréquences propres. Cela implique que le phénomène de résonance dans le mode concerné se produit. Il n'y a donc pas de diminution marquée de l'amplitude des pics lors d'une augmentation de N. L'hypothèse faite à propos de l'amortissement dynamique peut être conservée.

De plus, les trois pics identifiés précédemment évoluent autour des mêmes abscisses. Quelques variations peuvent être cependant observées. Elles proviennent principalement de la fenêtre sur laquelle le signal a été observé. De la même façon que pour l'amortissement, les fréquences propres peuvent être considérées constantes. Cette démarche a également été appliquée aux autres planchers qui vont être approchés numériquement. L'évolution de leur contenu fréquentiel dépendant de N se retrouve en annexe A.5.

### 3.3.2 Modélisation - Bibliothèque

Les modes de vibration dans la bibliothèque ont été identifiés précédemment dans la section 2.5.2. Le premier mode apparaît à une fréquence de 12.5 Hz. Comme le modèle ne génère pas des fréquences au-delà de 11.5 Hz, il est intéressant d'observer le contenu fréquentiel du signal expérimental filtré. On constate que la gamme de fréquences sur laquelle est filtré le signal ne permet pas d'observer de résonance dans le premier mode.

Cela signifie que l'accélération du plancher est principalement définie par différents paramètres tels que le poids des piétons, leur position ainsi que la fréquence de marche. Elle n'est donc pas gouvernée par un effet des modes propres. Cela peut être observé sur le zoom réalisé sur le signal filtré. Uniquement les fréquences des pas sont identifiées.

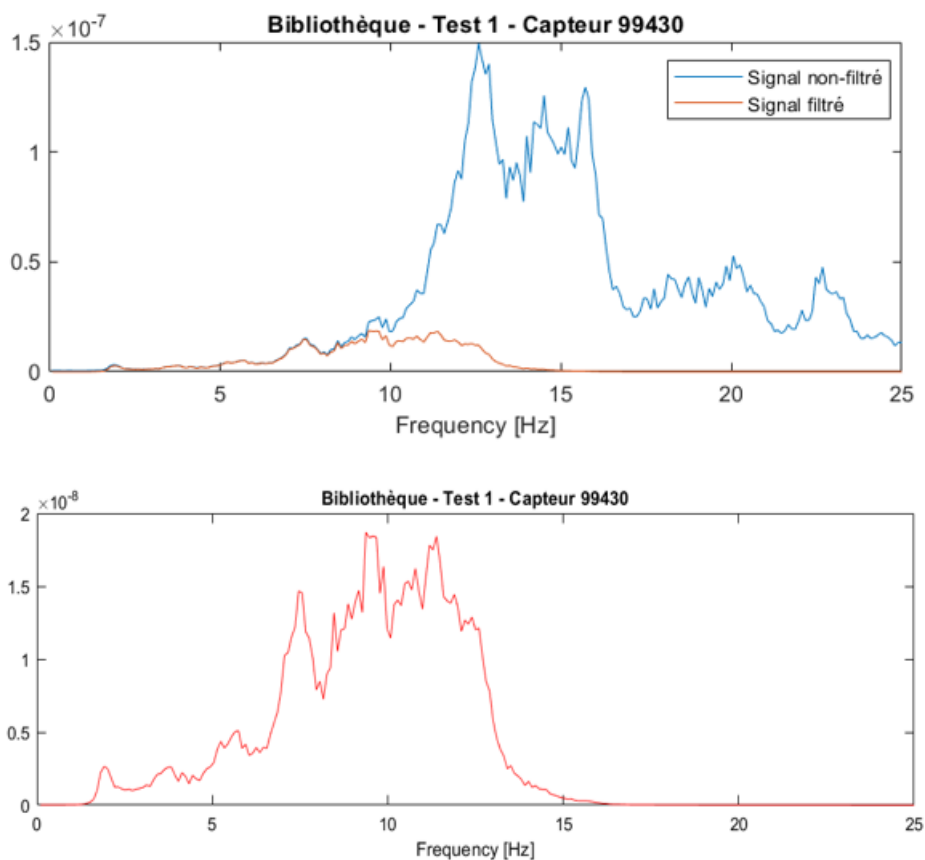


FIGURE 3.7 – Bibliothèque - Effet du filtre

Il est donc peu intéressant d'essayer de modéliser le plancher de la bibliothèque. L'accélération varie énormément d'une modélisation à l'autre car elle ne suit plus vraiment une tendance donnée par les modes de vibrations. Elle ne va donc pas être approchée d'une manière satisfaisante en raison du côté aléatoire de la marche des piétons. La variabilité est trop importante.

Les tests ont été réalisés avant d'avoir construit le code entièrement et d'avoir pu constater ses limitations. Même si les prises de mesures ne sont pas exploitées comme prévu initialement, elles ont permis d'observer les limitations du code mais aussi de mieux comprendre les différents résultats observés.

### 3.3.3 Modélisation - Salle d'étude

En filtrant le signal expérimental, l'effet du deuxième et troisième mode sont relativement diminués. Ils peuvent tout de même être identifiés. Ils sont donc pris en compte lors de la modélisation.

Si trop de modes sont considérés dans la modélisation, il est facile de s'en rendre compte. La valeur de l'indice de stationnarité en sera affectée. Vu l'amplitude de ces modes, leur impact sur l'évolution de l'écart type est très faible voire négligeable. Il faut donc ajuster la modélisation pour que les deux indicateurs soient correctement approximés.

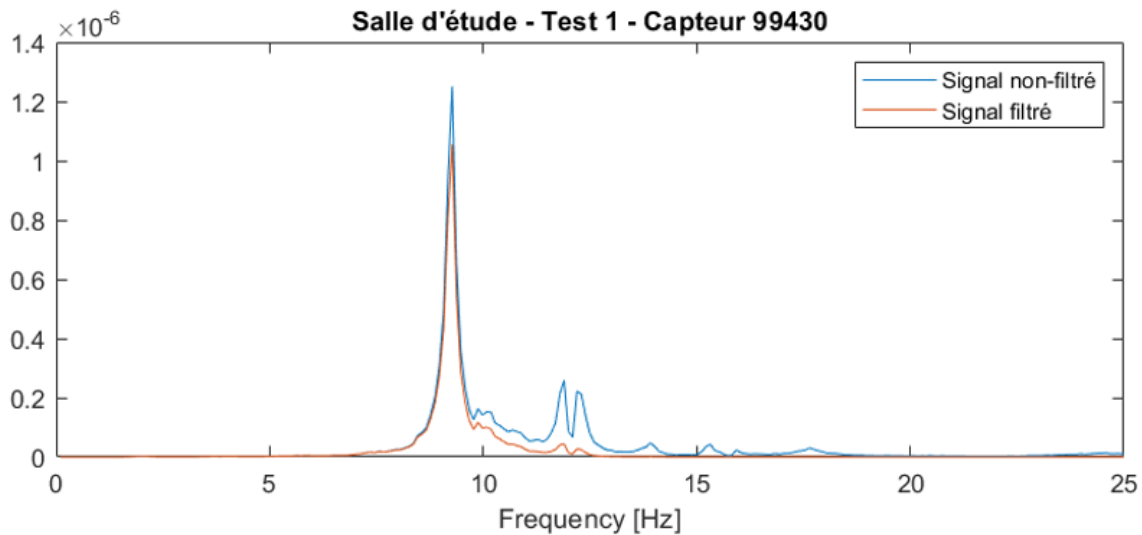


FIGURE 3.8 – Salle d'étude - Effet du filtre

La salle d'étude a été modélisée en considérant les paramètres repris dans le tableau 3.4. La forme des modes de vibrations considérés, la masses des piétons et l'occupation du plancher modélisé sont indiquées à la section 2.5.3.1.

L'épaisseur du plancher en béton a été estimée aux alentours de 25cm. Afin d'obtenir des résultats relativement fidèles aux données expérimentales, la vitesse des piétons varie d'un test à l'autre.

	$M_j^*$	$\xi_j$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$V_{min}$	$V_{max}$
Test 1	64000 kg	2%	9.3 Hz	11.8 Hz	12.2 Hz	1.1 m/s	2.2 m/s
Test 2						1.3 m/s	1.95 m/s
Test 3						1.25 m/s	1.8 m/s

TABLE 3.4 – Salle d'étude - Paramètres de modélisaion

La figure 3.9 superpose l'évolution de l'écart type obtenu numériquement avec celle obtenue expérimentalement. L'écart moyen est également indiqué. Il peut être directement constaté que le modèle représente assez bien l'évolution de cet indicateur. Pratiquement l'entièreté des données sont reprises dans l'intervalle défini par l'écart type. Cela signifie que les piétons ont relativement bien suivi la procédure.

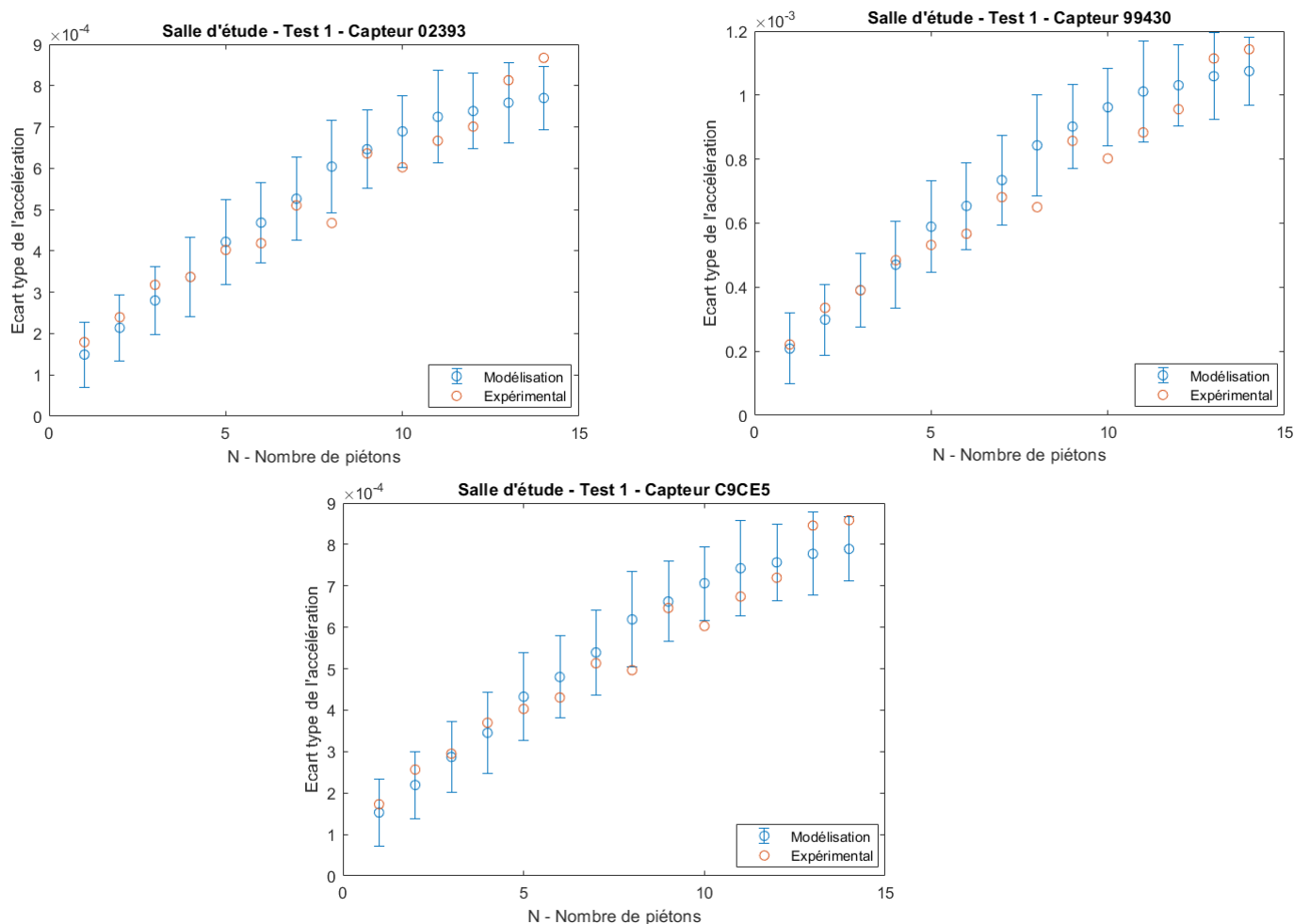


FIGURE 3.9 – Salle d'étude - Superposition des écarts types numériques et expérimentaux

En ce qui concerne l'indice de stationnarité, une tendance peut être identifiée au niveau des résultats numériques. Les données expérimentales sont relativement plus dispersées. Cependant, l'ordre de grandeur rencontré est relativement similaire dans les deux configurations. Les fluctuations observées sont probablement dues à des variations de vitesse lors des test expérimentaux. Pour rappel, le code considère que la vitesse d'un piéton donné est constante tout au long du test. Cela pourrait expliquer la grande variabilité observée dans les données expérimentales.

Au niveau du premier piéton, l'indice de stationnarité expérimental est relativement plus faible que celui prédit numériquement. Cela peut être potentiellement expliqué par des mouvements parasites dans les couloirs voisins de la salle d'étude ou même au sein du local lui même. La salle d'étude était partiellement utilisée par des étudiants, il se peut que certains soient à l'origine de vibrations malgré les précautions prises. De cette manière, le traitement des données effectué précédemment n'a pas eu d'impact sur ces effets comme ce dernier a été réalisé afin d'éliminer localement les données extrêmes.



Il est intéressant de signaler que les indices de stationnarité obtenus numériquement sont égaux pour les trois capteurs. Cela peut s'expliquer par le fait que dans la largeur du plancher, la forme du mode ne varie pas. En effet, il a été supposé que le mode de vibrations varie uniquement dans la longueur du plancher.

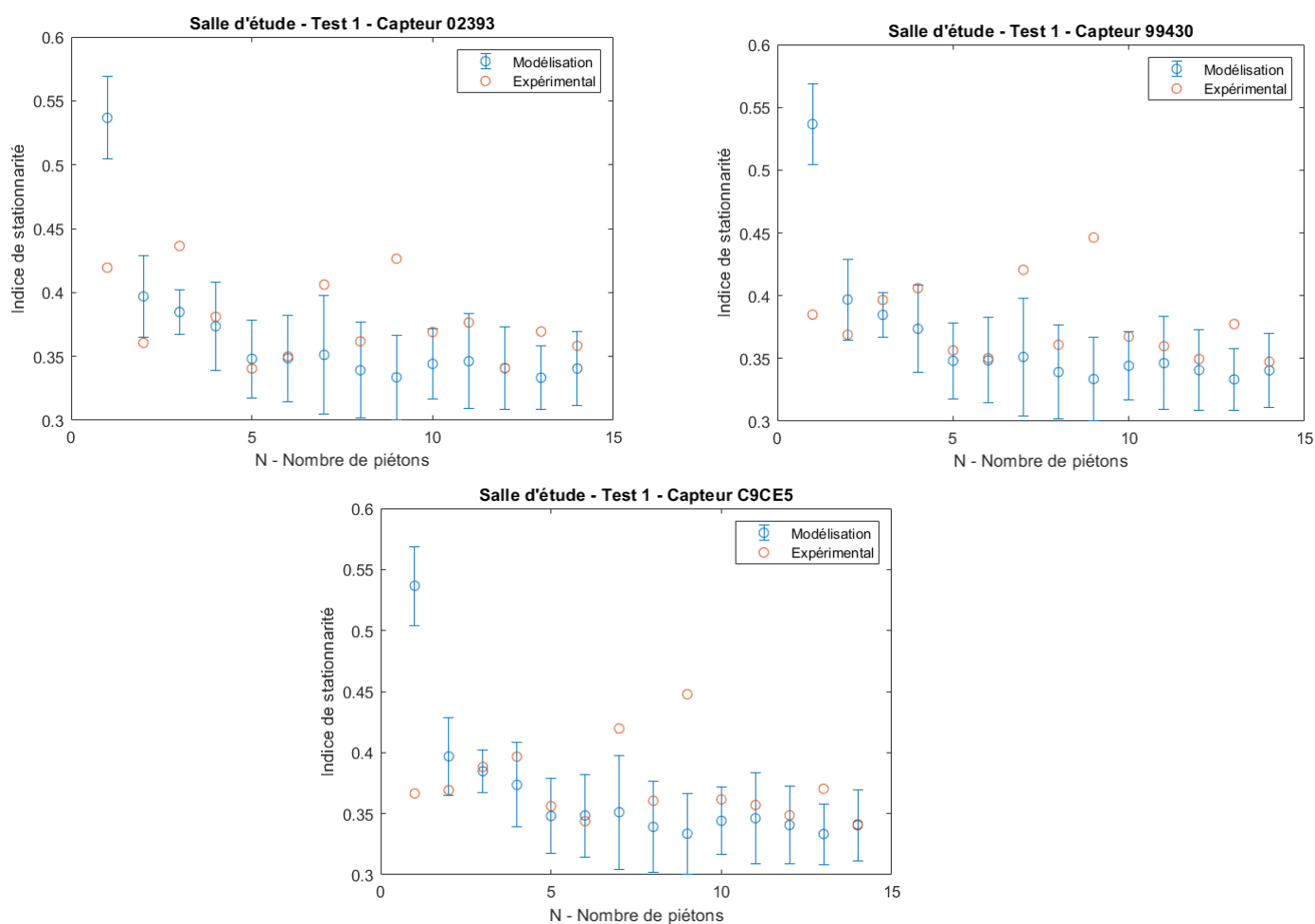


FIGURE 3.10 – Salle d'étude - Superposition de l'indice de stationnarité numérique et expérimental

Les résultats obtenus sont relativement satisfaisants. Ils ont été obtenus via des paramètres réalistes et coïncident avec les données expérimentales d'un test à l'autre mais aussi d'un capteur à l'autre. On retrouve uniquement un peu plus de variations au niveau de l'indice de stationnarité pour le second test mais l'ordre de grandeur reste principalement bon. Le modèle représentant la salle d'étude peut donc être validé.

### 3.3.4 Modélisation - Salle d'expression

La première fréquence propre étant de 11.7 Hz, lorsque le signal est filtré, l'effet des modes est grandement diminué. Le deuxième et troisième mode ne sont plus à considérer. Contrairement à la bibliothèque, même si la première fréquence propre du plancher est supérieure à 11.5 Hz, une excitation dans le mode apparaît. Cela est dû au fait que cette fréquence propre est assez proche de la gamme de fréquence filtrée.

Dans cette validation du code, il peut être intéressant d'illustrer ce qu'il se passe lorsque les trois modes sont considérés et le comparer avec la considération d'un seul mode.

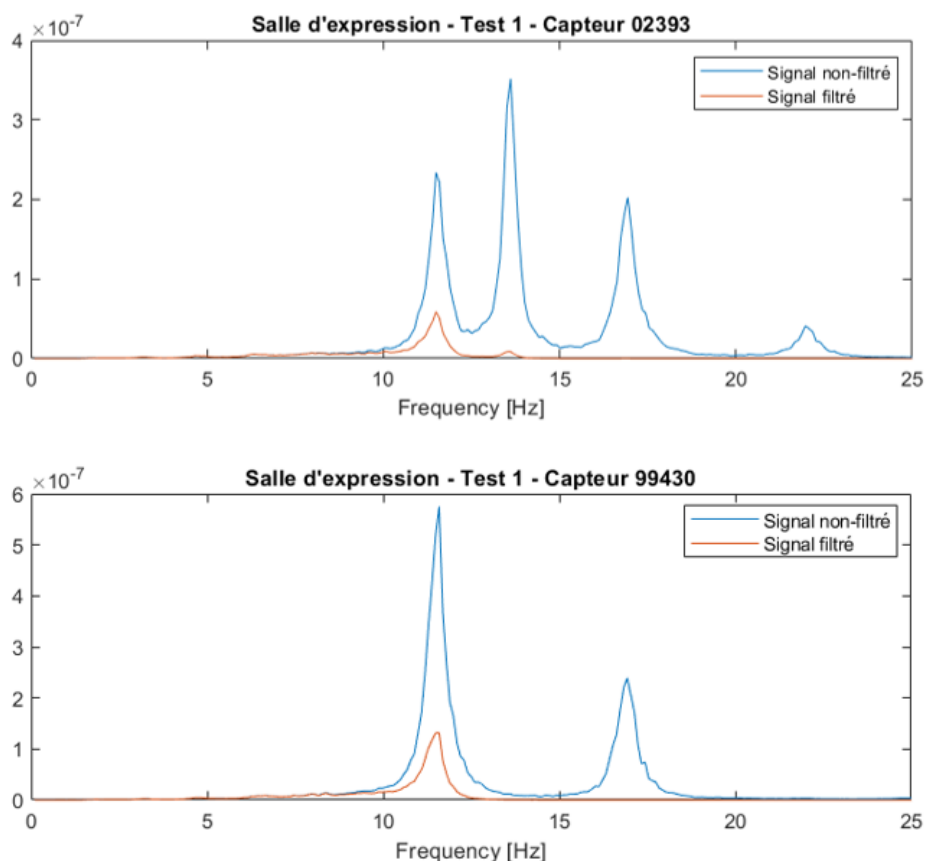


FIGURE 3.11 – Salle d'expression - Effet du filtre

La salle d'expression a été modélisée en considérant les paramètres repris dans le tableau 3.5. La forme des modes identifiés, la masse des piétons ainsi que l'occupation du plancher modélisé sont indiquées à la section 2.5.4.

Ce plancher a été plus difficile à modéliser car il possède un revêtement en caoutchouc permettant de diminuer les vibrations. Après un certain nombre d'essais, le coefficient d'amortissement dynamique a été considéré à 15%. L'épaisseur du plancher béton est supposée de 25cm. Cette épaisseur est schématique car elle est déterminée sur base de la surface du plancher et de la masse totale déterminée. Dans le poids total est retrouvé la contribution des poutres de structure. L'épaisseur est donc citée, afin de donner une information sur l'ordre de grandeur que représente la masse.

	$M_j^*$	$\xi_j$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$V_{min}$	$V_{max}$
Test 1	31000 kg	15%	11.7 Hz	13.6 Hz	16.9 Hz	1.1 m/s	2.2 m/s
Test 2						1.1 m/s	2.2 m/s
Test 3						1.1 m/s	2.2 m/s

TABLE 3.5 – Salle d’expression - Paramètres de modélisation

La figure 3.17 superpose l’écart type obtenu numériquement avec celle obtenue expérimentalement. L’écart moyen est également indiqué.

Les résultats ne sont pas vraiment impactés par le nombre de modes considérés. Comme il a pu être observé à la figure 3.11, l’amplitude au niveau du deuxième et troisième mode est très faible voire nulle. Cela a donc du sens.

Le signal expérimental est alors relativement bien approché jusqu’à atteindre un nombre de piétons égal à 10. Au-delà, on aperçoit un phénomène discuté à la section 2.5.4. Les piétons ont eu tendance à se regrouper et diminuer leur vitesse. En marchant ensemble, certains ont probablement commencé à marcher en opposition de phase. On peut observer qu’une fois qu’ils se sont dispersés, l’accélération a augmenté de manière significative jusqu’à atteindre des valeurs qui correspondent avec ce que le modèle a prédit.

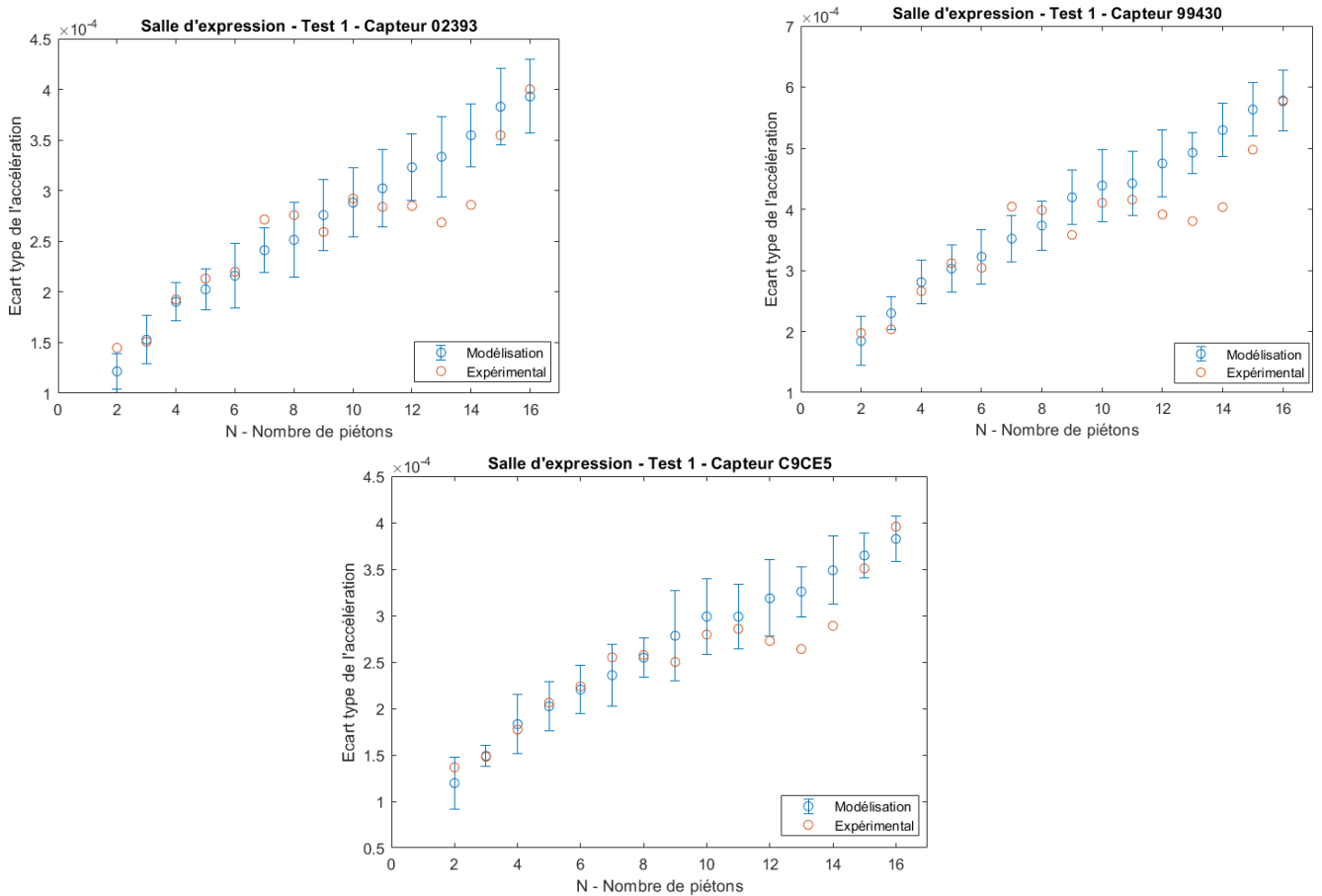


FIGURE 3.12 – Salle d’expression - Superposition des écarts types numériques et expérimentaux

C'est au niveau de l'indice de stationnarité que le modèle a eu du mal à être validé. Afin d'obtenir un ordre de grandeur qui se rapproche le plus possible des indicateurs expérimentaux, le coefficient d'amortissement a été augmenté. C'est pourquoi sa valeur est aussi grande. En augmentant ce dernier, il faut compenser par une diminution de la masse sans quoi l'évolution de l'écart type ne correspond plus.

Cela signifie que si le coefficient dynamique est réduit, la masse du plancher doit être augmentée. L'épaisseur du plancher étant déjà importante, il est plus sensé d'estimer que l'amortissement est très élevé. L'indice de stationnarité obtenu pour un amortissement faible et élevé est illustré à la figure 3.13.

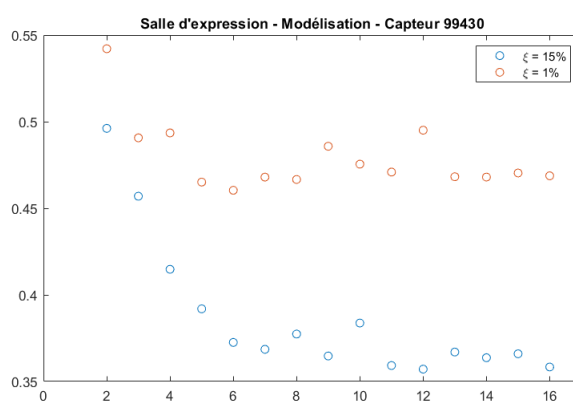


FIGURE 3.13 – Salle d'expression - Effet de  $\xi$

L'évolution de l'indice de stationnarité lorsque les trois modes de vibrations sont considérés est représentée à la figure 3.17. Il peut être observé que le capteur situé au centre du plancher correspond mieux aux données expérimentales que les deux autres. Il est important de rappeler que le capteur 99430 est situé au centre de la pièce et est donc principalement impacté par le premier mode de vibration. En considérant l'entièreté des modes, uniquement le capteur 02393 et C9CE5 en ont été impactés. Comme le signal expérimental est filtré, l'effet de ces modes a été retiré pratiquement entièrement. C'est pourquoi uniquement les modes visibles après filtration doivent être considérés.

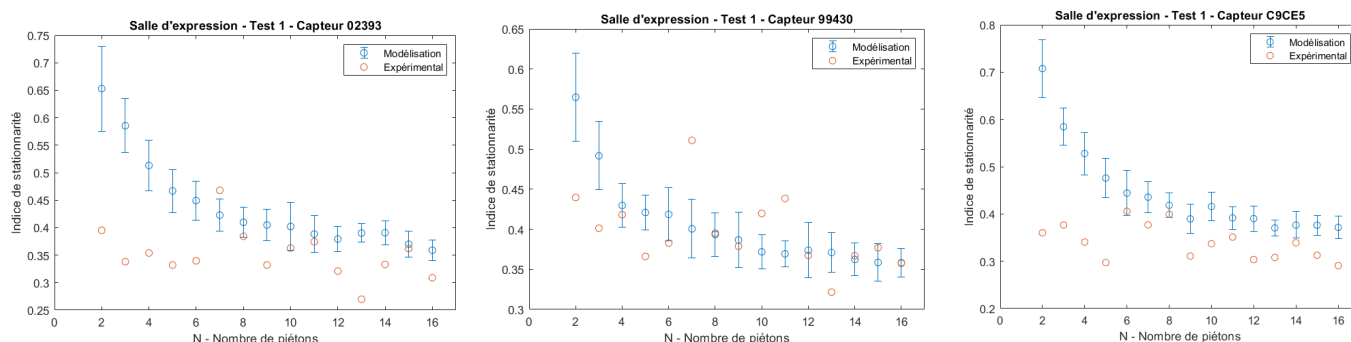


FIGURE 3.14 – Indice de stationnarité - 3 modes de vibrations considérés

La figure 3.15 montre ce qu'il se passe lorsqu'un seul mode de vibration est considéré. L'indice de stationnarité est de fait mieux approché.

Il est relativement intéressant de spécifier que lorsqu'un seul mode de vibration est considéré, l'indice de stationnarité est identique pour tous les capteurs. Cela signifie alors que la stationnarité ne dépend pas de la position lorsqu'un seul mode est considéré. Le fait de considérer plusieurs modes augmente la variabilité de l'amplitude du signal et modifie l'indice de stationnarité. Il dépend alors de l'emplacement d'où la prise de mesure est réalisée.

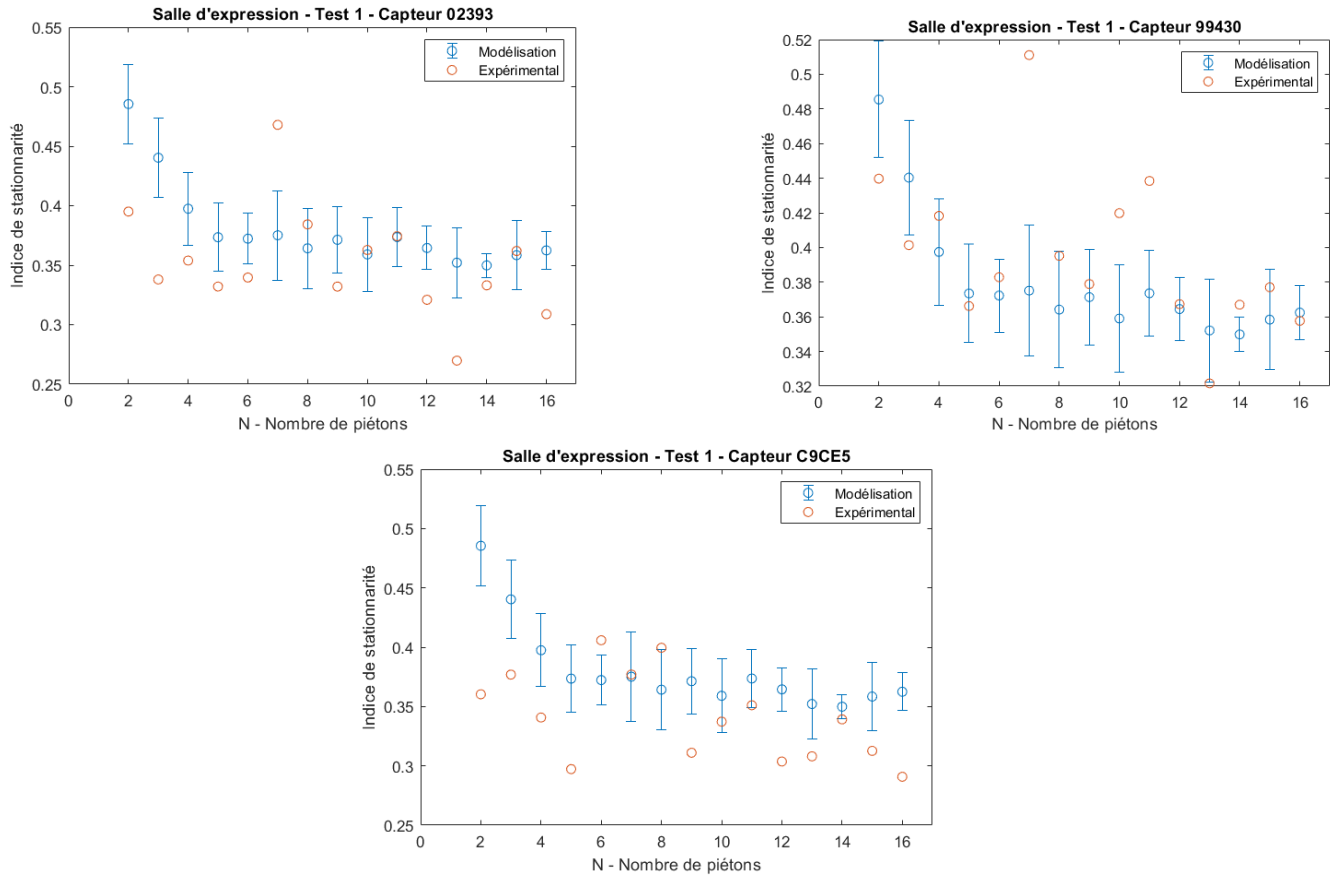


FIGURE 3.15 – Indice de stationnarité - 1 mode de vibration considéré

Ce modèle pourrait fournir un indice de stationnarité encore plus faible si l'amortissement était encore augmenté. Cependant, comme sa valeur est déjà élevée, la relation masse-amortissement est gardée comme telle. Afin de valider le modèle, uniquement le premier mode de vibration est donc considéré. Cela permet d'approcher l'écart type mais aussi l'indice de stationnarité d'une façon satisfaisante.

### 3.3.5 Modélisation - Salle de répétition

Les deux premières fréquences propres de ce plancher peuvent être clairement identifiées après filtration. Elles sont donc toutes les deux considérées dans la modélisation. L'amplitude du premier pic est relativement conservée. Cela peut être expliqué par le fait que la première fréquence propre est plus faible et donc l'accélération du plancher associée ne dépend pas d'un contenu fréquentiel élevé.

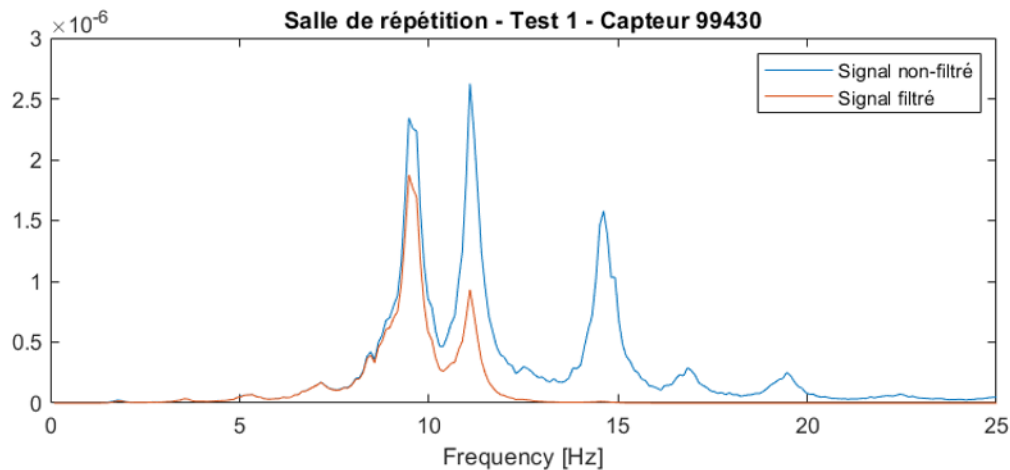


FIGURE 3.16 – Salle de répétition - Effet du filtre

La salle de répétition a été modélisée en considérant les paramètres repris dans le tableau 3.6. Les formes des modes de vibrations identifiées, la masse des piétons et l'occupation du plancher modélisé sont indiquées à la section 2.5.5.1.

Ce plancher est constitué de panneaux en bois lamellé collé. Le poids d'une telle structure est normalement faible. Ce plancher provient d'une extension construite au dessus d'un bâtiment existant, la structure portante est compliquée à déterminer. La masse prise en compte dans la modélisation semble relativement élevée pour du bois. L'amortissement quant à lui est plus élevé que dans une structure en béton. Comme la présence d'un revêtement spécifique n'a pas été identifiée, l'amortissement n'a pas trop été augmenté. Le couple masse-amortissement a donc été gardé comme tel.

	$M_j^*$	$\xi_j$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$V_{min}$	$V_{max}$
Test 1	32500 kg	5%	9.8 Hz	11.2 Hz	14.7 Hz	1.1 m/s	2.1 m/s
Test 2						1.3 m/s	2.2 m/s
Test 3						1.3 à 1.5 m/s	1.9 à 2.1 m/s

TABLE 3.6 – Salle d'expression - Paramètres de modélisation

L'évolution de l'amplitude moyenne du signal est relativement bien approchée par le modèle. Les données expérimentales fluctuent un petit peu. Cela est expliqué à nouveau par les variations de vitesse des différents piétons mais aussi par l'augmentation du nombre de personnes. Plus le nombre de piétons augmentent et plus la variabilité des résultats est susceptible d'augmenter.

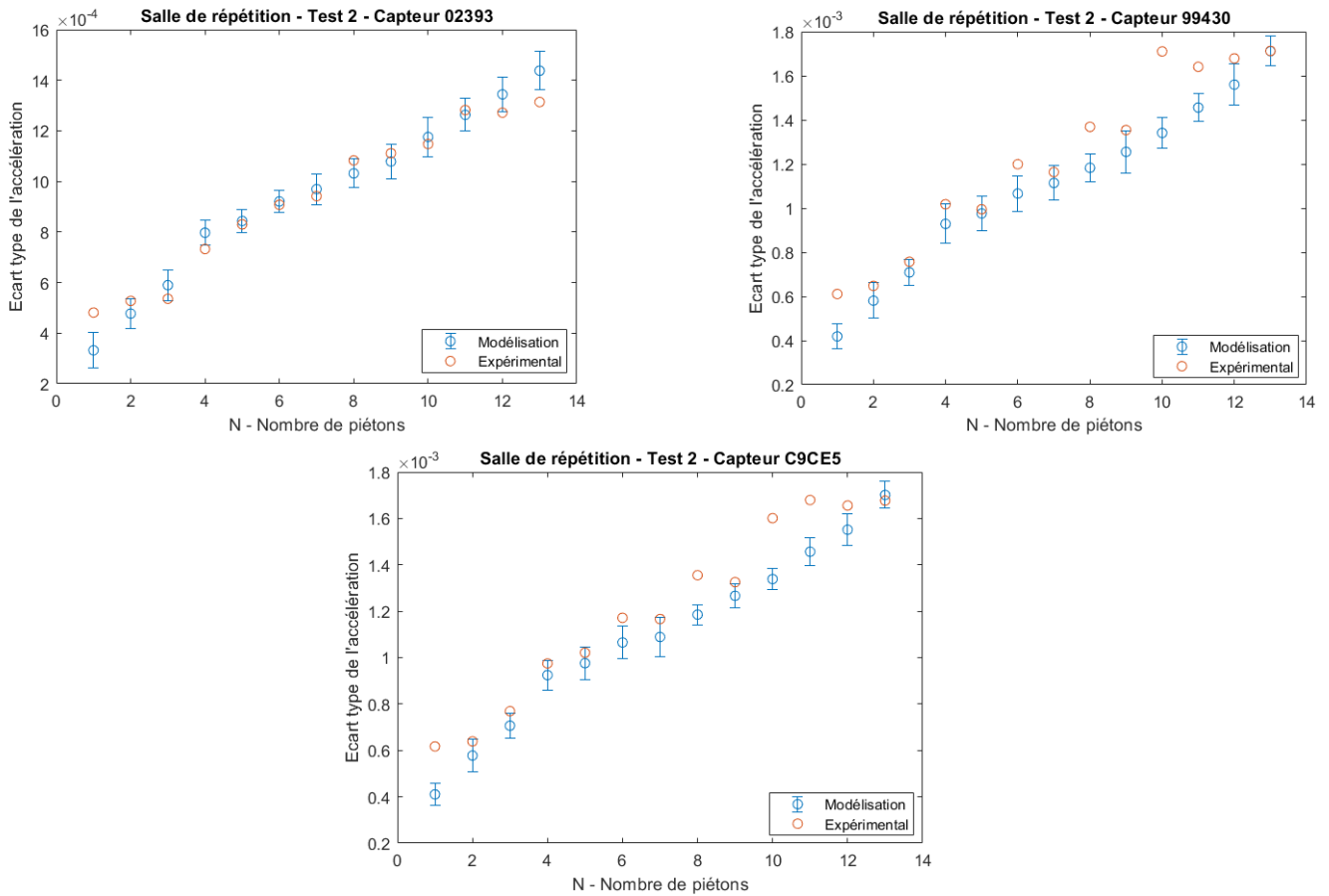


FIGURE 3.17 – Salle de répétition - Superposition des écarts types numériques et expérimentaux

Il a pu être observé que l'évolution de l'amplitude du signal lors du troisième test est relativement plus importante que les deux autres. Cela étant, avec un nombre de piétons moins important que le premier test. La justification trouvée réside dans la distribution des vitesses de marche. Il semblerait qu'on puisse identifier deux groupes d'individus marchant à des vitesses moyennes différentes. Un premier groupe a marché à une vitesse telle que la fréquence du pas a excité principalement le premier mode et le second groupe le second mode.

N'ayant pas d'informations précises sur la vitesse réelle des piétons, des hypothèses ont donc été prises en conséquence. Cela a causé quelques discontinuités dans l'évolution de l'indice de stationnarité. Cet effet peut être observé à la figure 3.18. Si on voulait représenter deux groupes marchant à des vitesses moyennes différentes, il faudrait probablement faire en sorte que la vitesse d'un même piéton varie au cours du temps. Cela pourrait lisser les résultats. Cette hypothèse ne sera pas vérifiée car par la suite uniquement un seul groupe de piéton est considéré.

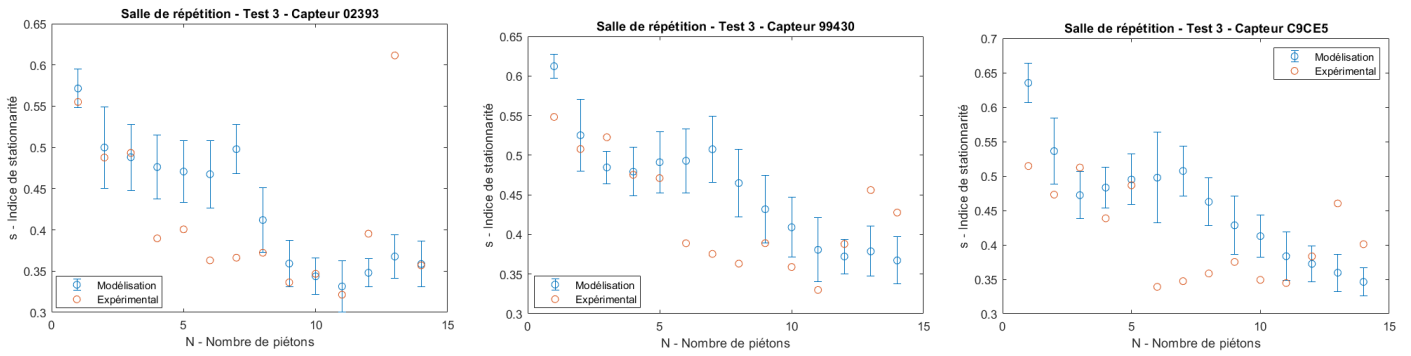


FIGURE 3.18 – Salle de répétition - Test 3 - Discontinuité observée dans l'indice de stationnarité

L'indice de stationnarité est approché d'une manière assez satisfaisante pour les deux premiers tests. Cela permet de supposer que la discontinuité observée dans le troisième test est bien due à la programmation des deux groupes. Ainsi, ce modèle est également validé lorsque les deux premiers modes de vibrations sont considérés.

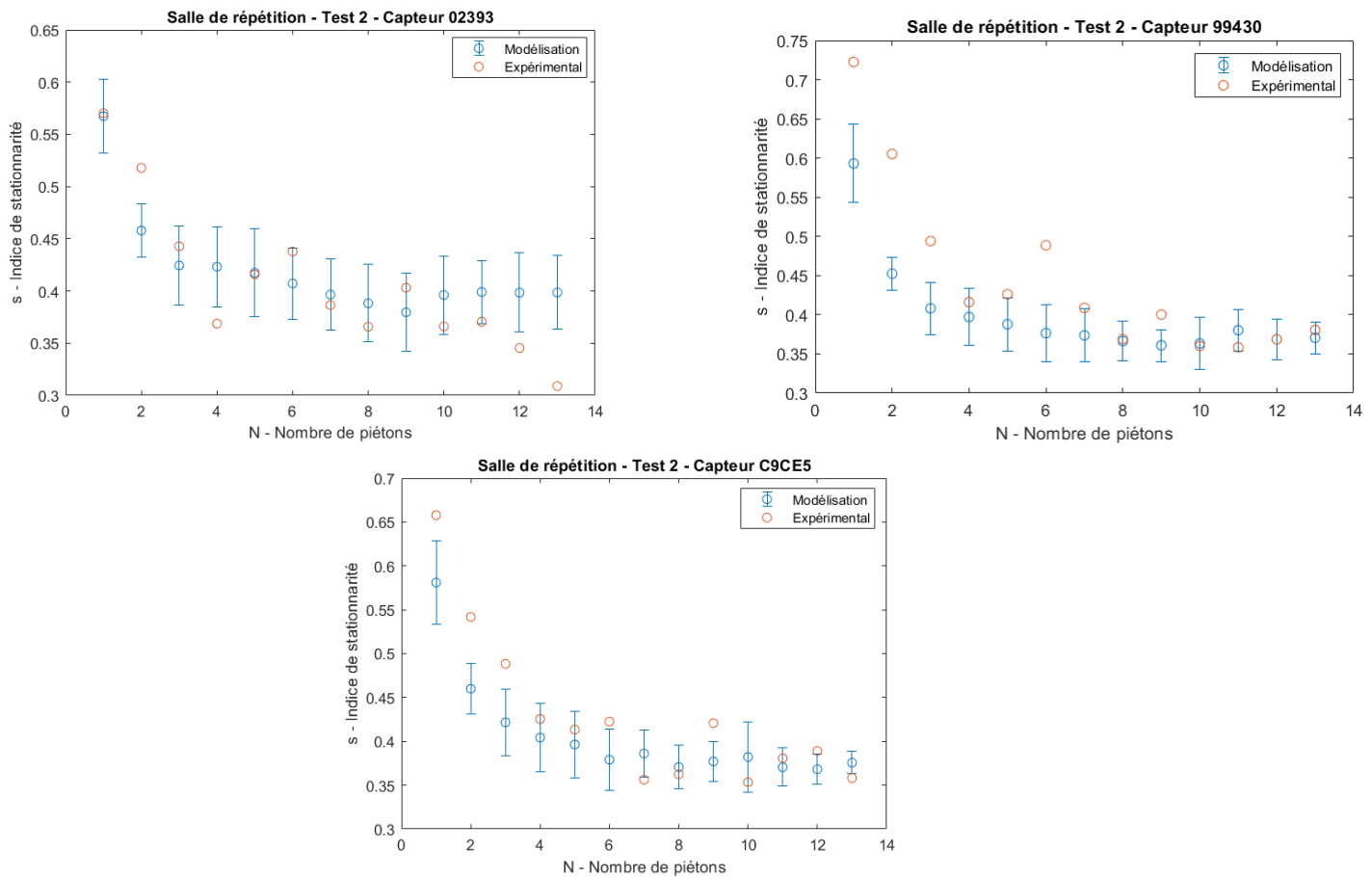


FIGURE 3.19 – Salle de répétition - Superposition de l'indice de stationnarité numérique et expérimental



---

## 3.4 Discussion de la stationnarité

Cette discussion a pour but d'essayer d'identifier les différents paramètres ayant une influence sur la stationnarité. Comme il a pu être remarqué, l'indice de stationnarité ne dépend pas de la position lorsqu'un seul mode est considéré. De ce fait, afin d'analyser l'impact des paramètres, seul le premier mode est utilisé dans les modélisations qui suivent. Cela permet de simplifier le phénomène. La forme du mode considéré est donc un demi-sinus dans les deux directions du plancher.

La vitesse et le poids des piétons sont déterminés autour de valeurs moyennes et varient pour chaque piéton. Celles-ci sont définies dans la section 1.4. Le nombre d'itérations du code est de l'ordre de 30 répétitions. Les données qui sont illustrées dans la suite de la section sont donc les moyennes de ces itérations. Il est important de notifier que lorsque l'influence d'un paramètre est évaluée, tous les autres paramètres sont constants. Notons également que les paramètres peuvent être considérés à des valeurs non réalistes afin de mieux visualiser les effets.

Dans un premier temps, il est intéressant de superposer l'indice de stationnarité numérique obtenu dans les trois configurations de plancher différentes. De cette façon, les prédictions du modèle peuvent être comparées. La figure 3.20 illustre donc l'évolution de l'indice de stationnarité au niveau des trois modèles pour un nombre de 50 piétons.

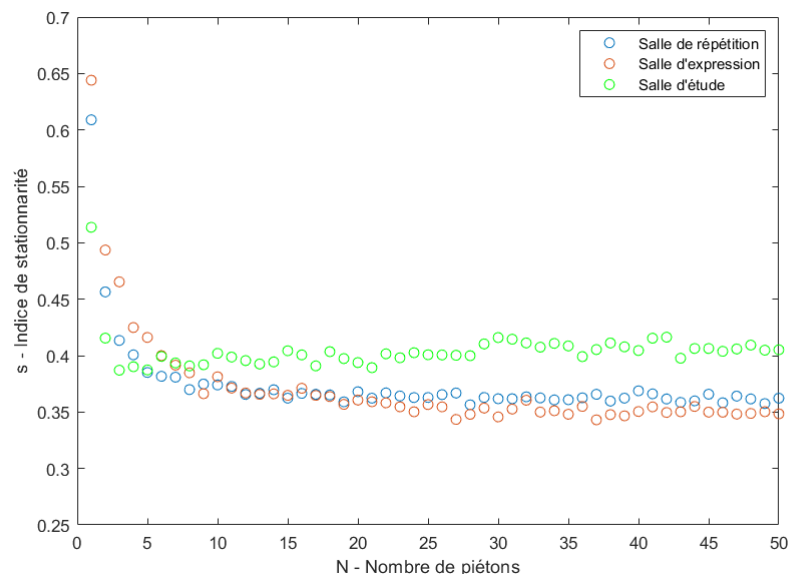


FIGURE 3.20 – Évolution de  $s$  selon les différentes configurations

Il peut être constaté que le comportement de l'indice selon les configurations n'est pas exactement identique. Il converge vers différentes valeurs selon le plancher. De plus, l'indice semble se stabiliser plus rapidement dans le cas de la salle d'étude. La salle d'étude atteindrait un état stationnaire vers 6 piétons, la salle de répétition vers 8 piétons et la salle d'expression vers 10 piétons.

Comme la stationnarité apparaît bien avant 50 personnes dans ces configurations, la suite des modélisations sont exécutées pour un nombre de piétons allant donc jusqu'à 30. Afin de déterminer d'où proviennent les différences observées, l'influence des paramètres listés à la page suivante est alors évaluée.

1. La durée des périodes de marche divisant le test
2. La fréquence propre du plancher
3. Le coefficient d'amortissement dynamique
4. La masse du plancher
5. La taille du plancher

Premièrement, la durée de la période de marche varie de 240s à 2s. Les résultats sont affichés à la figure 3.21. Dans ce graphique,  $t_p$  représente la durée de la période de marche. L'évolution de l'indice de stationnarité est relativement identique pour une période comprise entre 240s et 30s. En dessous de 30s, l'indice diminue de plus en plus. Une grande variabilité est également observée lorsque la période devient très faible. Cela peut être expliqué par le fait que la durée de la période se rapproche de plus en plus de la taille de fenêtre définie à la section 2.4.4. L'indice est alors plus sensible aux variations car il est calculé sur beaucoup moins de données.

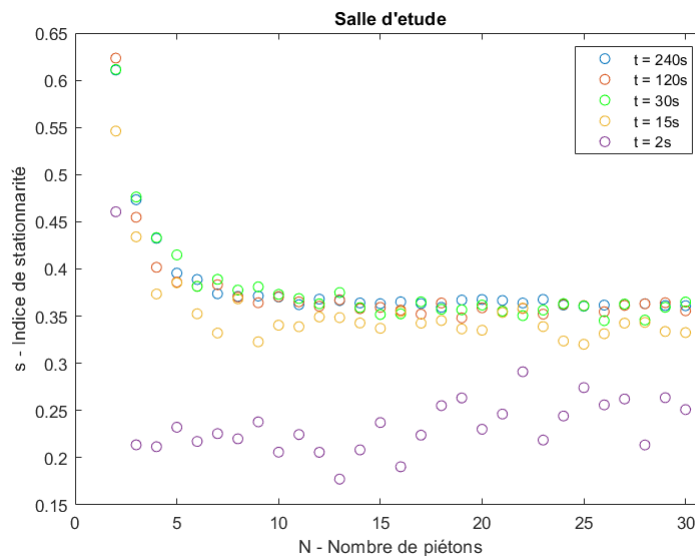


FIGURE 3.21 – Effet de la période de marche

Dans le modèle numérique, les hypothèses sont telles que le plancher est supposé parfait. De plus, l'accélération totale est obtenue par l'addition des effets de chaque piéton, aucune interaction n'est considérée. Cela explique pourquoi aucune phase transitoire ne peut être observée dans ce modèle numérique, contrairement à ce qui peut être attendu expérimentalement.

Les paramètres discutés dans la suite de cette section sont déterminés sur base de périodes de 30s au vu des résultats présentés. Cela permet au code de tourner plus rapidement pour les différentes configurations modélisées sans pour autant perdre en précision.

Ensuite, on fait varier la fréquence propre dans les trois configurations entre 6 Hz et 11 Hz. La figure 3.22 illustre les résultats pour le modèle représentant la salle de répétition. Il peut être constaté que l'indice de stationnarité est le plus faible pour une fréquence propre s'approchant de 8Hz. De plus, la valeur vers laquelle il converge augmente lorsque la fréquence propre s'éloigne de cette dernière. Cependant, la convergence vers un état stationnaire semblerait plus rapide lorsque la fréquence s'en éloigne.

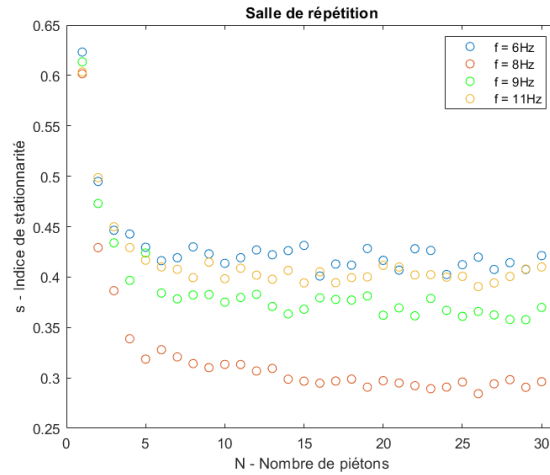


FIGURE 3.22 – Effet de la fréquence propre

Ces observations peuvent également être faites dans les deux autres configurations. Les graphiques correspondant se retrouvent à la section A.6. De manière générale, deux phénomènes sont donc observés :

- Pour une vitesse de piétons donnée, la fréquence amenant à un indice de stationnarité plus faible est aux alentours de 8 Hz. Cela signifie que la variabilité de l'accélération est plus faible lorsque la fréquence propre s'approche de cette valeur sinon la variabilité augmente.
- Lorsque la fréquence propre s'éloigne de 8 Hz, la convergence vers un état stationnaire est plus rapide. L'indice se stabilise donc pour un nombre de piétons plus faible.

En se basant sur les observations faites lors de la validation du code, le coefficient d'amortissement joue un rôle sur l'indice de stationnarité. Son effet est illustré à la figure 3.23.

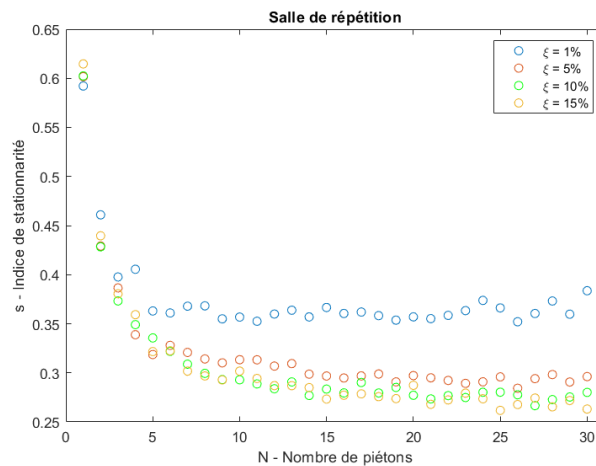


FIGURE 3.23 – Effet de l'amortissement dynamique

L'amortissement joue un rôle principalement sur la valeur à laquelle converge l'indice. Plus il est faible et plus l'indice augmente. De plus, une certaine instabilité est observée lorsque l'amortissement est très petit.

Comme discuté également dans les sections précédentes, l'effet de la masse du plancher sur la stationnarité n'a pas vraiment été identifiée. La figure 3.24 permet de le vérifier : malgré une masse variable, l'indice reste identique.

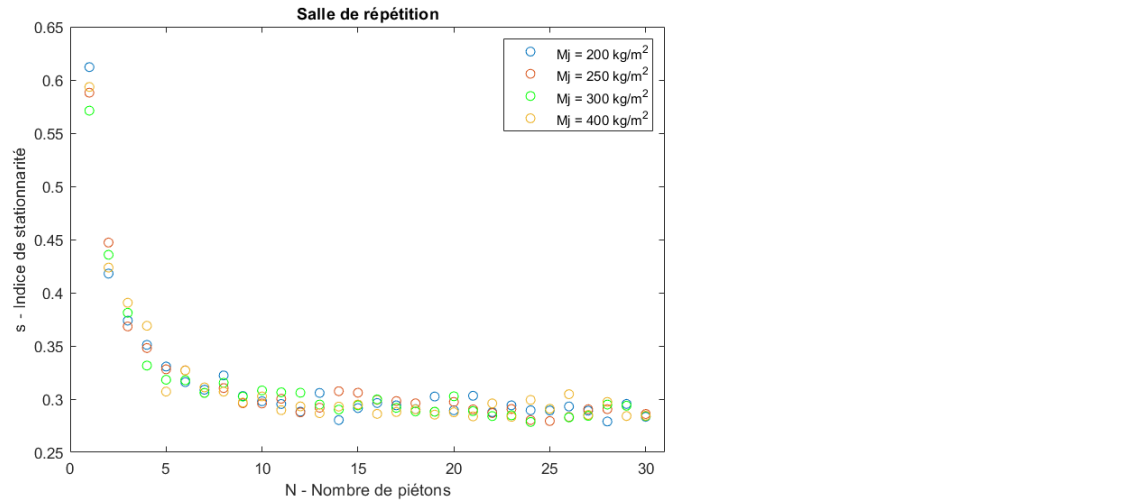


FIGURE 3.24 – Effet de la masse modale

Ensuite, il est intéressant de s’interroger sur l’effet de la taille du plancher. Deux analyses sont réalisées, une sur l’effet d’une diminution de taille et l’autre sur une augmentation. La figure 3.25 montre l’effet d’une augmentation et la figure 3.26 celle d’une diminution.

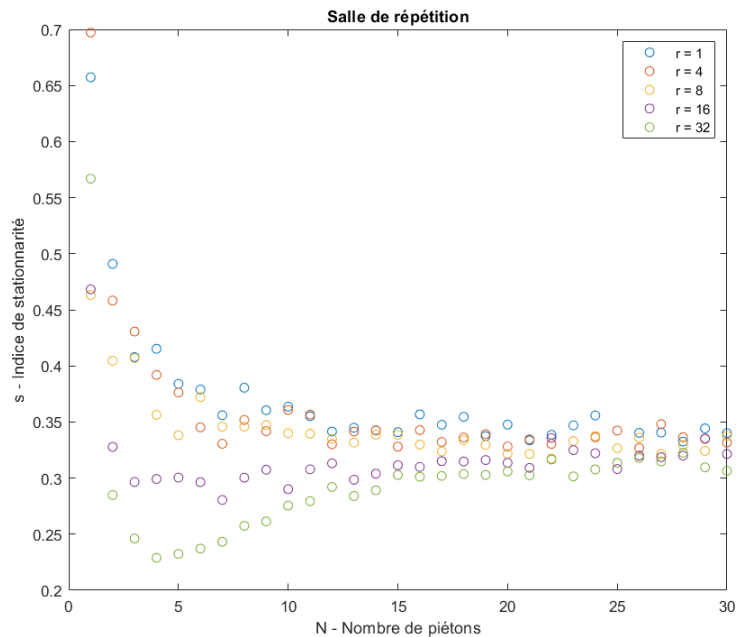


FIGURE 3.25 – Effet de l’augmentation des dimensions

Lorsque la taille du plancher augmente, un phénomène assez spécifique peut être observé. L’évolution de l’indice de stationnarité est défini par deux phases : une diminution importante lors des premiers piétons et une remontée de l’indice jusqu’à se stabiliser. Il peut également être notifié que l’indice remonte à la même valeur vers laquelle converge l’indice pour une taille de plancher plus petite.

Cela peut être expliqué par l’évolution de la répartition des piétons sur la structure. Comme les piétons démarrent tous du même point de départ et sur un bord du domaine, si le plancher est assez grand et que la période de marche n’est pas trop importante, les premiers piétons sont localisés principalement sur les bords du domaine. L’accélération engendrée est donc faible comme l’amplitude du mode est maximale au centre du plancher. Cela signifie qu’au début du test, les piétons sont situés

dans une zone de telle sorte à ce que l'accélération ne varie pas beaucoup et s'uniformise. L'indice de stationnarité diminue donc en conséquence. Cependant, une fois que l'un des piétons se rapproche du centre du plancher, l'accélération augmente de manière importante. L'indice se met alors à remonter car cette augmentation d'accélération n'est due qu'à certains piétons. Cela signifie que l'homogénéité du signal est réduite. L'indice se stabilise ensuite lorsque les piétons se sont répartis de manière plus uniforme sur la structure.

Ces observations permettent de conclure que plus la taille du plancher augmente et plus le nombre de piétons est important pour atteindre un état stationnaire. Cependant, si la période de marche est allongée, les piétons sont mieux répartis sur la structure d'une période à l'autre ce qui stabiliserait plus rapidement l'indice. A l'inverse, si la période est encore diminuée, un plancher plus petit nécessiterait plus de piétons pour atteindre un état stationnaire. Cela ne peut pas être illustré avec ce modèle numérique car une trop grande diminution de la période pose problème comme discuté au début de la section. Dans ce cas-ci, le nombre de piétons nécessaires pourrait augmenter jusqu'à 20 pour atteindre un état stationnaire.

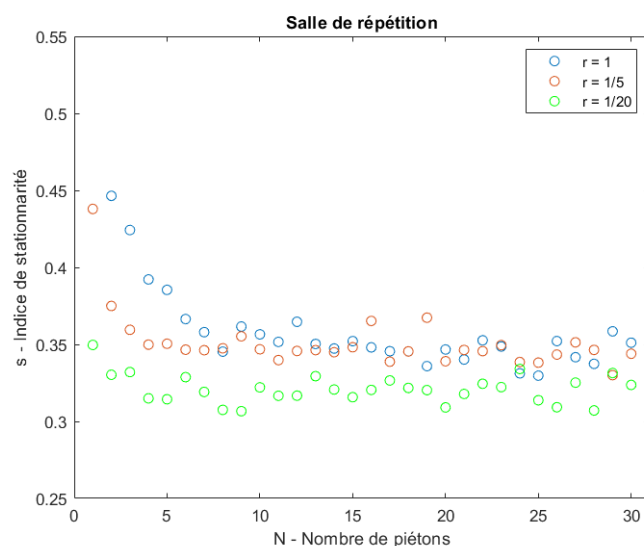


FIGURE 3.26 – Effet d'une diminution des dimensions

La figure 3.26 confirme les propos du paragraphe précédent, une diminution de la taille du plancher tend à diminuer le nombre de piétons nécessaire pour atteindre un état stationnaire.

Il est important de notifier qu'en multipliant ou divisant les dimensions du plancher jusqu'à un facteur 4, l'indice de stationnarité suit la même distribution (tenant compte d'une période de marche de 30s). Dans ce cas de figure, un plancher long de près de 80m a le même comportement que le plancher initial. Cela est justifié par le fait qu'un piéton marchant à la vitesse moyenne de 1.65 m/s a le temps sur cette période d'atteindre le centre du mode.

De ces observations découle l'effet d'un autre paramètre : l'occupation du plancher par les piétons. Dans les trois configurations, l'espace n'a pas été occupé dans les mêmes proportions. La surface utilisée par les piétons est de 54% pour la salle d'étude, 81% pour la salle de répétition et 92% pour la salle d'expression. De manière assez logique, plus l'espace est occupé et plus la variabilité des résultats est importante. De plus, la localisation de la zone de marche par rapport à la forme du mode a son importance. Les trois configurations sont comparées sur base de leur occupation à la figure 3.27,  $\beta$  représente la proportion de la surface totale occupée. La fréquence propre ainsi que l'amortissement sont considérés communs.

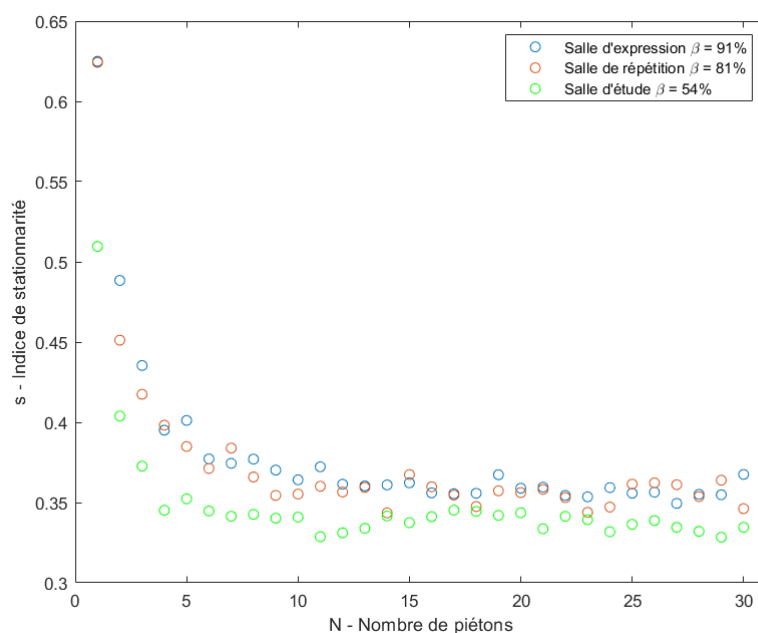


FIGURE 3.27 – Effet de la proportion  $\beta$

Dans la réalité, un plancher possède plusieurs fréquences propres. Les observations suivantes sont probablement applicables dans une certaine mesure à d'autres formes de modes. Cependant, l'interaction entre les modes au niveau de l'indice de stationnarité mériterait une étude approfondie. Les observations faites laissent penser que la superposition des accélérations de deux modes va mener à une plus grande variabilité et donc une augmentation de l'indice.

---

## 3.5 Conclusion

Tout d'abord, le code réalisé peut être validé en raison des approximations satisfaisantes du comportement des planchers de la salle d'étude, d'expression et de répétition. Les hypothèses faites sur la forme des modes à la section 2.5 ont donc été vérifiées. Ces trois structures sont caractérisées par des modes de vibrations relativement semblables. De ce fait, la validation du code ne peut pas être étendue aux planchers se comportant comme une poutre sur plusieurs appuis.

Les résultats expérimentaux ont dû être filtrés sur une certaine gamme de fréquences afin d'approcher l'évolution de l'écart type mais aussi l'indice de stationnarité. De plus, il a été important de comprendre ce qu'impliquait cette manipulation au niveau des modes. Pour ce faire, il a fallu analyser le contenu fréquentiel filtré. Les modes à considérer lors de la modélisation ont donc pu être identifiés. Plus le nombre de modes considérés est grand et plus la variabilité au sein du signal est grande. Cela implique donc une augmentation de l'indice de stationnarité.

Les différents paramètres de modélisation ont été discutés afin d'en comprendre leur influence. En se basant sur un seul mode de vibrations, les facteurs ayant un réel impact sur la stationnarité sont les suivants :

- La vitesse des piétons
- Le coefficient d'amortissement
- La fréquence propre du mode
- Les dimensions de la structure
- La période de marche

La masse modale ainsi que l'amortissement ont une influence directe sur l'amplitude d'un signal. Cependant, seul l'amortissement joue un rôle au niveau de l'indicateur de stationnarité. C'est pourquoi, un bon compromis doit être trouvé entre ces deux facteurs lors de la représentation numérique.

Deux effets principaux des paramètres ont été identifiés sur l'évolution de l'indice de stationnarité :

- Variation du nombre de piétons nécessaires pour atteindre un état stationnaire (fréquence propre, dimension, occupation du plancher et période de marche)
- Variation de la valeur vers laquelle l'indice se stabilise (coefficient d'amortissement, fréquence propre, occupation du plancher).

Certaines limitations du code sont apparues lors des différentes manipulations. Celui-ci est en effet basé sur des hypothèses relativement simplificatrices. Les limitations principales de cette représentation numérique sont les suivantes.

- Nécessite un grand nombre de paramètres d'entrées
- Ne prend pas en compte des effets d'interaction
- Résultat parfois trop théorique et idéalisé
- Nécessite de considérer le signal uniquement sur une gamme de fréquence définie par les différentes harmoniques de la marche
- Difficulté voire incapacité à représenter des structures dont la fréquence propre est au-dessus de 11.5 Hz.

Pour terminer, il est important de mettre en avant une des observations faites au point 3.4. Il a été constaté qu'une augmentation des dimensions du plancher n'influence pas obligatoirement l'évolution de l'indice de stationnarité. En réalité, tant que sur une période de marche un piéton peut atteindre le centre du plancher, il ne variera pas.

# Chapitre 4

## Conclusion générale et perspectives

Ce travail s'est présenté sous la forme de deux grandes parties : une partie expérimentale et une partie modélisation.

La première partie consistait en la réalisation de différentes prises de mesures et l'analyse des résultats obtenus. Les premiers tests qui ont été effectués servaient à récolter des données sur les propriétés, dont les fréquences propres de configurations différentes. Ces premiers résultats ont permis de sélectionner un certain nombre de structures afin de réaliser une prise de mesure plus spécifique. L'objectif de ces tests principaux a été d'obtenir des données expérimentales sur lesquelles étudier la stationnarité. Les tests effectués ont été analysés de façon à pouvoir les modéliser dans la seconde partie.

Les données expérimentales ont mis en évidence une certaine tendance de l'indice de stationnarité à décroître avec une augmentation du nombre de piétons. Cependant, elles ont probablement été impactées par une série de vibrations non contrôlées. De plus, un certain nombre d'incertitudes apparaissent au niveau des caractéristiques des planchers. Il serait donc intéressant de réaliser de nouvelles prises de mesures sur une structure mieux contrôlée, en laboratoire par exemple. Cela permettrait de comparer les données et de comprendre les différences s'il y en a.

Sur l'ensemble des tests réalisés, un seul des comportements vibratoires n'a pu être identifié. Il aurait fallu réaliser plus de mesures sur site afin de repérer notamment la présence de poutres beaucoup plus raides que le reste de la structure. Deux comportements ont été identifiés :

- Le plancher se comporte comme une poutre sur plusieurs appuis lorsque des poutres le constituant sont d'une grande raideur. La forme et l'amplitude des modes dépendent du nombre d'appuis et de la longueur des travées.
- La forme des modes s'étend dans les deux directions principales de la structure. Le plancher est donc assimilé à une dalle appuyée sur ses 4 côtés.

La seconde partie s'est basée principalement sur la réalisation d'un code permettant d'approcher numériquement les vibrations d'un plancher. Ce dernier a été validé par comparaison avec les données expérimentales. Ces comparaisons se sont basées sur deux indicateurs : l'écart type et l'indice de stationnarité. Pour y arriver, des hypothèses ont été posées et les données expérimentales filtrées. Cependant, un certain nombre de limitations sont apparues. Afin d'améliorer l'utilité et les capacités du code, il pourrait être intéressant de s'interroger sur les valeurs que prennent les harmoniques au-delà de la cinquième. Dans le cas contraire, le code ne représente qu'une gamme de fréquence limitée à 11.5 Hz. Comme il a pu être constaté, beaucoup de planchers ont leur première fréquence propre au-delà de cette fréquence.



---

De plus, un seul des comportements cités précédemment a pu être validé par le modèle. Il aurait été satisfaisant de pouvoir s'assurer que le code couvre également le comportement d'une poutre sur plusieurs appuis. Cela impliquerait alors de réaliser de nouveaux tests plus précis.

Au niveau de la stationnarité, les différents paramètres ayant un rôle majeur ont pu être identifiés. Les relations entre ces facteurs sont relativement complexes. Des démarches ont été entreprises afin de lier ces paramètres via notamment l'obtention d'un nombre adimensionnel. Cependant celles-ci n'ont pas abouti. Une étude plus approfondie sur ce sujet pourrait mener à des résultats très intéressants.

L'indice de stationnarité peut varier de deux façons principales, soit par la valeur vers laquelle il tend, soit en fonction du nombre de piétons nécessaires pour atteindre un état stationnaire. Sur base de ce qu'il a été observé, en considérant une vitesse des piétons moyenne de 1.65 m/s, l'indice de stationnarité est plus faible pour une fréquence propre de 8 Hz. Cela signifie que la variabilité d'un tel signal est donc moins importante. Cependant, le nombre de piétons nécessaires pour atteindre la stationnarité diminue en s'éloignant de cette fréquence, et est donc le plus important à 8 Hz.

En début de projet, le questionnement qui a été énoncé introduisait la recherche de configurations menant à un état stationnaire. De part les analyses et observations faites, il n'est pas encore possible de formuler une réponse générale à cette question. Cependant, certains éléments de réponses peuvent être fournis. La variation de la taille d'un plancher n'influence pas forcément l'évolution de l'indice de stationnarité. Cela implique que le comportement d'un plancher de taille normale peut être étendu à un plancher de grande taille si les piétons sont répartis uniformément sur l'ensemble du plancher. Il peut être considéré que la répartition des piétons est équivalente pour des planchers de taille différentes lorsque une période (intervalle de temps entre deux piétons) permet à un piéton d'arriver jusqu'au centre de la structure.

De manière sécuritaire, la fréquence propre du plancher est considérée à 8 Hz. Pour un plancher de taille moyenne (10m x 10m), la figure 4.1 montre l'évolution de l'indice de stationnarité. Il peut être constaté qu'à partir de 15 personnes, le plancher atteint un état stationnaire. Cela signifie que pour tout plancher de dimensions similaires, la stationnarité est atteinte au plus tard à 15 piétons, peu importe la fréquence propre du plancher.

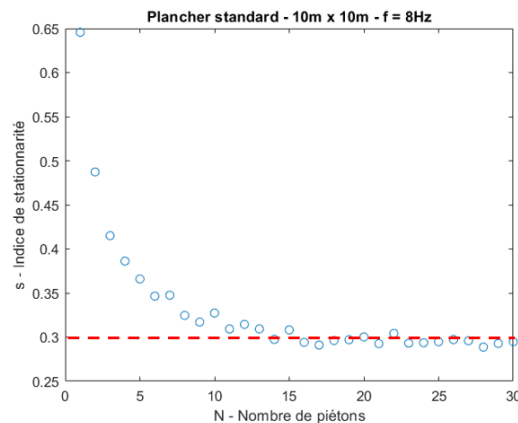


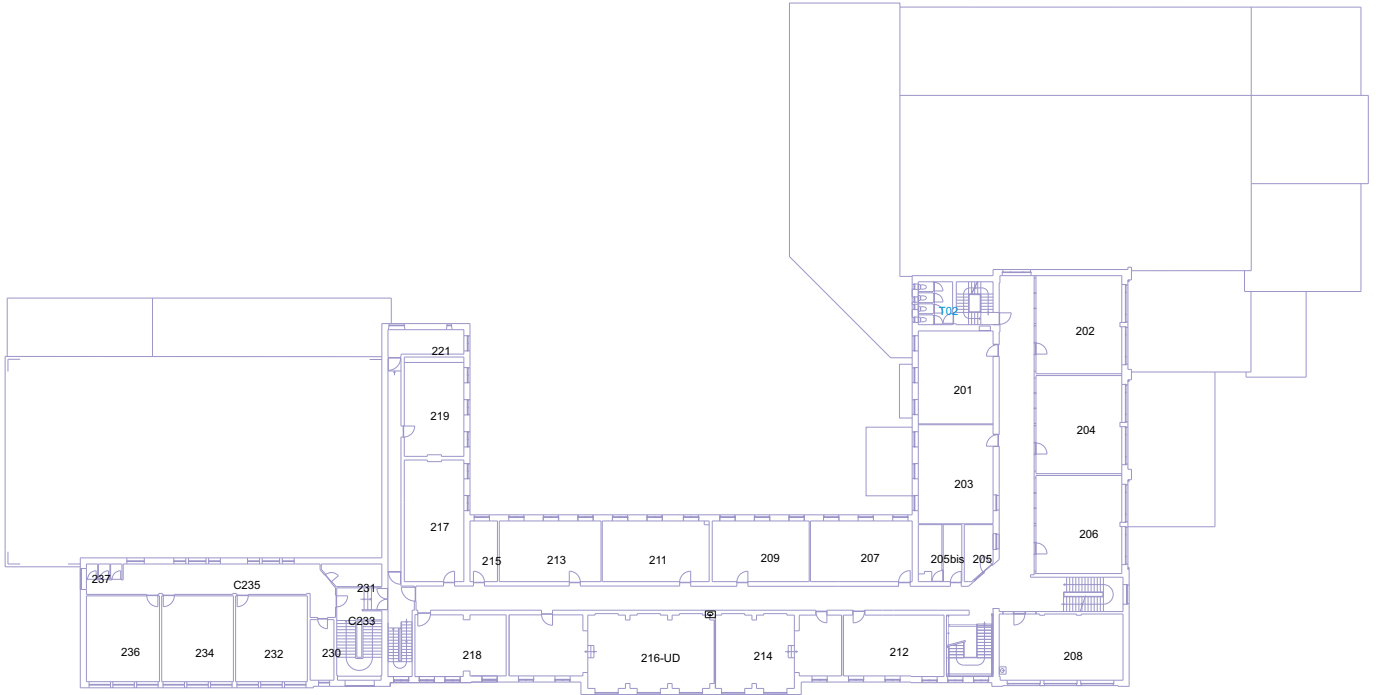
FIGURE 4.1 – Évolution de l'indice de stationnarité pour un plancher standard

Si cela est étendu à des planchers de grandes tailles (50m x 50m), la même conclusion peut être tirée si la période est au minimum 15s. En dessous de cette limite, la stationnarité est alors atteinte pour un plus grand nombre de piétons. Le modèle ne fournit pas une réponse satisfaisante pour des périodes si basses en raison de la proximité avec la taille de la fenêtre utilisée dans la définition de l'indice de stationnarité.

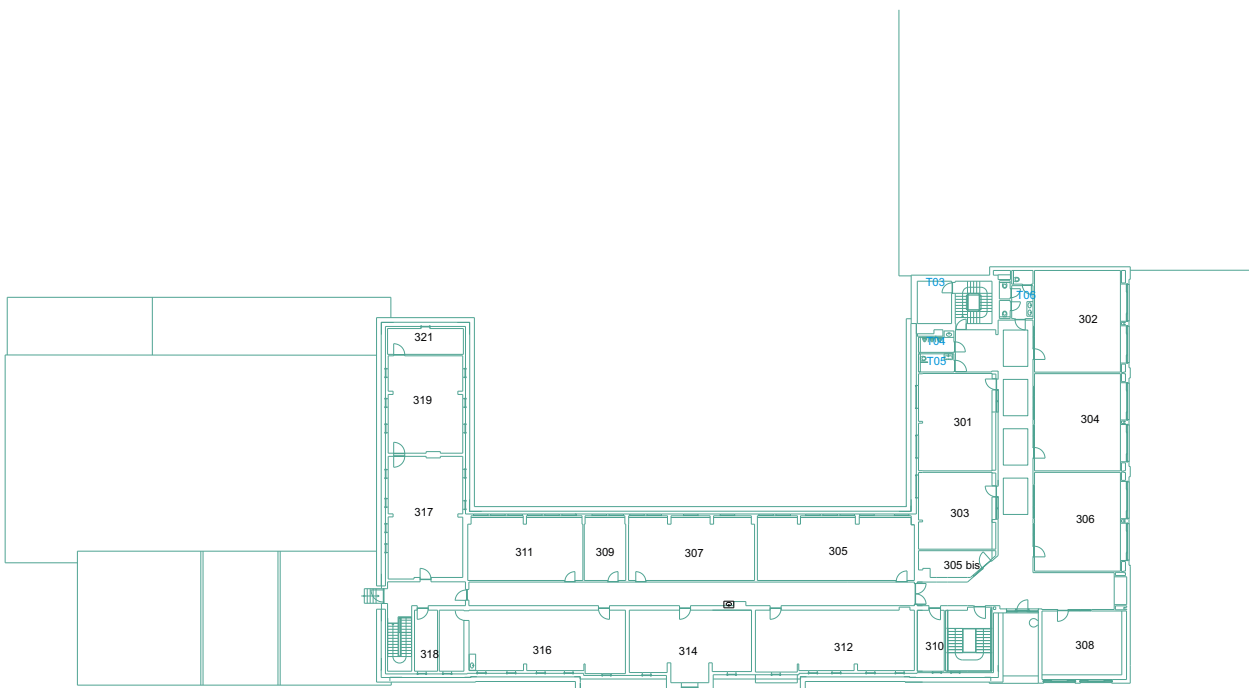




FIGURE A.2 – 2ème & 3ème étage



Bâtiment 1 : 2<sup>ème</sup> étage



Bâtiment 1 : 3<sup>ème</sup> étage

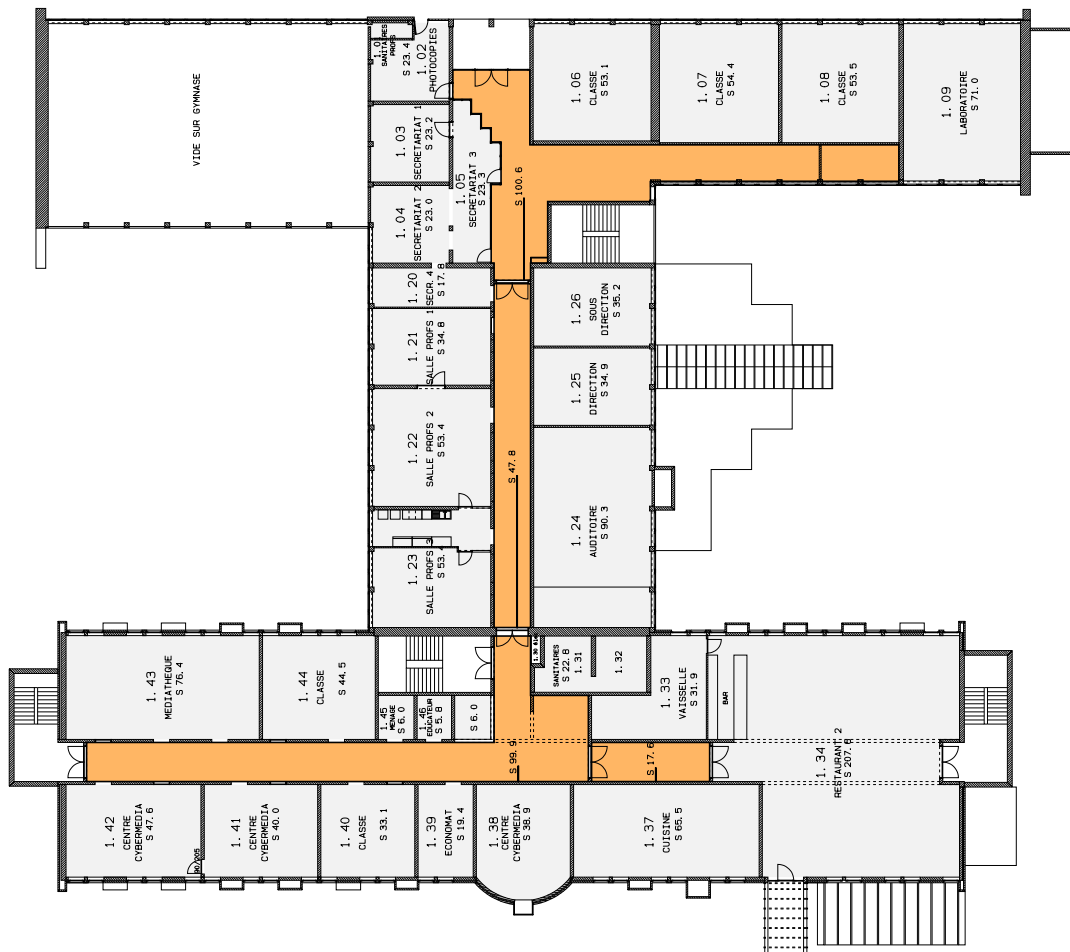
## A.1.2 Institut Notre Dame Heusy

FIGURE A.3 – Bâtiment A - Niveau 0



NIVEAU 0

FIGURE A.4 – Bâtiment A - Niveau 1

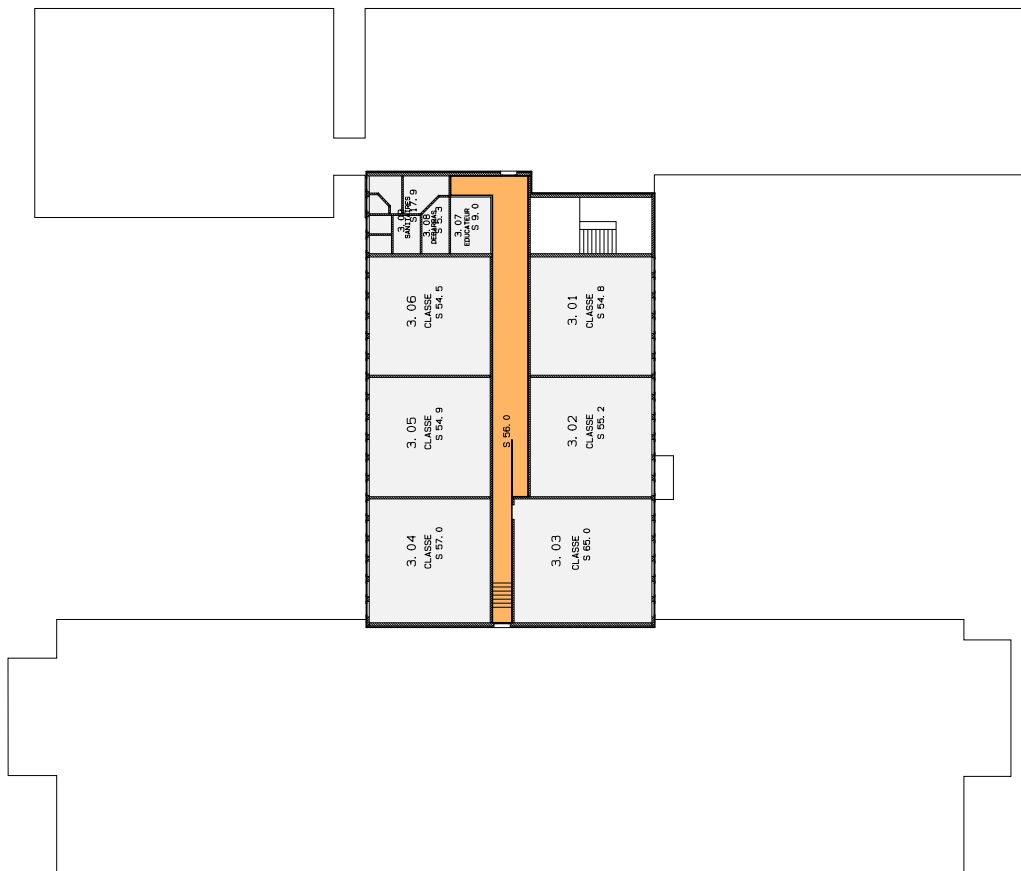


NIVEAU 1

FIGURE A.5 – Bâtiment A - Niveau 2



FIGURE A.6 – Bâtiment A - Niveau 3



NIVEAU 3





FIGURE A.8 – Bâtiment B

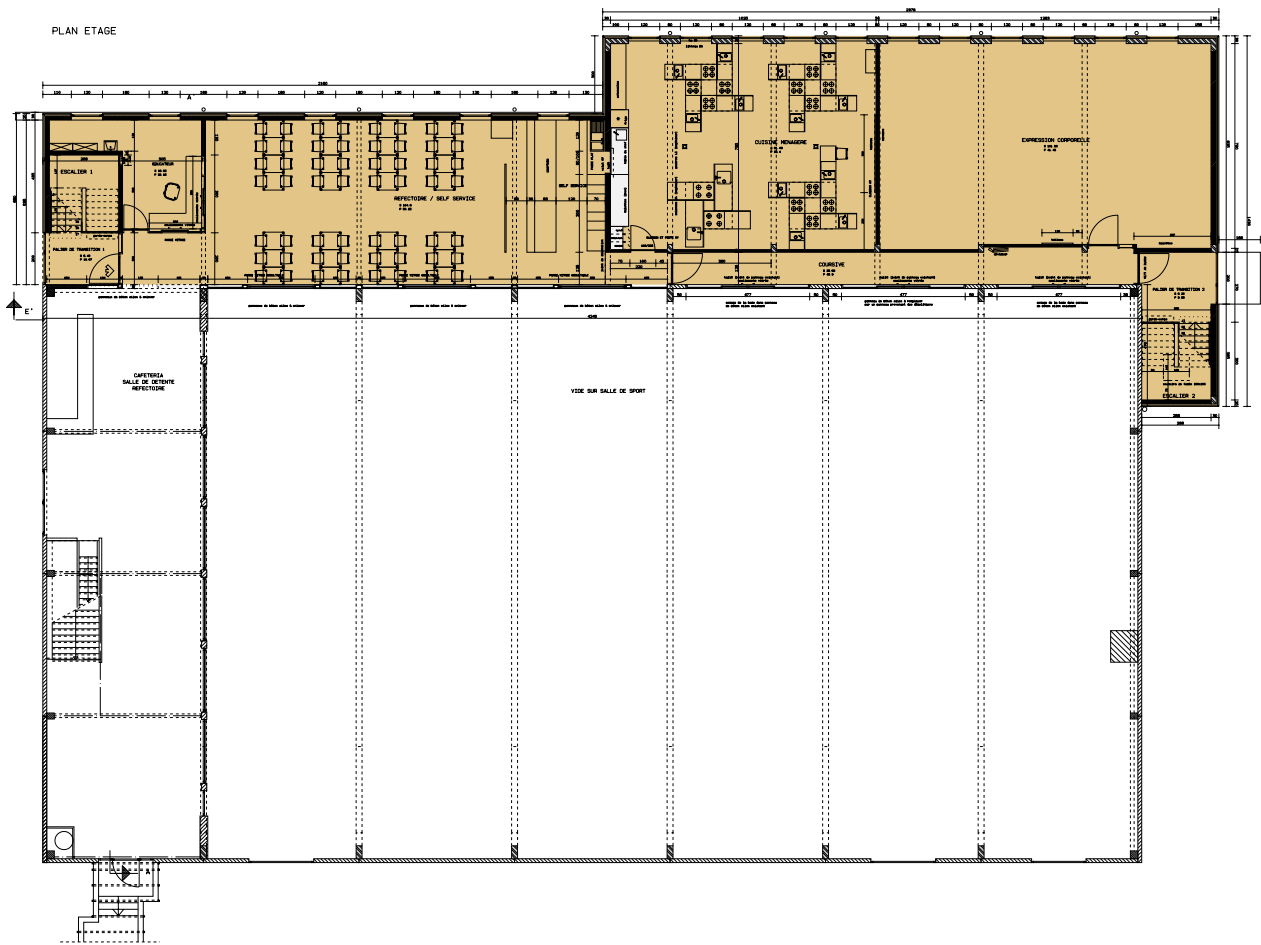
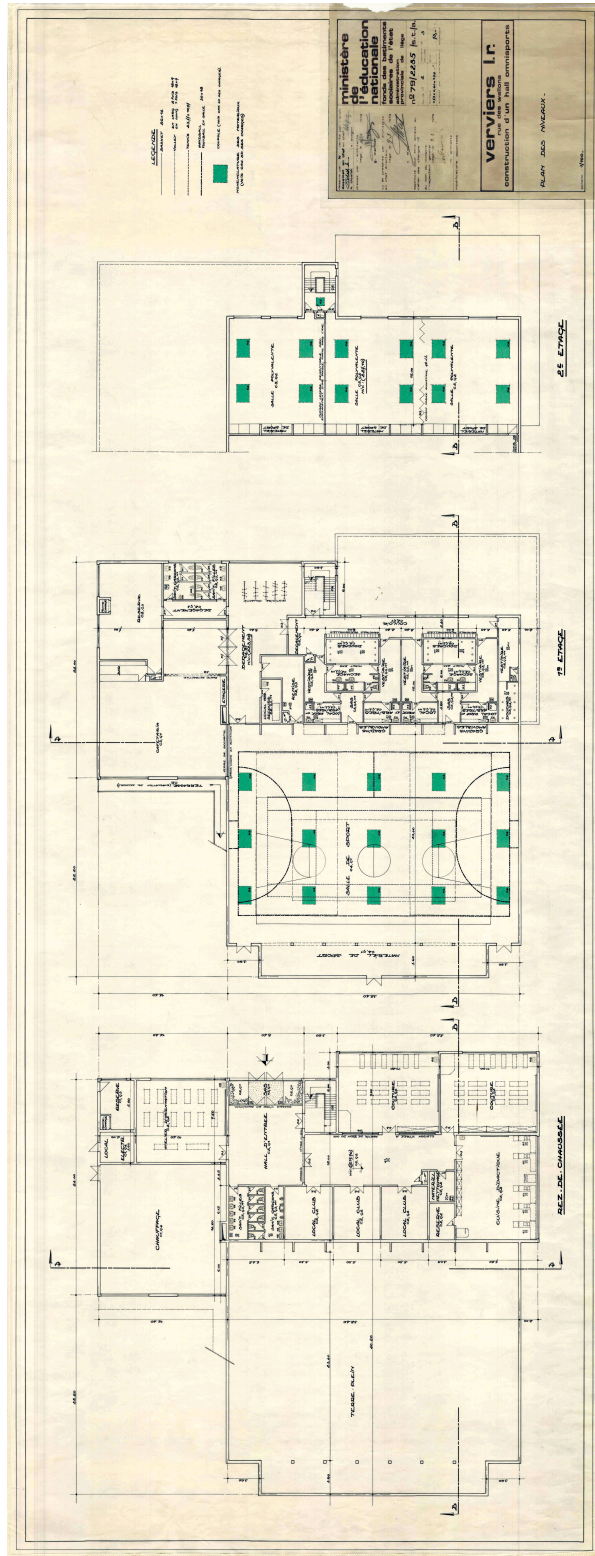




FIGURE A.10 – Bâtiment 2



## A.2 Tests préliminaires

### A.2.1 Institut Saint François-Xavier 2

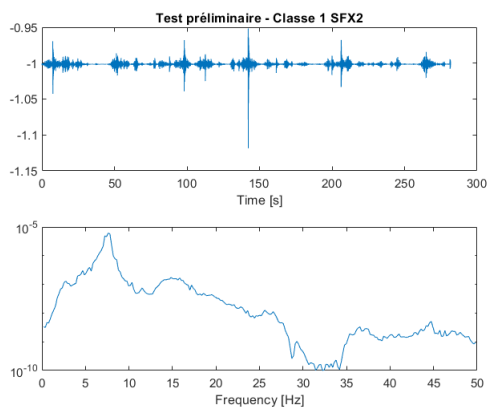


FIGURE A.11 – 2ème étage - 204 [A.2]

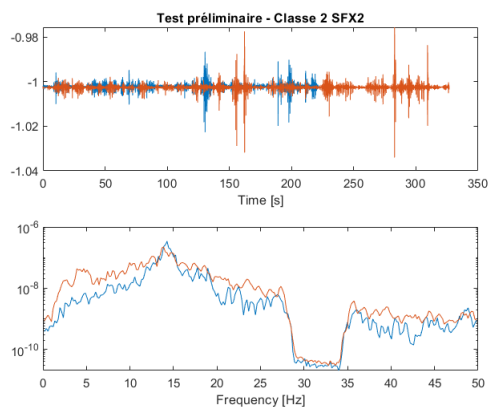


FIGURE A.12 – 3ème étage - 304 [A.2]

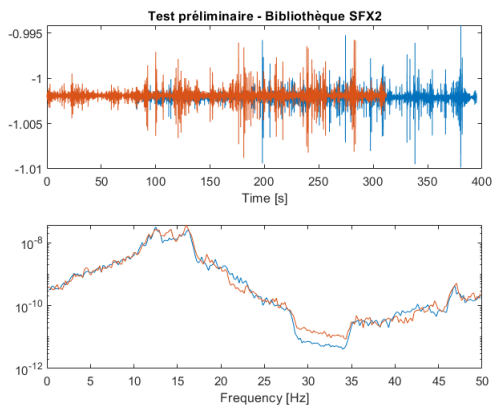


FIGURE A.13 – 2ème étage - 216 UD [A.2]

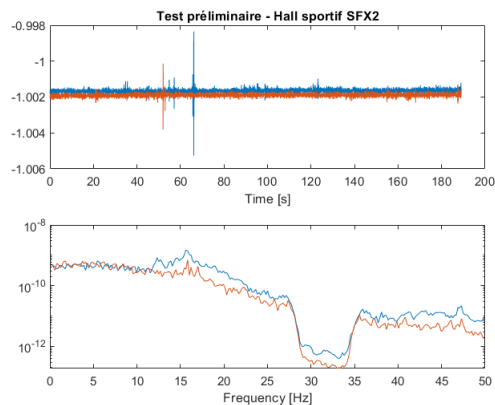


FIGURE A.14 – Rez de chaussée - Salle orange [A.1]

### A.2.2 Institut Notre Dame Heusy

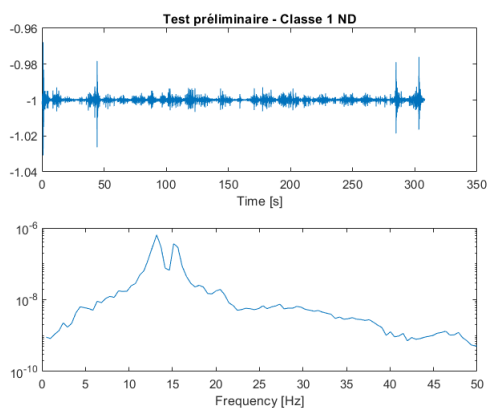


FIGURE A.15 – Bâtiment A - Niveau 1 - 1.07 [A.4]

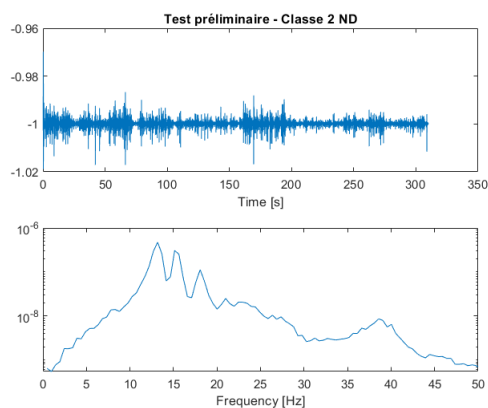


FIGURE A.16 – Bâtiment A - Niveau 1 - 1.08 [A.4]

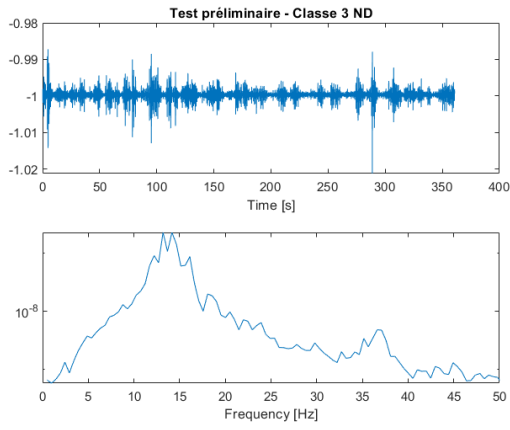


FIGURE A.17 – Bâtiment A - Niveau 2 - 2.07 [A.5]

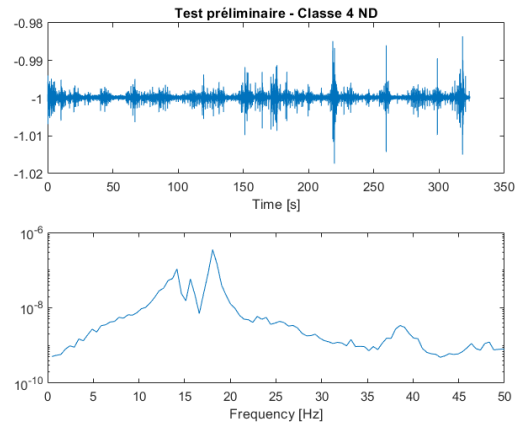


FIGURE A.18 – Bâtiment A - Niveau 2 - 2.08 [A.5]

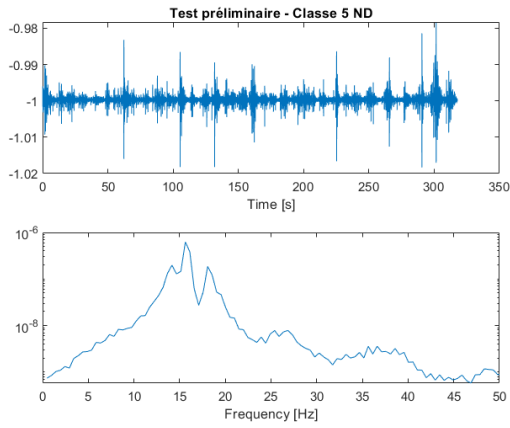


FIGURE A.19 – Bâtiment A - Niveau 2 - 2.09 [A.5]

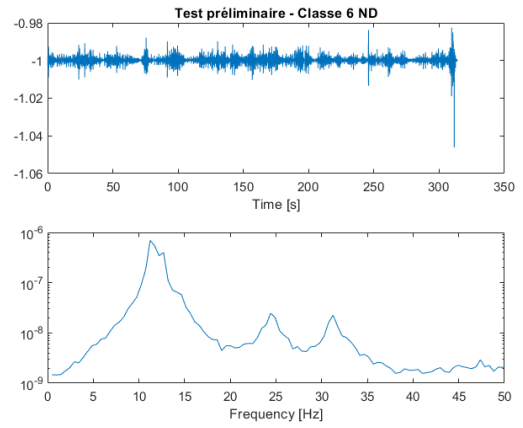


FIGURE A.20 – Bâtiment A - Niveau 2 - 2.25 [A.5]

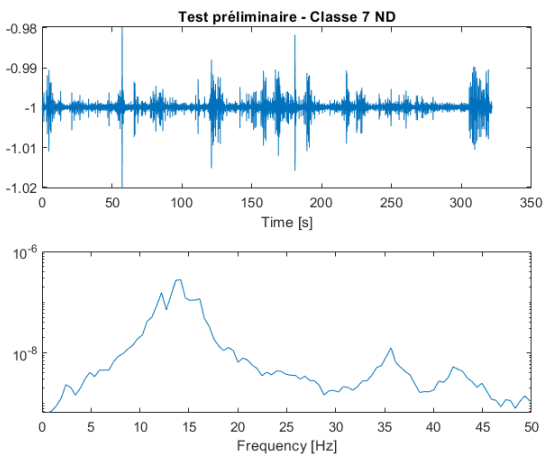


FIGURE A.21 – Bâtiment A - Niveau 2 - 2.35 [A.5]

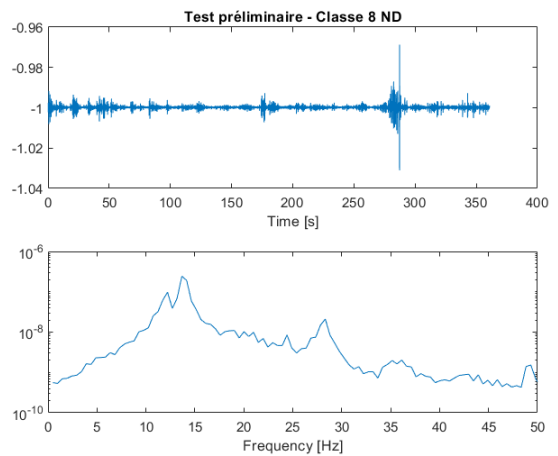


FIGURE A.22 – Bâtiment A - Niveau 2 - 2.36 [A.5]

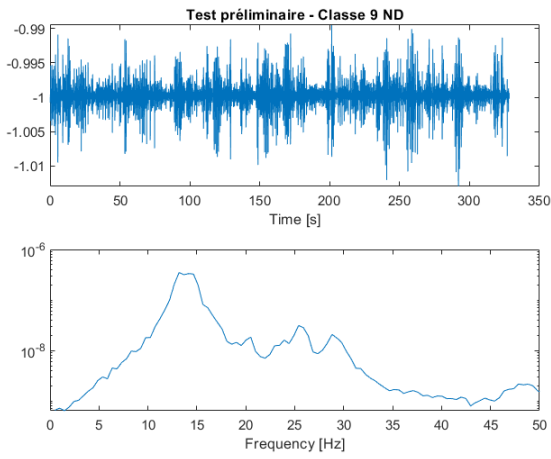


FIGURE A.23 – Bâtiment A - Niveau 2 - 2.44 [A.5]

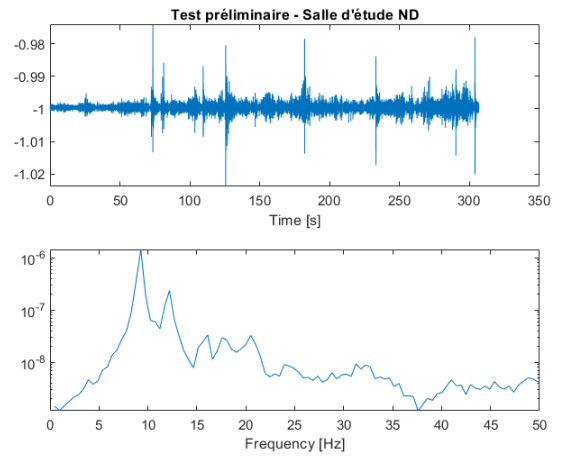


FIGURE A.24 – Bâtiment A - Niveau 2 - 2.14 [A.5]

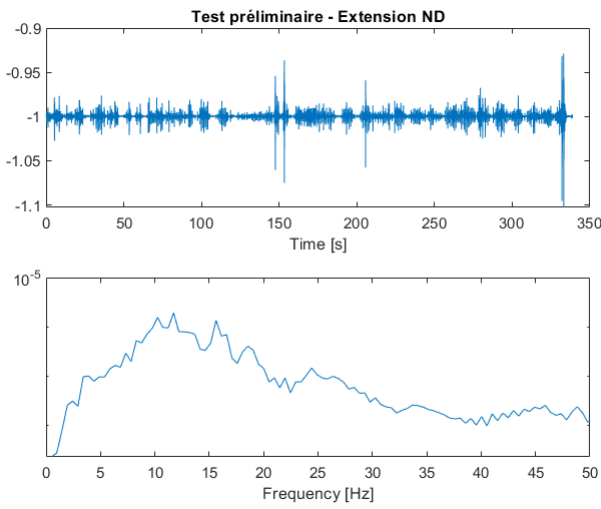


FIGURE A.25 – Bâtiment A - Extension - Salle de cours [A.7]

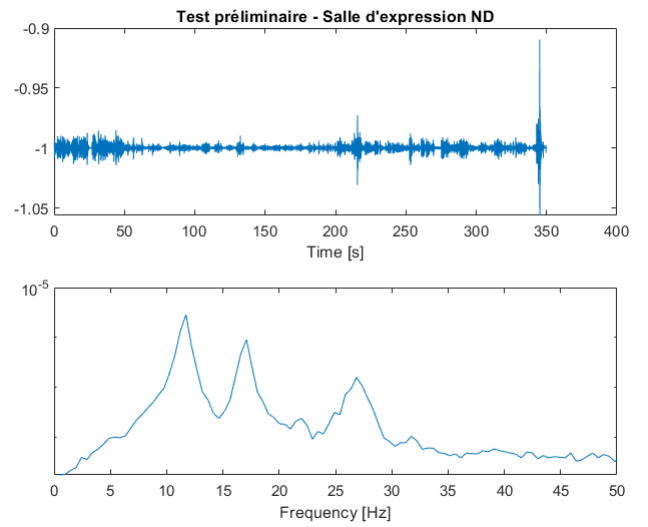


FIGURE A.26 – Bâtiment B - Extension - Expression [A.8]

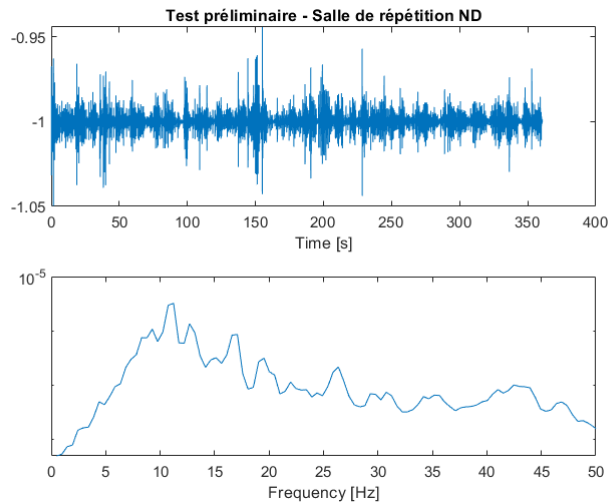


FIGURE A.27 – Bâtiment A - Extension - Répétition [A.7]

## A.2.3 Athénée Royal Verdi

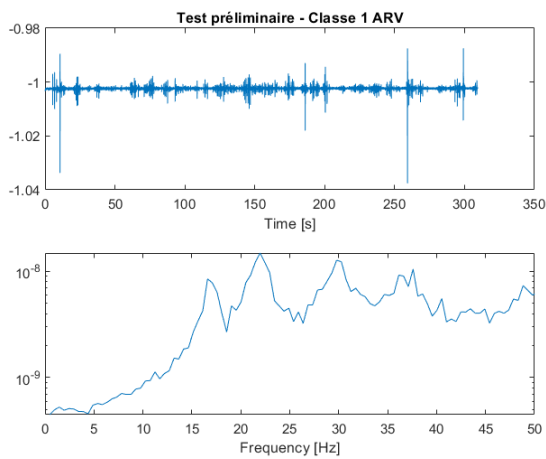


FIGURE A.28 – Bâtiment 1 [A.9] - Salle des professeurs

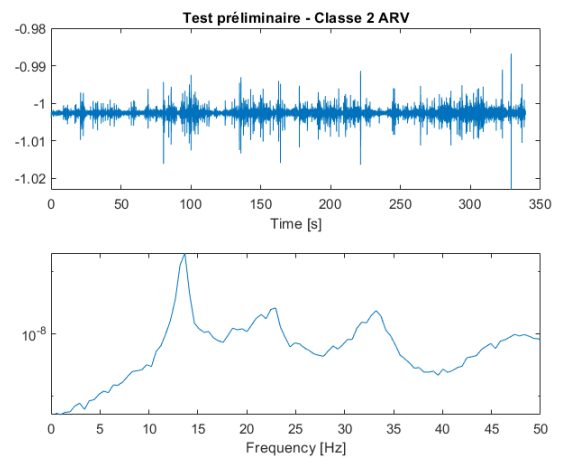


FIGURE A.29 – Bâtiment 1 [A.9]- Salle d'informatique

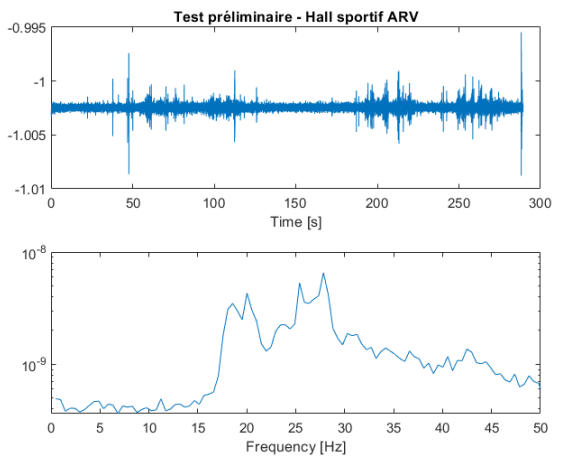
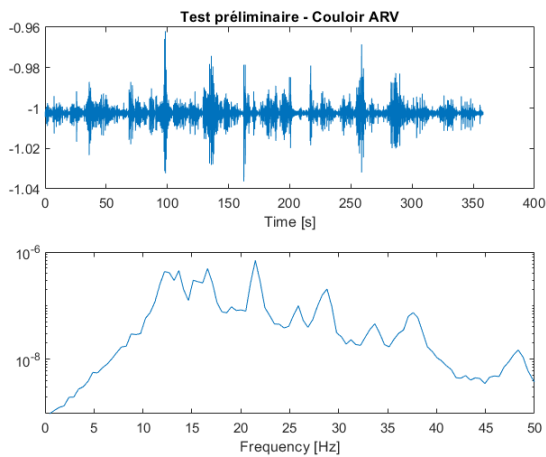


FIGURE A.30 – Bâtiment 2 [A.10]- Salle polyvalente

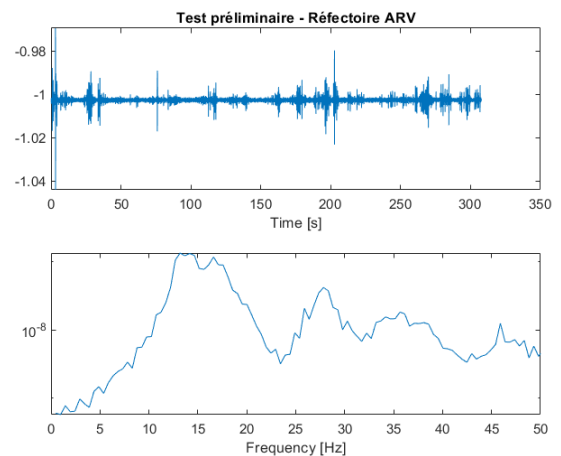
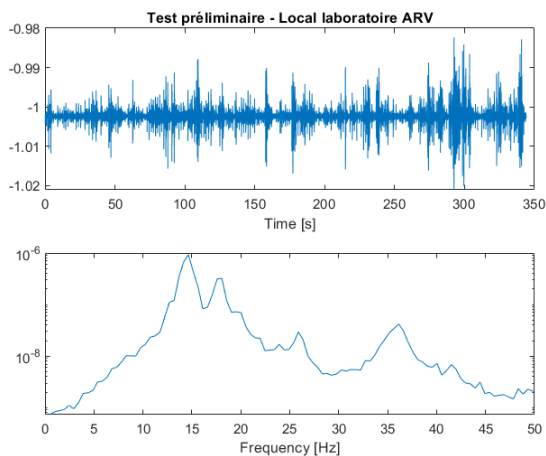
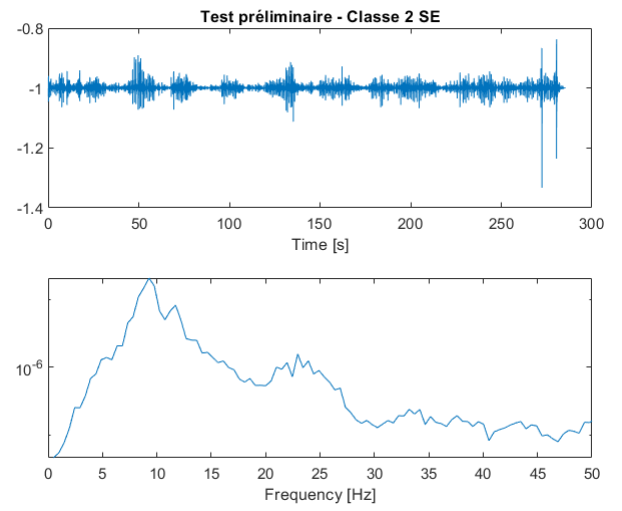
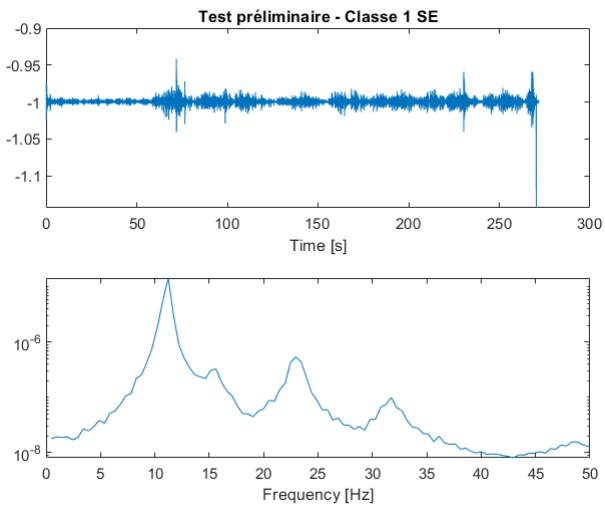


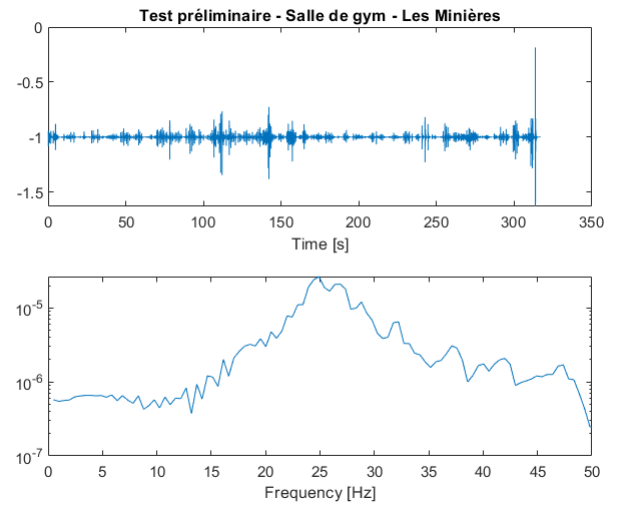
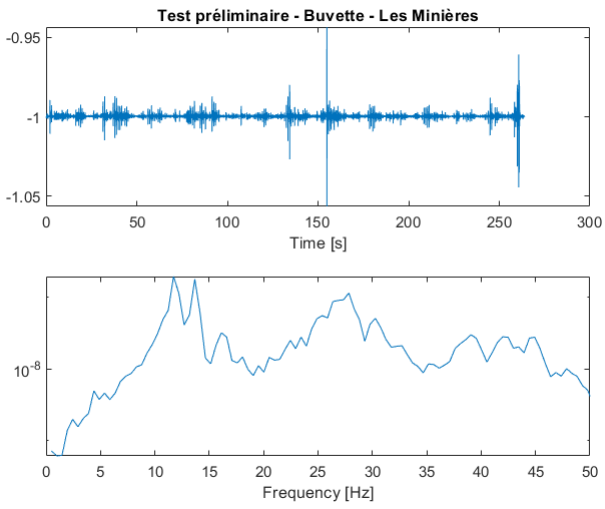
FIGURE A.31 – Bâtiment 2 [A.10]- Cafétéria



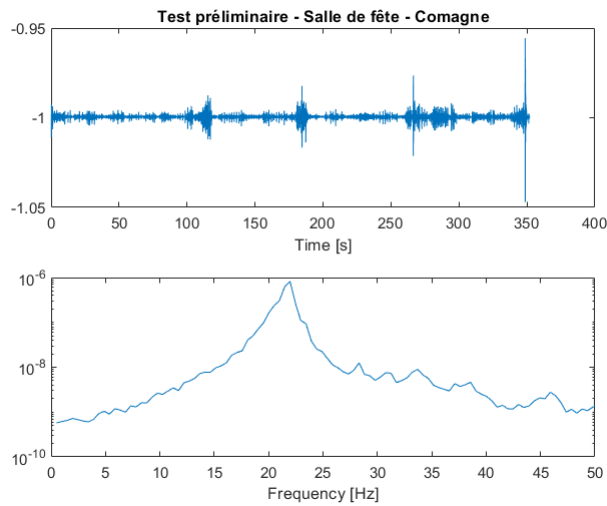
## A.2.4 Ecole maternelle et primaire Sainte Elisabeth



## A.2.5 Les Minières



## A.2.6 Ferme des Comagnes



## A.3 Traitement des données - Indice de stationnarité

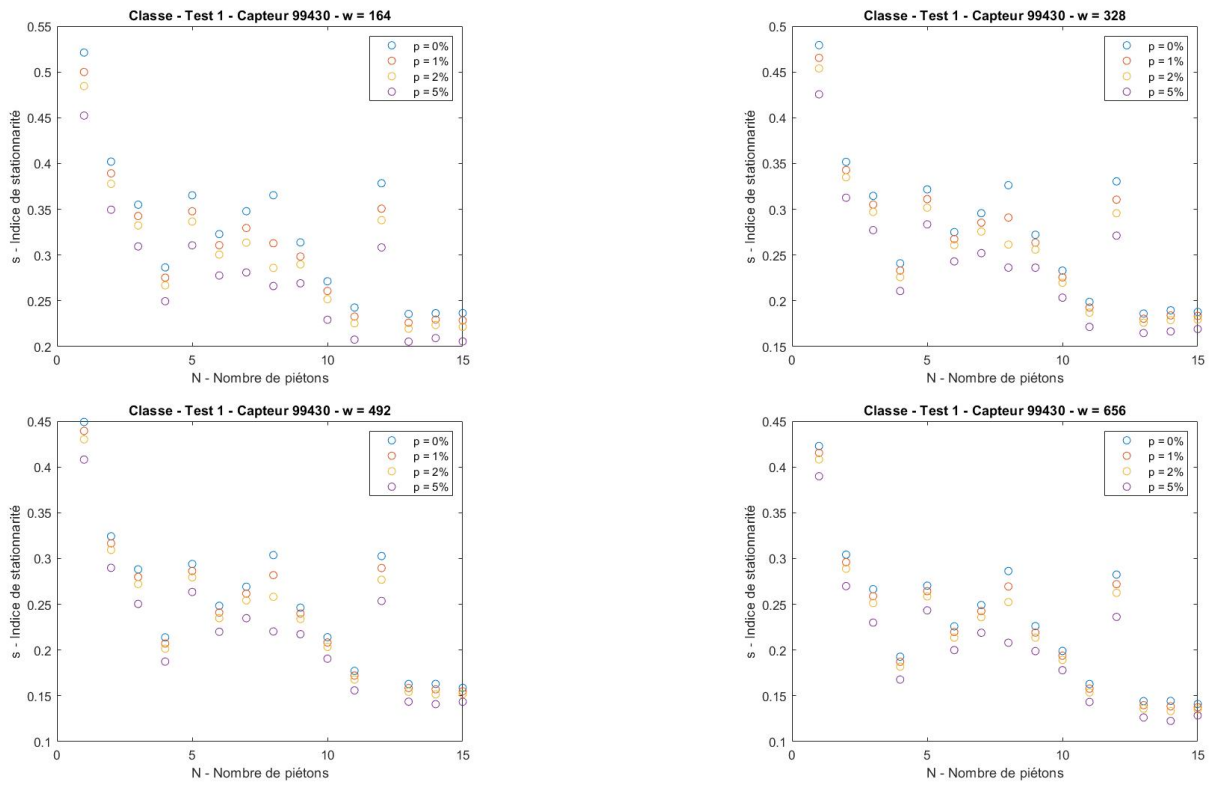


FIGURE A.32 – Classe - Effet du troncage sur l'indice de stationnarité

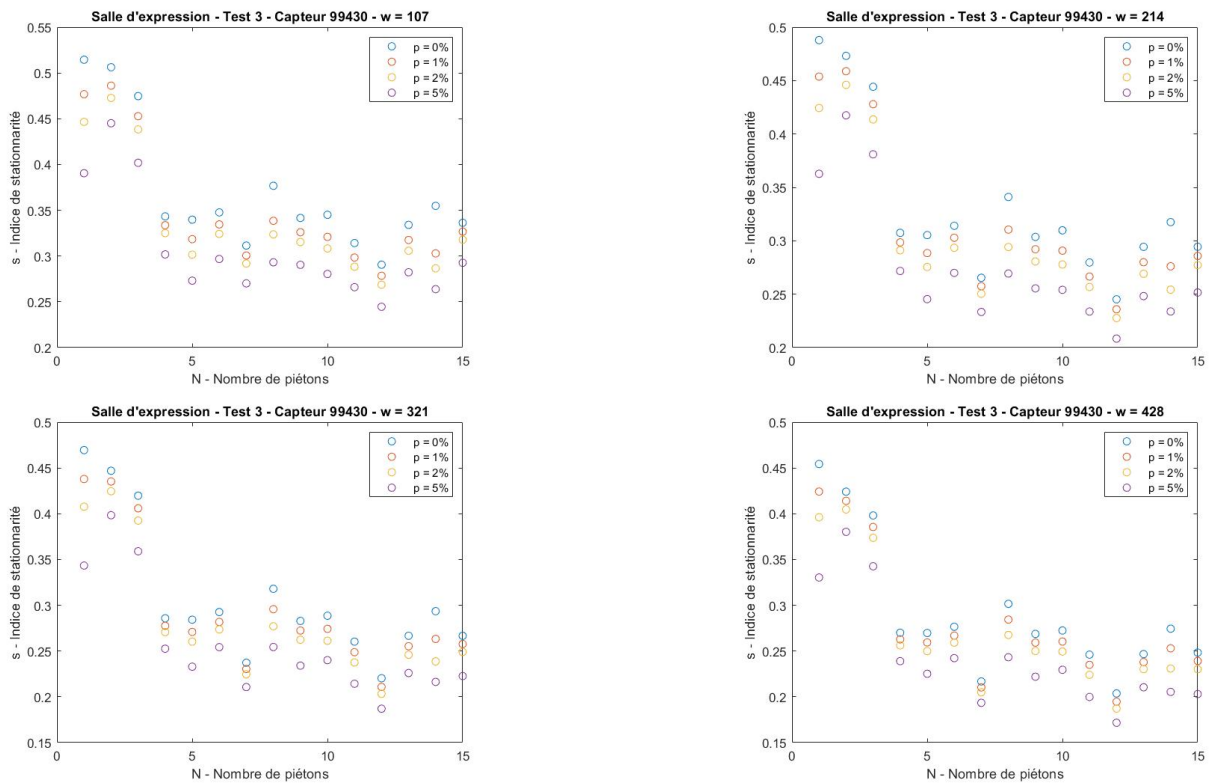


FIGURE A.33 – Salle d'expression - Effet du troncage sur l'indice de stationnarité

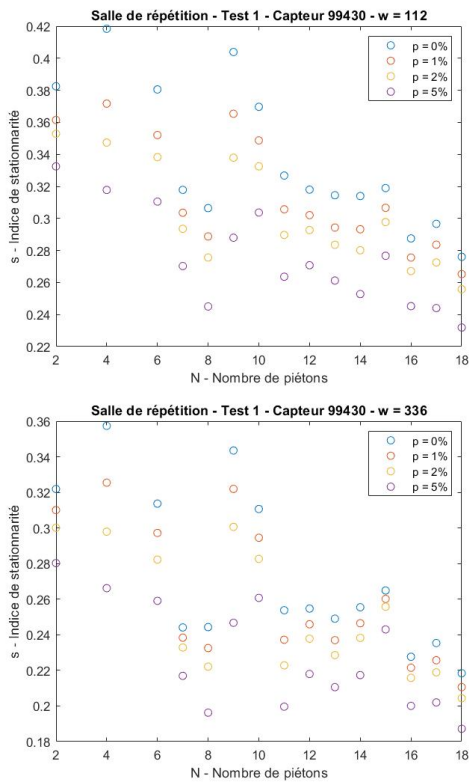


FIGURE A.34 – Salle de répétition - Effet du troncage sur l'indice de stationnarité

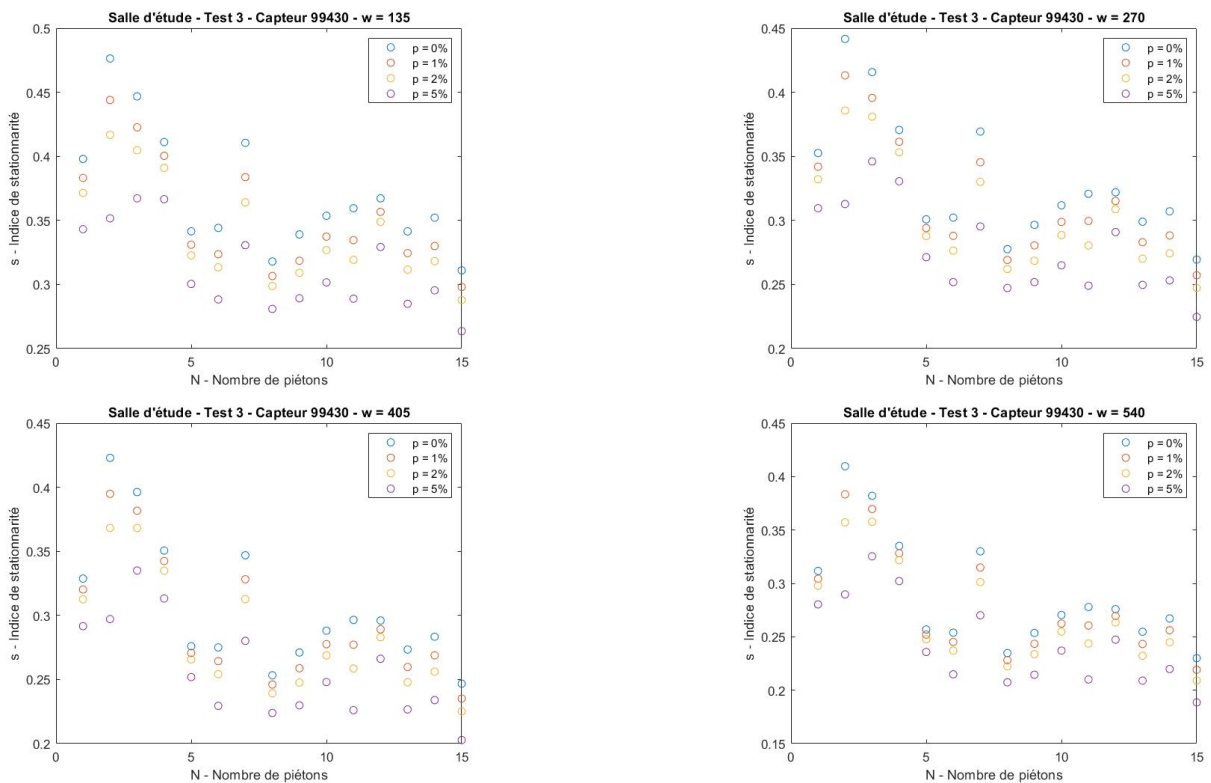
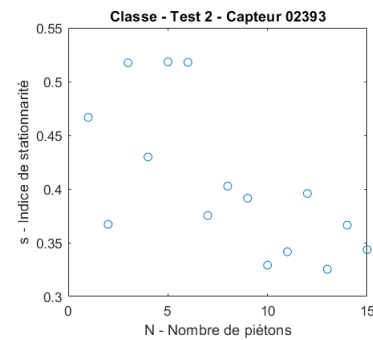
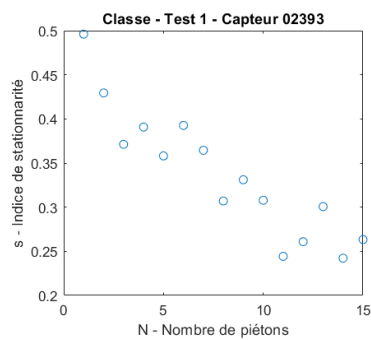
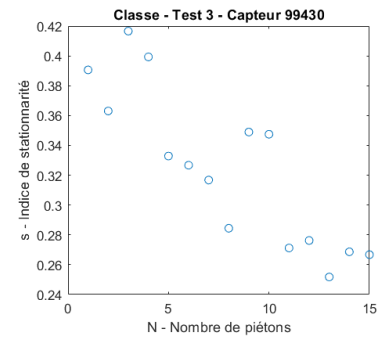
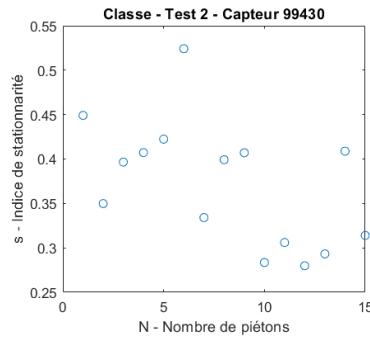
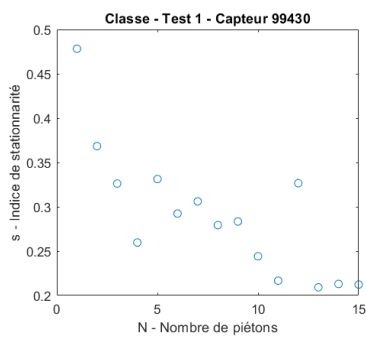


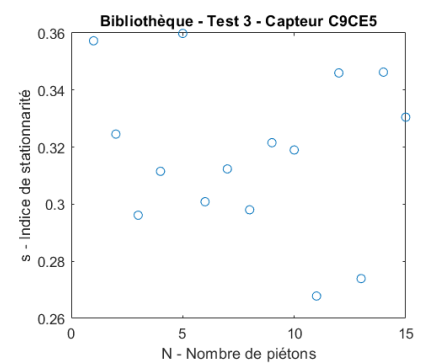
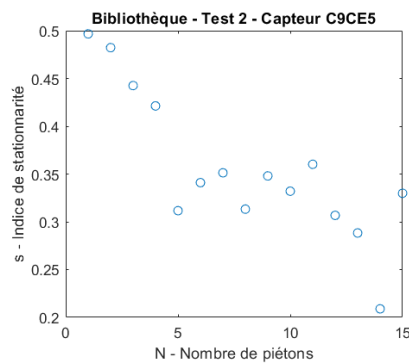
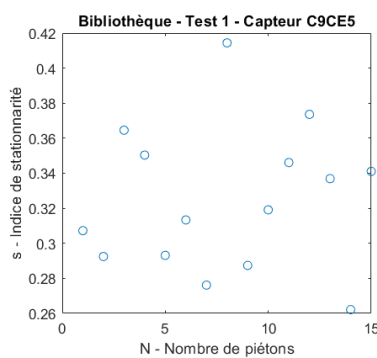
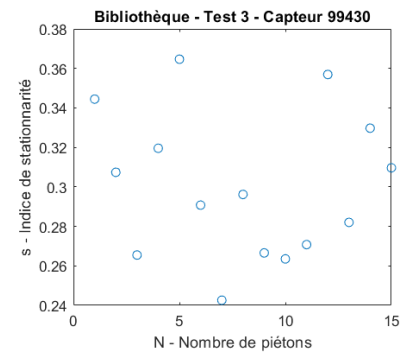
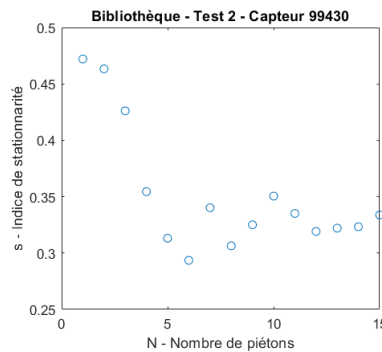
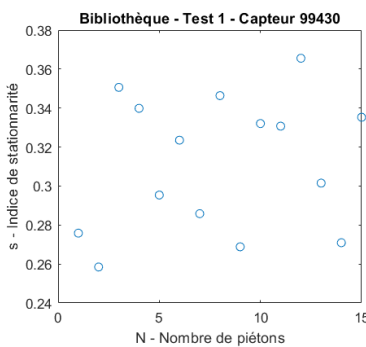
FIGURE A.35 – Etude - Effet du troncage sur l'indice de stationnarité

## A.4 Indice de stationnarité - Expérimental

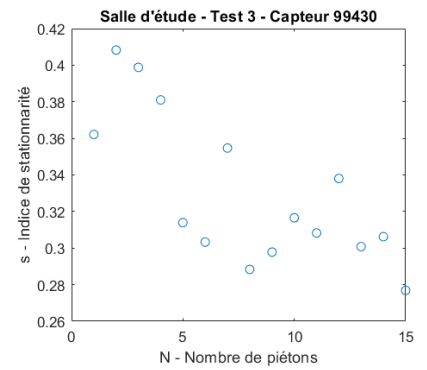
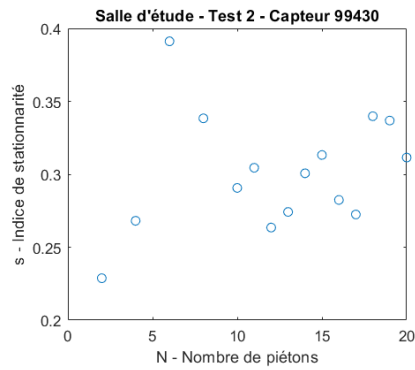
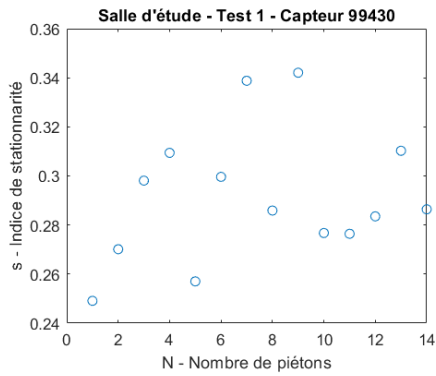
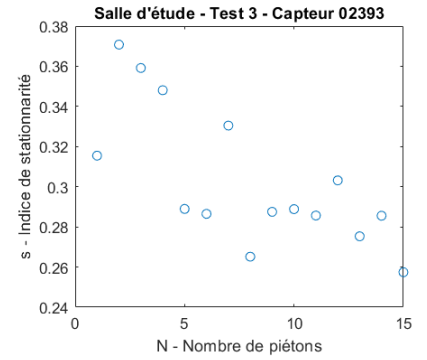
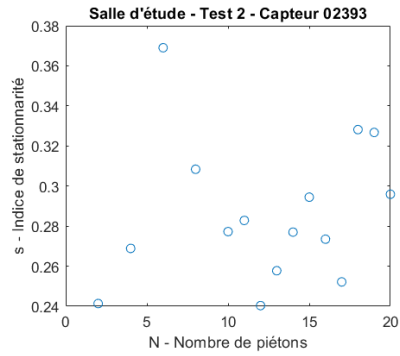
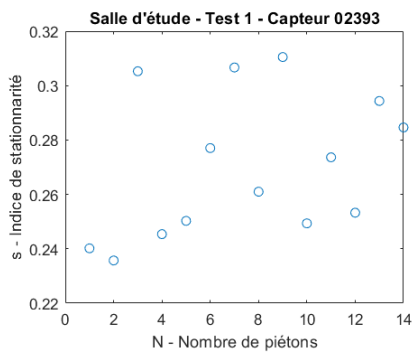
### A.4.1 Classe



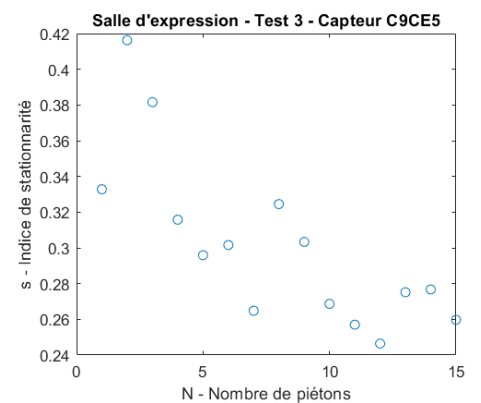
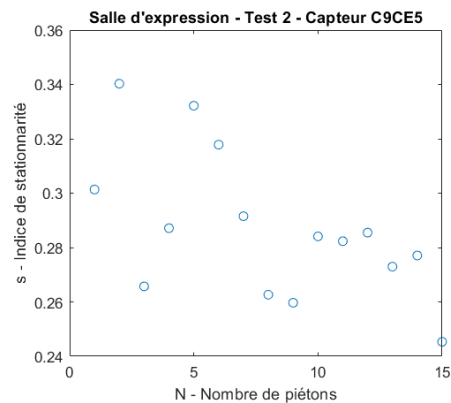
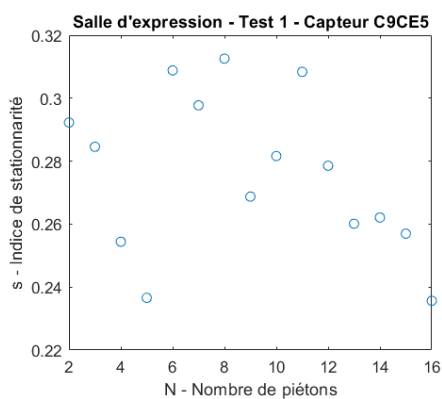
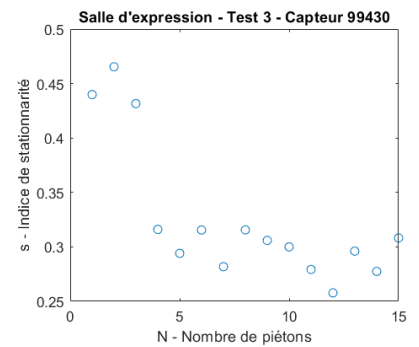
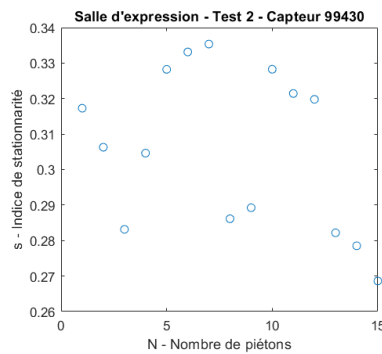
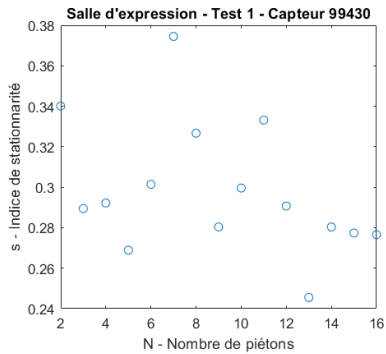
### A.4.2 Bibliothèque



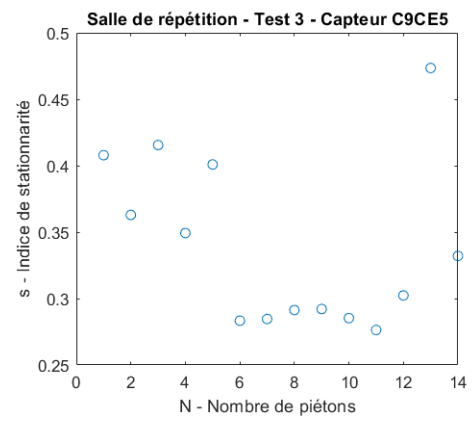
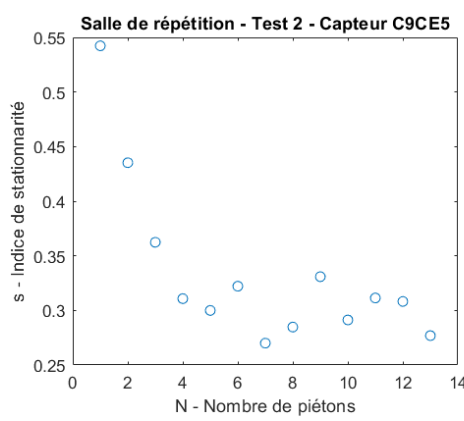
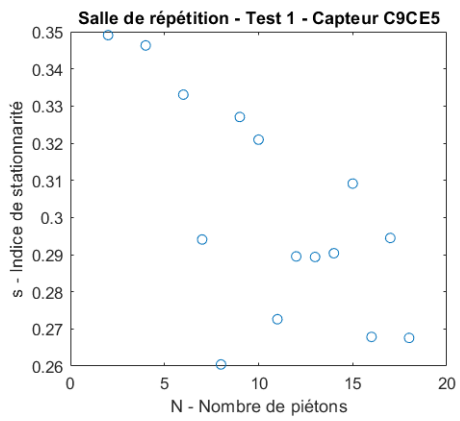
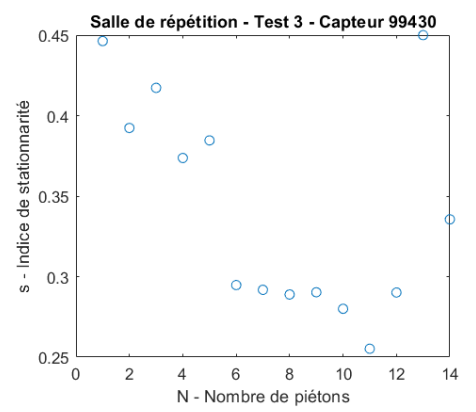
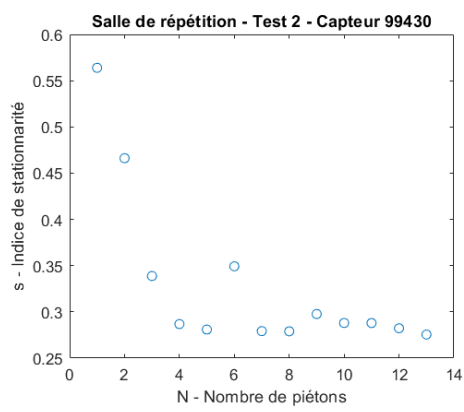
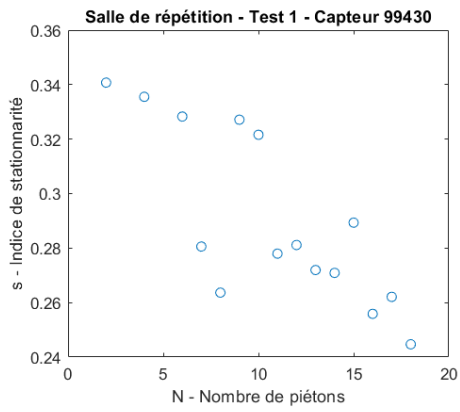
### A.4.3 Salle d'étude



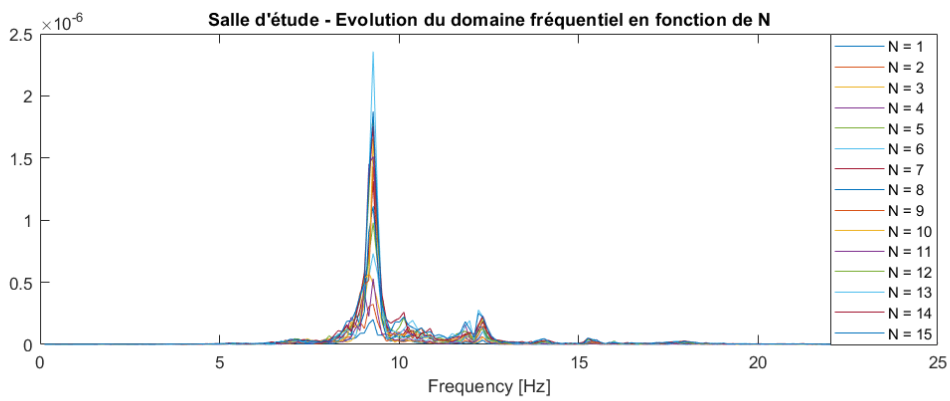
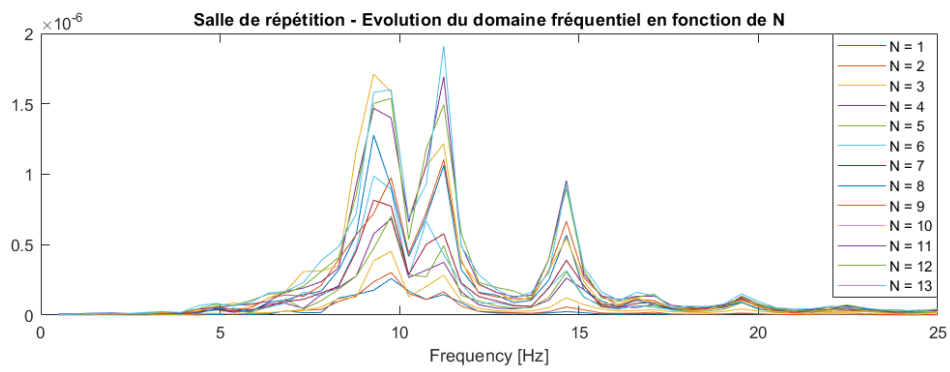
### A.4.4 Salle d'expression



## A.4.5 Salle de répétition



## A.5 Validation du code



## A.5.1 Salle d'étude

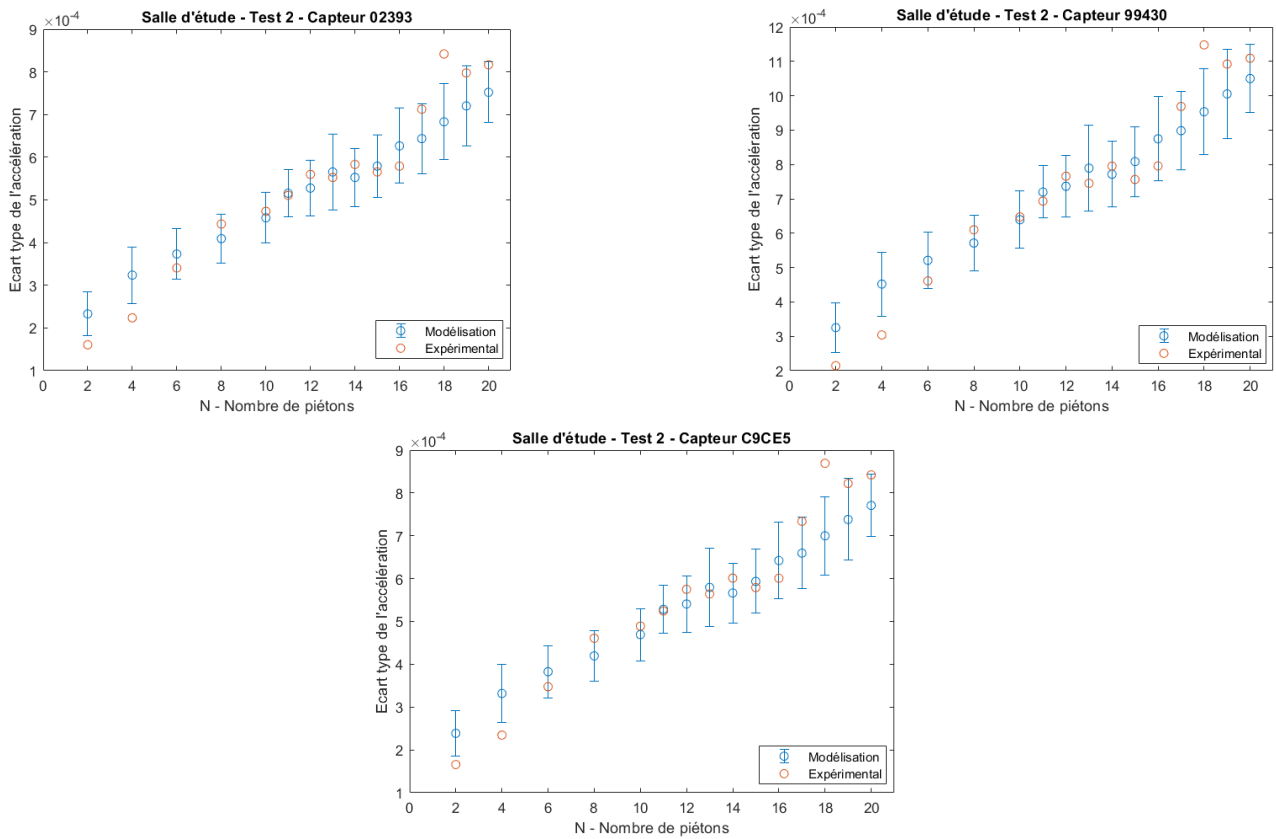


FIGURE A.36 – Étude - Test 2 - Superposition des écarts types numériques et expérimentaux

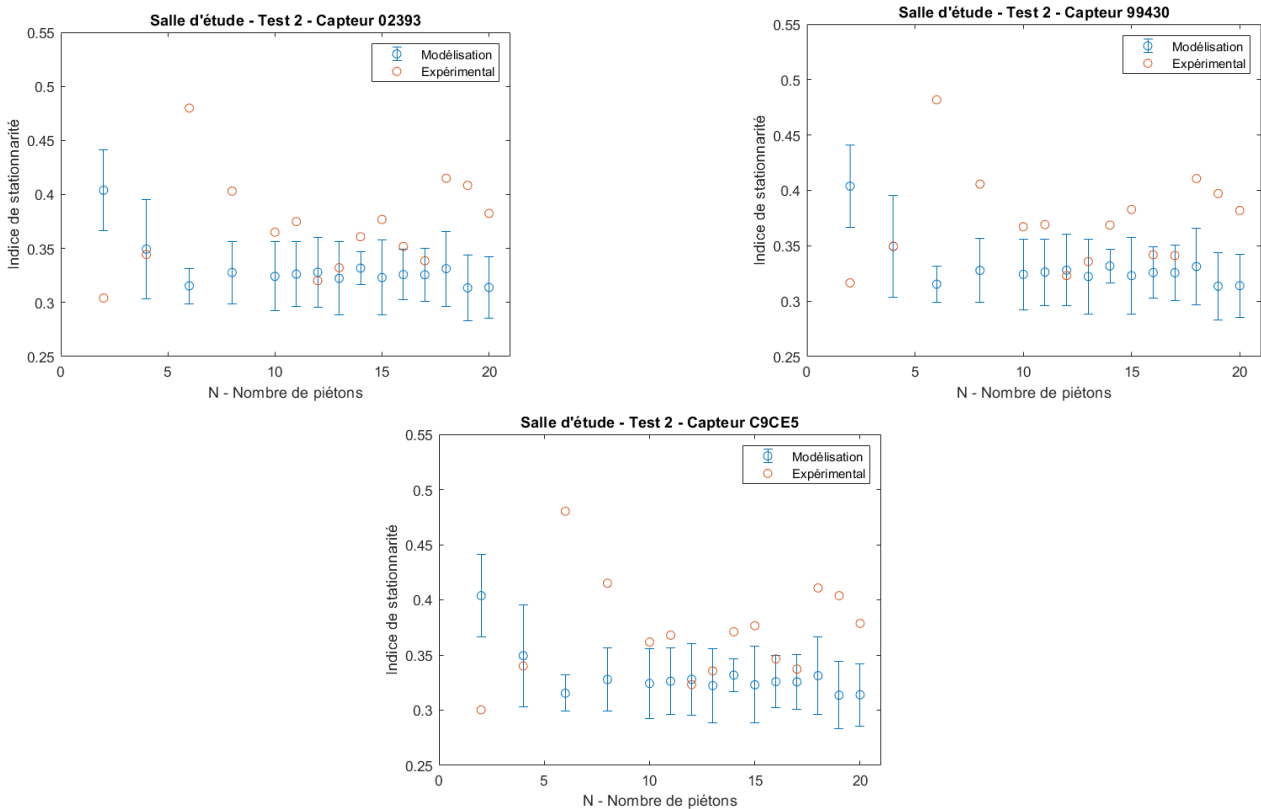


FIGURE A.37 – Étude - Test 2 - Superposition de l'indice de stationnarité numérique et expérimental



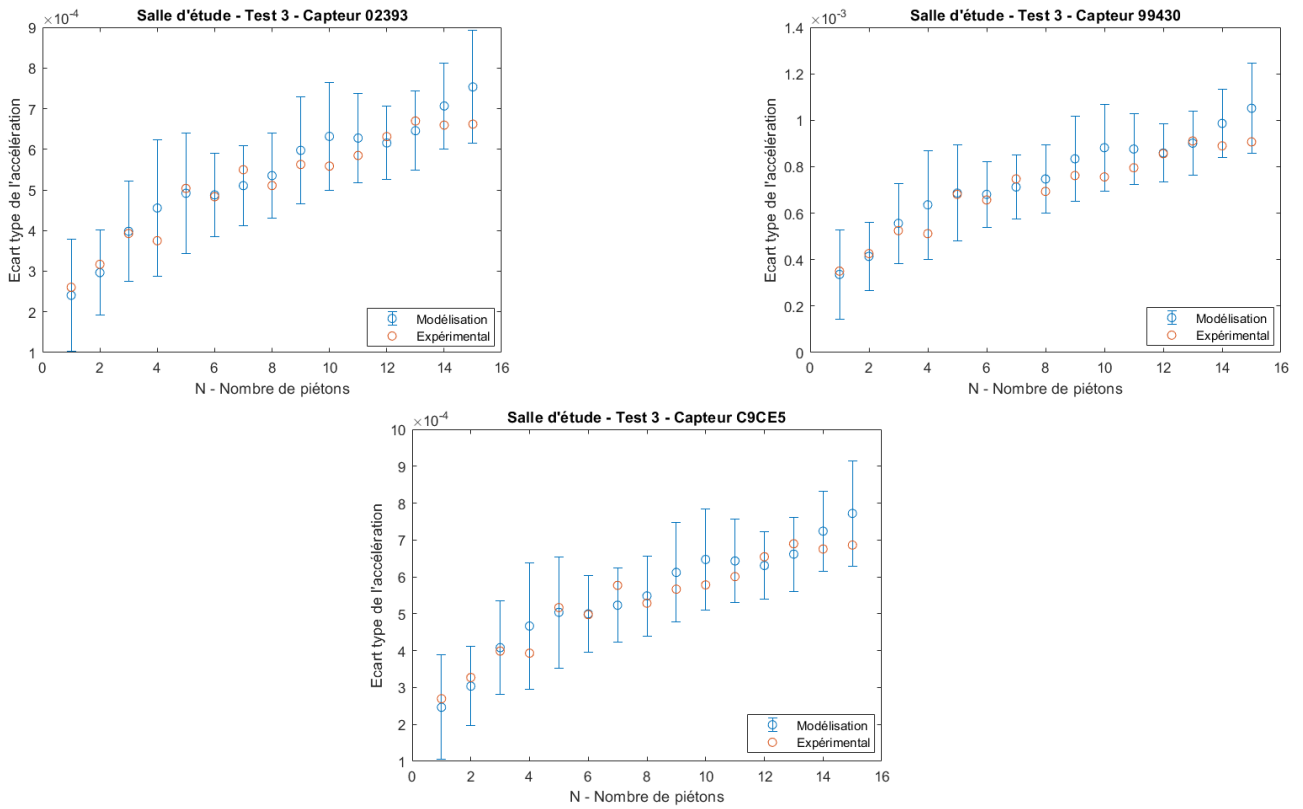


FIGURE A.38 – Étude - Test 3 - Superposition des écarts types numériques et expérimentaux

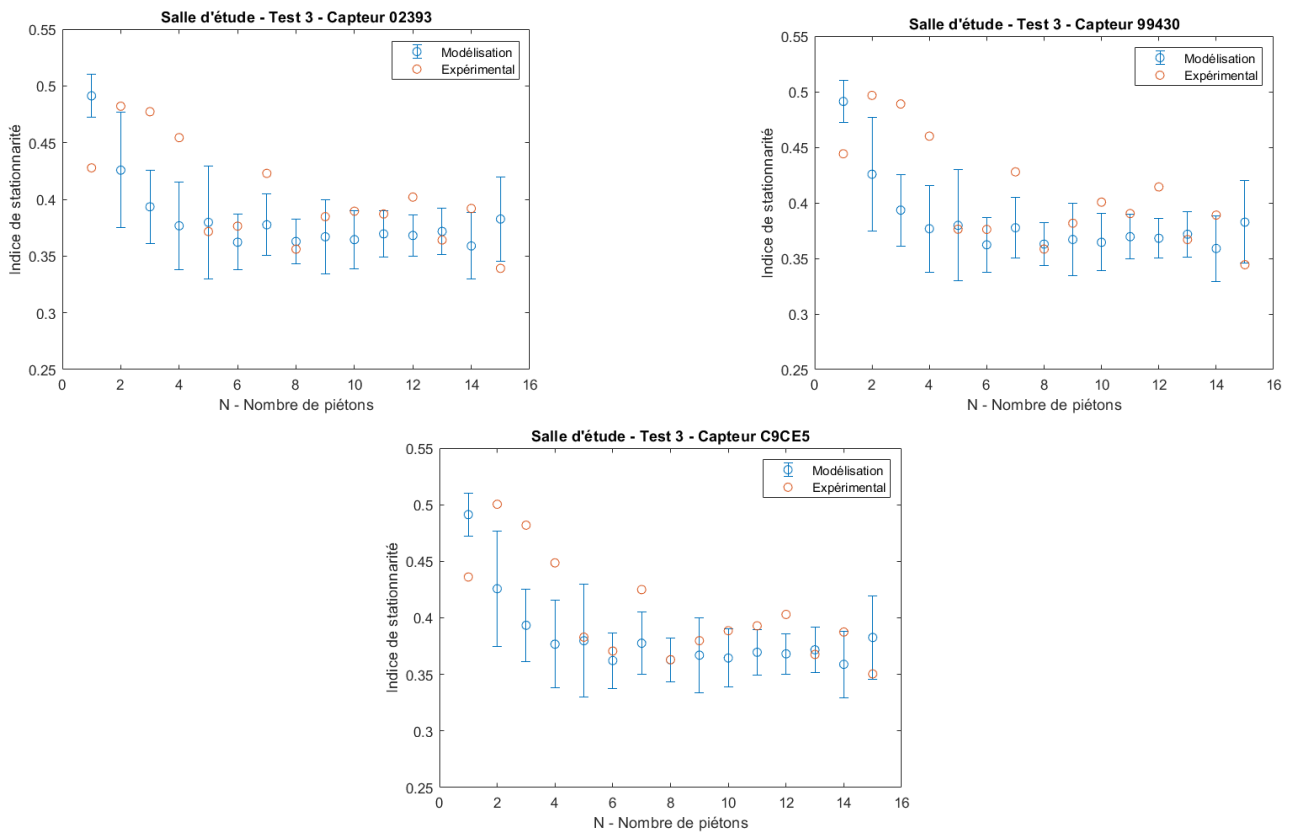


FIGURE A.39 – Étude - Test 3 - Superposition de l'indice de stationnarité numérique et expérimental

## A.5.2 Salle d'expression

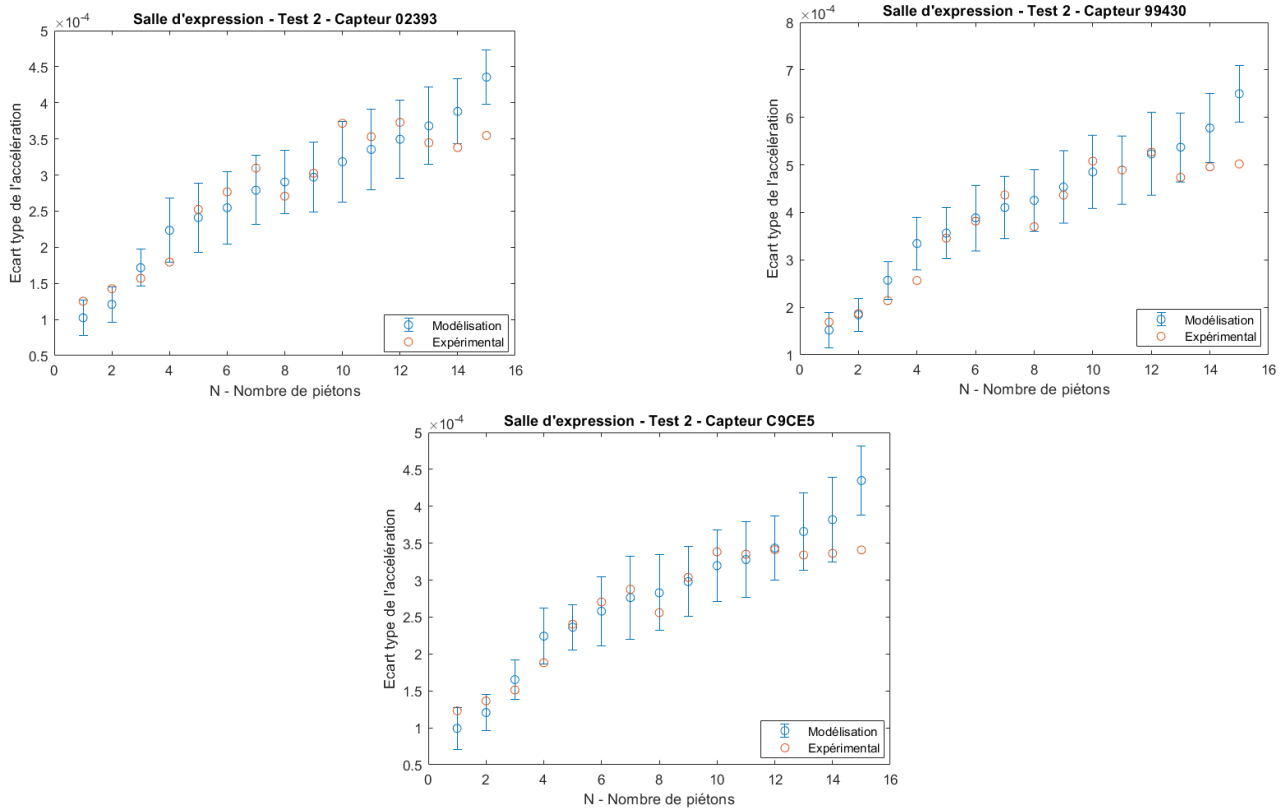


FIGURE A.40 – Salle d'expression - Test 2 - Superposition des écarts types numériques et expérimentaux

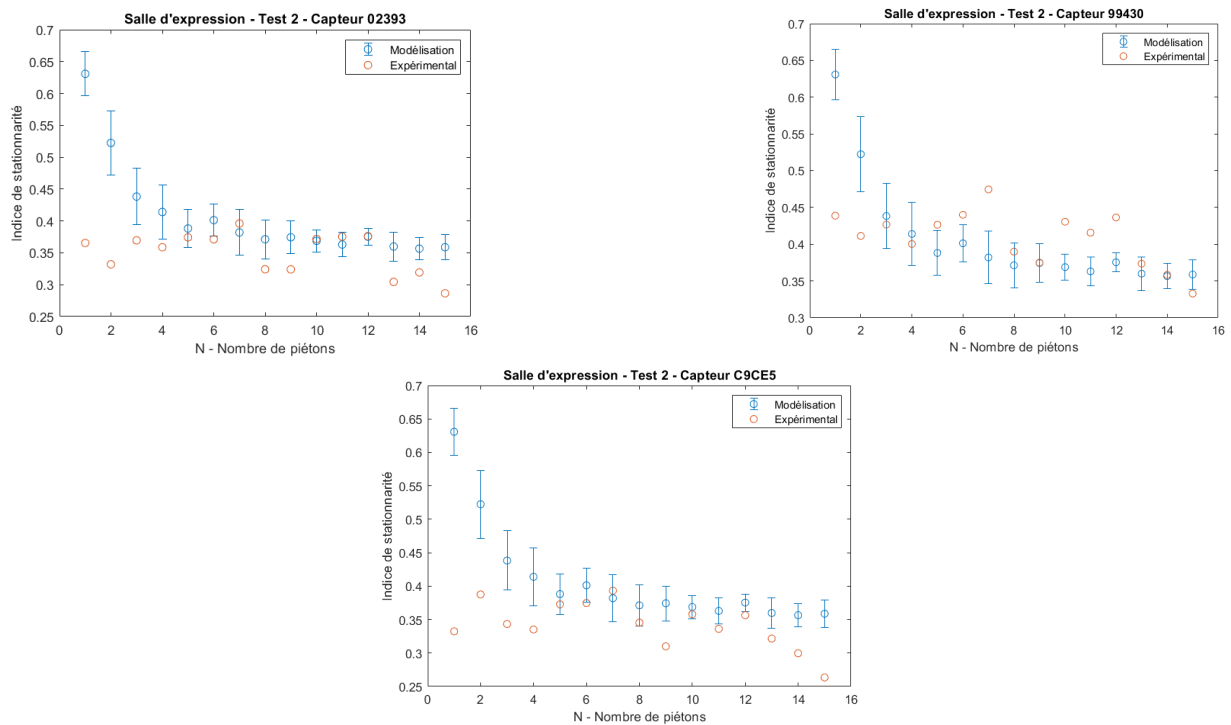


FIGURE A.41 – Salle d'expression - Test 2 - Superposition de l'indice de stationnarité numérique et expérimental

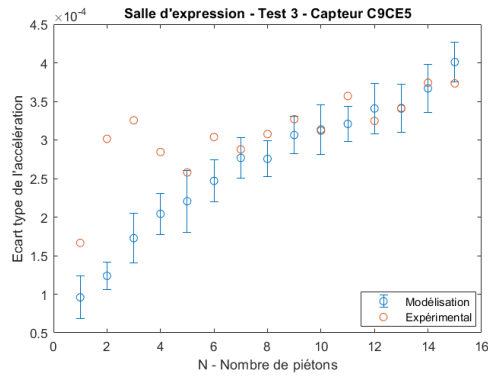
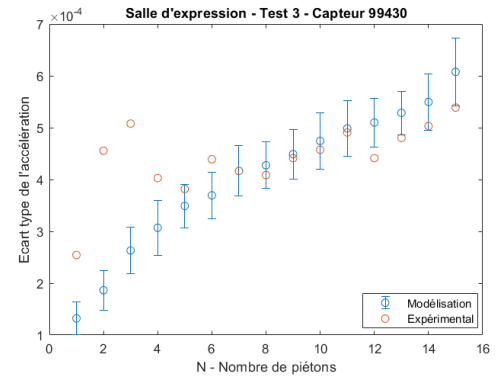
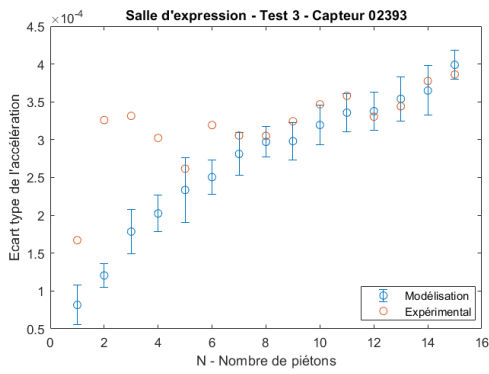


FIGURE A.42 – Salle d'expression - Test 3 - Superposition des écarts types numériques et expérimentaux

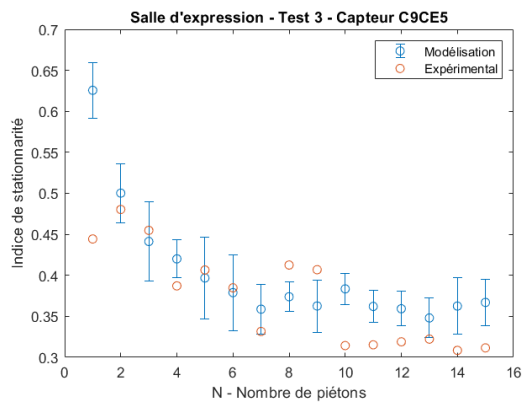
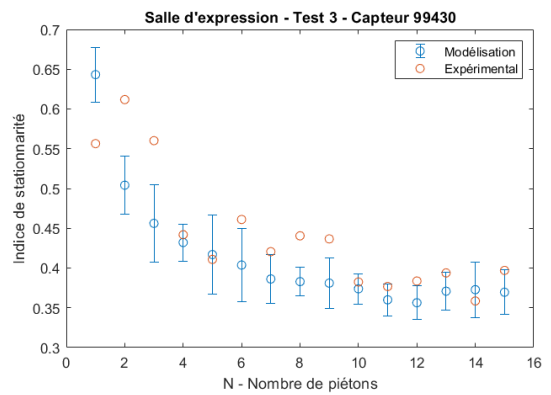
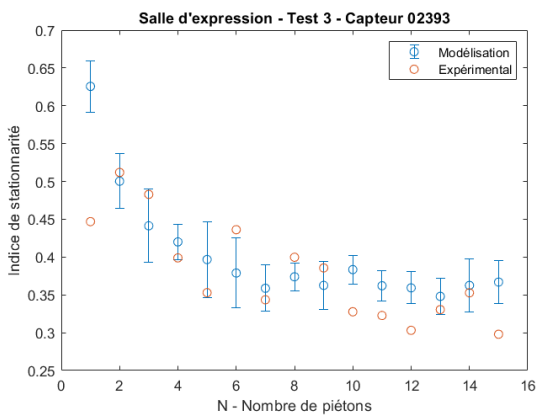


FIGURE A.43 – Salle d'expression - Test 3 - Superposition de l'indice de stationnarité numérique et expérimental

### A.5.3 Salle de répétition

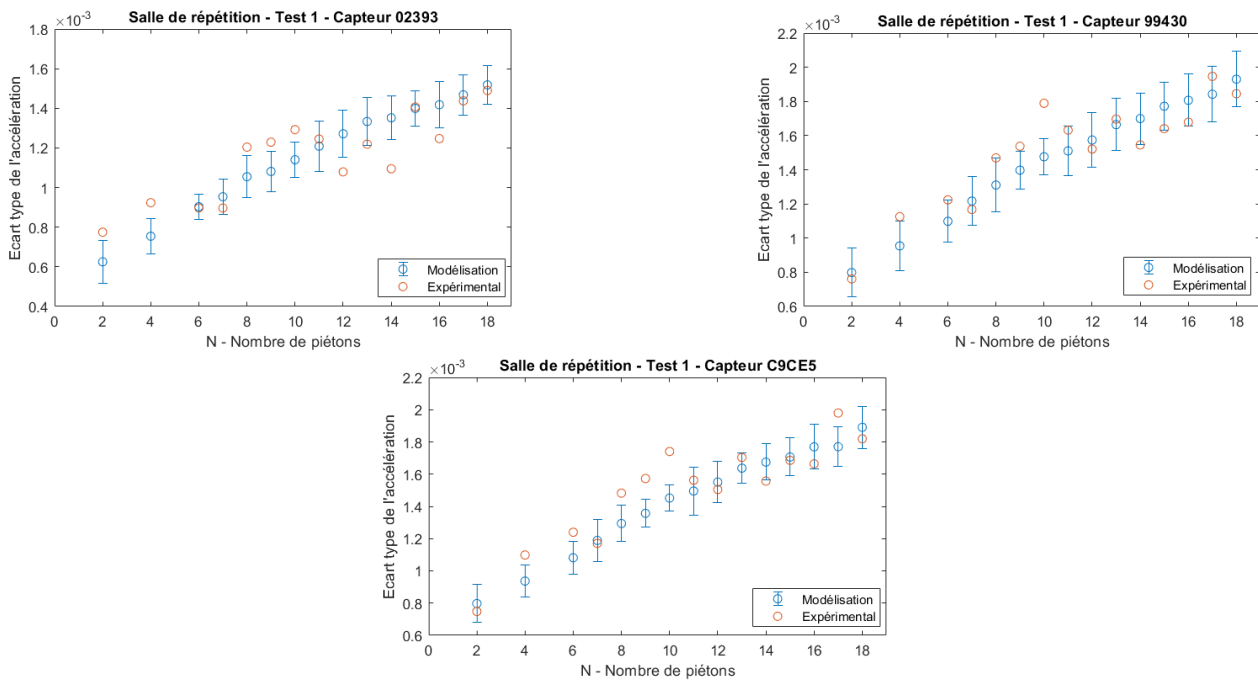


FIGURE A.44 – Salle de répétition - Test 1 - Superposition des écarts types numériques et expérimentaux

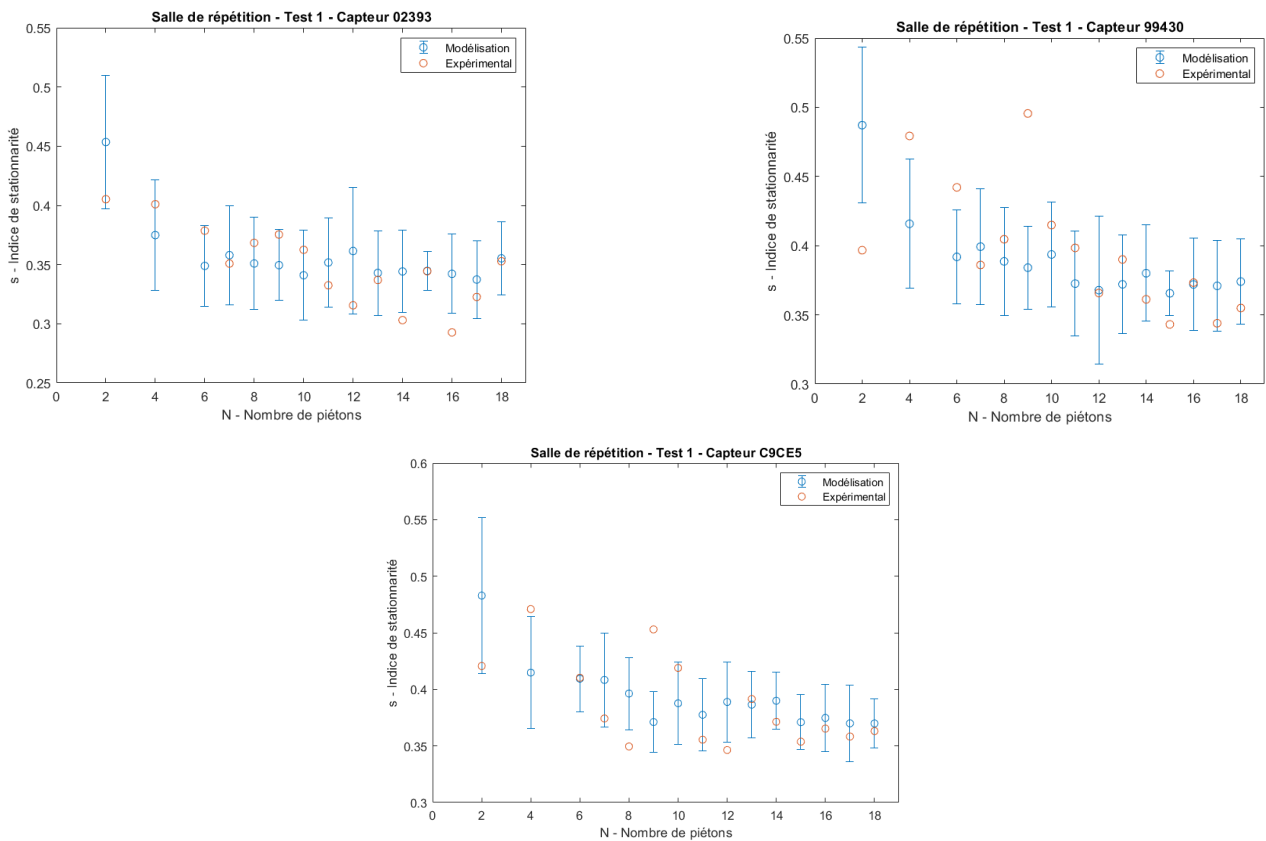


FIGURE A.45 – Salle de répétition - Test 1 - Superposition de l'indice de stationnarité numérique et expérimental

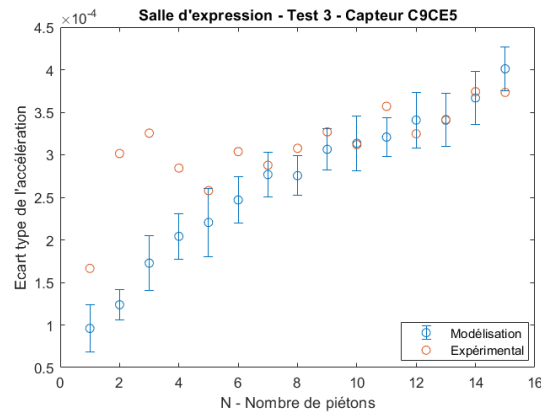
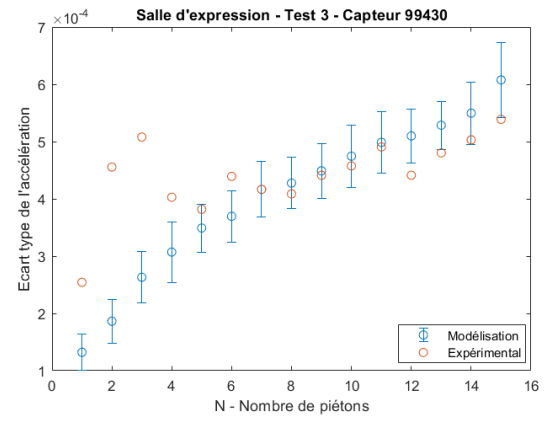
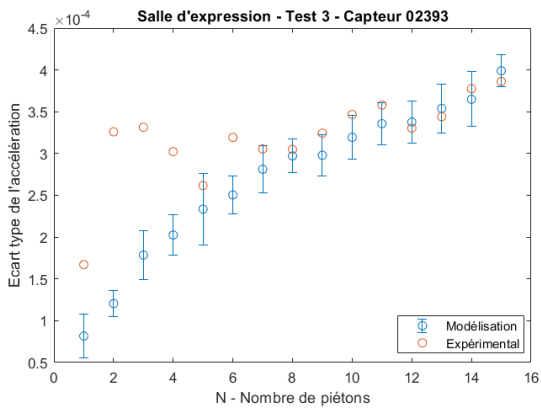


FIGURE A.46 – Salle de répétition - Test 3 - Superposition des écarts types numériques et expérimentaux

## A.6 Effet de la fréquence sur l'indice de stationnarité

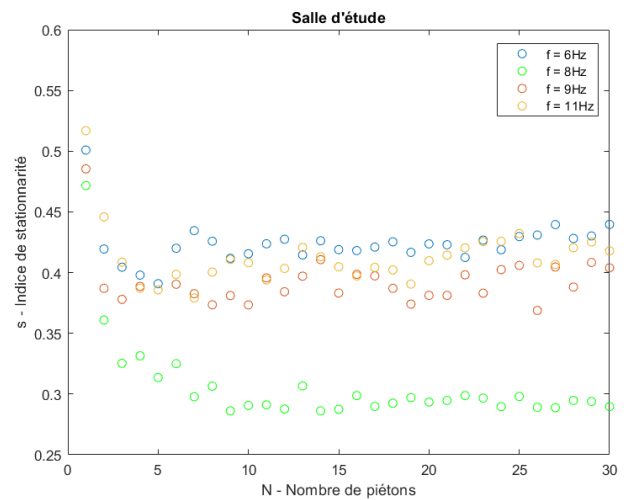
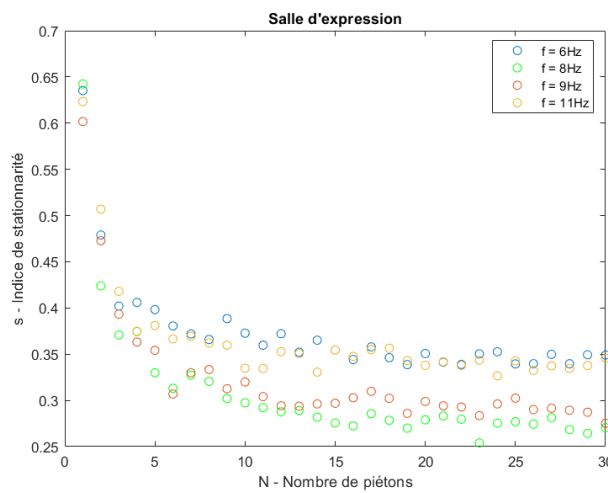


FIGURE A.47 – Effet de la fréquence propre

---

# Bibliographie

1. Bachmann, H. et Ammann, W., *Vibrations in structures - Induced by man and machines*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Zürich, 1987.
2. Bodgi, J. (s. d.). *Pedestrian-structure synchronisation : Application to swaying footbridges*.
3. Clough, R. et Penzien, J., *Dynamics of structures (Third Edition)*, Computers & Structures, Inc, USA, 2003.
4. Costa, C. D. (s. d.). *Identification of pedestrian loads on a very flexible footbridge*.
5. Demartino, C., Avossa, A. M., & Ricciardelli, F. (2018). Deterministic and Probabilistic Serviceability Assessment of Footbridge Vibrations due to a Single Walker Crossing. *Shock and Vibration*, 2018, 1 26. <https://doi.org/10.1155/2018/1917629>
6. Denoël, V., *Analyse des Structures II*, 2017.
7. Dong, J.-K., & Ye, M. (2023). Design for Random Response of Structures Subject to Rhythmic Crowd Loading. *Buildings*, 13(4), 1085. <https://doi.org/10.3390/buildings13041085>
8. El Asri, Y., Lukić, M., Hjaaj, M., Couchaux, M., & Denoël, V. (2023). Identification of a load model for crowd-rhythmic activities based on acceleration measurements of a building floor. *Structures*, 50, 1980 1993. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.02.083>
9. Gholampour, A. A., & Ghassemieh, M. (2012). New Practical Approach to Nonlinear Dynamic Analysis of Structures : Refinement of Newmark's and Wilson's Classical Methods. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 17(1), 30 34. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000101](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000101)
10. HIVOSS. *Vibration Design of Floors - Guideline*, 2007.
11. Huysmans, E., *Comportement dynamique et étude de confort des planchers mixtes*, Université de Liège, 2019.
12. Lemay, F., *Étude du chargement piétonnier sur passerelles piétonnières*, Université de Sherbrooke, Janvier 2012.
13. Mikael, A. (s. d.). *Evaluation des paramètres physiques des bâtiments : Amortissement, fréquence et modes de comportement des structures de génie civil : Approche expérimentale*.
14. Nguyen, H. A. T. (s. d.). *VIBRATIONS OF A LOW-FREQUENCY FLOOR UNDER VARIOUS PEDESTRIAN LOADING SCENARIOS*.
15. Nimmen, K. V. (s. d.). *Numerical and experimental study of human-induced vibrations of footbridges*.

- 
16. Pécol, P., *Modélisation 2D discrète du mouvement des piétons Application à l'évacuation des structures du génie civil et à l'interaction foule-passerelle*, Université Paris-est, Décembre 2011.
  17. Piccardo, G., & Tubino, F. (2012). Equivalent spectral model and maximum dynamic response for the serviceability analysis of footbridges. *Engineering Structures*, 40, 445-456. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.005>
  18. Rainer, J. H., & Pernica, G. (s. d.). *VERTICAL DYNAMIC FORCES FROM FOOTSTEPS*.
  19. Sétra. *Footbridges - Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading – Practical Guidelines*, Paris, October 2006.
  20. Tubino, F., & Piccardo, G. (2011). *A spectral model for pedestrian loading of footbridges*.
  21. Van Nimmen, K., Lombaert, G., De Roeck, G., & Van Den Broeck, P. (2014). Vibration serviceability of footbridges : Evaluation of the current codes of practice. *Engineering Structures*, 59, 448-461. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.11.006>
  22. Wang, J., Chen, J., Yokoyama, Y., & Xiong, J. (2020). Spectral Model for Crowd Walking Load. *Journal of Structural Engineering*, 146(3), 04019220. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002514](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002514)

# Table des figures

1.1	Relation entre la vitesse du pas, la fréquence et la foulée par Bachmann & Ammann, 1987 . . . . .	3
1.2	Fonction de temps de chargement lors d'un pas par Bachmann & Ammann, 1987	4
1.3	Force de marche d'un piéton isolé par Chen, 2020 . . . . .	5
1.4	Force de marche d'une foule par Chen, 2020 . . . . .	5
1.5	Évolution du facteur de réduction de foule par Dong & Ye, 2023 . . . . .	5
2.1	Capteur & socle . . . . .	9
2.2	Test préliminaire - Disposition des capteurs dans la bibliothèque . . . . .	11
2.3	Axe logarithmique . . . . .	11
2.4	Axe cartésien . . . . .	11
2.5	Tests préliminaires - Distribution des planchers . . . . .	13
2.6	Traitement des données brutes . . . . .	16
2.7	Écart type des signaux expérimentaux en fonction de la proportion tronquée . .	17
2.8	Bibliothèque - Comparaison des méthodes de troncature . . . . .	23
2.9	Classe - Comparaison des méthodes de troncature . . . . .	23
2.10	Effet de la taille de la fenêtre sur l'indice de stationnarité . . . . .	24
2.11	Effet du troncage pour une taille de fenêtre donnée sur l'indice de stationnarité .	25
2.12	Classe - Plan annoté . . . . .	28
2.13	Configuration de la classe . . . . .	28
2.14	Classe - Contenu fréquentiel . . . . .	28
2.15	Classe - Évolution de l'écart type du signal en fonction du nombre de piétons . .	29
2.16	Classe - Indice de stationnarité moyen . . . . .	30
2.17	Bibliothèque - Plan annoté . . . . .	31
2.18	Configuration de la bibliothèque . . . . .	31
2.19	Bibliothèque - Contenu fréquentiel . . . . .	32
2.20	Bibliothèque - Évolution de l'écart type du signal en fonction du nombre de piétons	33
2.21	Bibliothèque - Formes des modes . . . . .	33
2.22	Bibliothèque - Indice de stationnarité moyen . . . . .	34
2.23	Salle d'étude - Plan annoté . . . . .	35
2.24	Configuration de l'étude . . . . .	35
2.25	Salle d'étude - Contenu fréquentiel . . . . .	36
2.26	Salle d'étude - Évolution de l'écart type du signal en fonction du nombre de piétons . . . . .	37
2.27	Salle d'étude - Modes de vibrations . . . . .	38
2.28	Salle d'étude - Indice de stationnarité moyen . . . . .	39



---

2.29	Salle d'expression - Plan annoté . . . . .	40
2.30	Salle d'expression . . . . .	40
2.31	Salle d'expression - Contenu fréquentiel . . . . .	41
2.32	Salle d'expression - Évolution de l'écart type du signal en fonction du nombre de piétons . . . . .	42
2.33	Salle d'expression - Modes de vibrations . . . . .	43
2.34	Salle d'expression - Indice de stationnarité moyen . . . . .	44
2.35	Salle de répétition - Plan annoté . . . . .	45
2.36	Salle de répétition . . . . .	45
2.37	Salle de répétition - Contenu fréquentiel . . . . .	46
2.38	Salle de répétition - Évolution de l'écart type du signal en fonction du nombre de piétons . . . . .	47
2.39	Salle de répétition - Modes de vibrations . . . . .	48
2.40	Salle de répétition - Indice de stationnarité moyen . . . . .	49
3.1	Modélisation du déplacement d'un piéton . . . . .	53
3.2	Signal type obtenu numériquement . . . . .	56
3.3	Déplacement type total obtenu numériquement . . . . .	56
3.4	Déplacement type obtenu numériquement uniquement sous sollicitation de la marche . . . . .	56
3.5	Salle d'étude - Signal numérique . . . . .	59
3.6	Effet de N sur le contenu fréquentiel . . . . .	60
3.7	Bibliothèque - Effet du filtre . . . . .	61
3.8	Salle d'étude - Effet du filtre . . . . .	62
3.9	Salle d'étude - Superposition des écarts types numériques et expérimentaux . . .	63
3.10	Salle d'étude - Superposition de l'indice de stationnarité numérique et expérimental	64
3.11	Salle d'expression - Effet du filtre . . . . .	65
3.12	Salle d'expression - Superposition des écarts types numériques et expérimentaux	66
3.13	Salle d'expression - Effet de $\xi$ . . . . .	67
3.14	Indice de stationnarité - 3 modes de vibrations considérés . . . . .	67
3.15	Indice de stationnarité - 1 mode de vibration considéré . . . . .	68
3.16	Salle de répétition - Effet du filtre . . . . .	69
3.17	Salle de répétition - Superposition des écarts types numériques et expérimentaux	70
3.18	Salle de répétition - Test 3 - Discontinuité observée dans l'indice de stationnarité	71
3.19	Salle de répétition - Superposition de l'indice de stationnarité numérique et expérimental . . . . .	71
3.20	Évolution de s selon les différentes configurations . . . . .	72
3.21	Effet de la période de marche . . . . .	73
3.22	Effet de la fréquence propre . . . . .	74
3.23	Effet de l'amortissement dynamique . . . . .	74
3.24	Effet de la masse modale . . . . .	75
3.25	Effet de l'augmentation des dimensions . . . . .	75
3.26	Effet d'une diminution des dimensions . . . . .	76
3.27	Effet de la proportion $\beta$ . . . . .	77
4.1	Évolution de l'indice de stationnarité pour un plancher standard . . . . .	80

---

A.1	Rez & 1er étage . . . . .	82
A.2	2ème & 3ème étage . . . . .	83
A.3	Bâtiment A - Niveau 0 . . . . .	84
A.4	Bâtiment A - Niveau 1 . . . . .	85
A.5	Bâtiment A - Niveau 2 . . . . .	86
A.6	Bâtiment A - Niveau 3 . . . . .	87
A.7	Bâtiment A - Extension . . . . .	88
A.8	Bâtiment B . . . . .	89
A.9	Bâtiment 1 . . . . .	90
A.10	Bâtiment 2 . . . . .	91
A.11	2ème étage - 204 [A.2] . . . . .	92
A.12	3ème étage - 304 [A.2] . . . . .	92
A.13	2ème étage - 216 UD [A.2] . . . . .	92
A.14	Rez de chaussée - Salle orange [A.1] . . . . .	92
A.15	Bâtiment A - Niveau 1 - 1.07 [A.4] . . . . .	92
A.16	Bâtiment A - Niveau 1 - 1.08 [A.4] . . . . .	92
A.17	Bâtiment A - Niveau 2 - 2.07 [A.5] . . . . .	93
A.18	Bâtiment A - Niveau 2 - 2.08 [A.5] . . . . .	93
A.19	Bâtiment A - Niveau 2 - 2.09 [A.5] . . . . .	93
A.20	Bâtiment A - Niveau 2 - 2.25 [A.5] . . . . .	93
A.21	Bâtiment A - Niveau 2 - 2.35 [A.5] . . . . .	93
A.22	Bâtiment A - Niveau 2 - 2.36 [A.5] . . . . .	93
A.23	Bâtiment A - Niveau 2 - 2.44 [A.5] . . . . .	94
A.24	Bâtiment A - Niveau 2 - 2.14 [A.5] . . . . .	94
A.25	Bâtiment A - Extension - Salle de cours [A.7] . . . . .	94
A.26	Bâtiment B - Extension - Expression [A.8] . . . . .	94
A.27	Bâtiment A - Extension - Répétition [A.7] . . . . .	94
A.28	Bâtiment 1 [A.9] - Salle des professeurs . . . . .	95
A.29	Bâtiment 1 [A.9]- Salle d'informatique . . . . .	95
A.30	Bâtiment 2 [A.10]- Salle polyvalente . . . . .	95
A.31	Bâtiment 2 [A.10]- Cafétéria . . . . .	95
A.32	Classe - Effet du troncage sur l'indice de stationnarité . . . . .	97
A.33	Salle d'expression - Effet du troncage sur l'indice de stationnarité . . . . .	97
A.34	Salle de répétition - Effet du troncage sur l'indice de stationnarité . . . . .	98
A.35	Étude - Effet du troncage sur l'indice de stationnarité . . . . .	98
A.36	Étude - Test 2 - Superposition des écarts types numériques et expérimentaux . .	103
A.37	Étude - Test 2 - Superposition de l'indice de stationnarité numérique et expérimental	103
A.38	Étude - Test 3 - Superposition des écarts types numériques et expérimentaux . .	104
A.39	Étude - Test 3 - Superposition de l'indice de stationnarité numérique et expérimental	104
A.40	Salle d'expression - Test 2 - Superposition des écarts types numériques et expérimentaux	105
A.41	Salle d'expression - Test 2 - Superposition de l'indice de stationnarité numérique et expérimental . . . . .	105
A.42	Salle d'expression - Test 3 - Superposition des écarts types numériques et expérimentaux	106
A.43	Salle d'expression - Test 3 - Superposition de l'indice de stationnarité numérique et expérimental . . . . .	106

---

A.44	Salle de répétition - Test 1 - Superposition des écarts types numériques et expérimentaux . . . . .	107
A.45	Salle de répétition - Test 1 - Superposition de l'indice de stationnarité numérique et expérimental . . . . .	107
A.46	Salle de répétition - Test 3 - Superposition des écarts types numériques et expérimentaux . . . . .	108
A.47	Effet de la fréquence propre . . . . .	108

# Liste des tableaux

1.1	Comparaison du coefficient d'amortissement . . . . .	2
1.2	Amplitude de Fourier . . . . .	3
2.1	Ensemble des données récoltées sur les différents planchers . . . . .	12
2.2	Valeur des tailles de fenêtre suivant les caractéristiques des planchers . . . . .	20
2.3	Tailles de fenêtres définitives . . . . .	26
2.4	Classe - Masses des piétons suivant l'ordre de passage [N] . . . . .	27
2.5	Bibliothèque - Masses des piétons suivant l'ordre de passage [N] . . . . .	31
2.6	Salle d'étude - Masses des piétons suivant l'ordre de passage [N] . . . . .	35
2.7	Salle d'expression - Masses des piétons suivant l'ordre de passage [N] . . . . .	40
2.8	Salle de répétition - Masses des piétons suivant l'ordre de passage [N] . . . . .	45
3.1	Amplitude de Fourier - Bachmann & Ammann, 1987 . . . . .	57
3.2	Vitesses et fréquences d'un piéton - Bachmann & Ammann, 1987 . . . . .	57
3.3	Coefficient d'amortissement - Denoël, 2017 . . . . .	58
3.4	Salle d'étude - Paramètres de modélisation . . . . .	62
3.5	Salle d'expression - Paramètres de modélisation . . . . .	66
3.6	Salle d'expression - Paramètres de modélisation . . . . .	69