



INSTITUT  
TECHNOLOGIQUE

**CODIFAB**

Développement des Industries Françaises  
de l'Ameublement et du Bois

# Accompagnement des professionnels pour la loi LOM - Année 2022



# Sommaire

<b>Introduction &amp; contexte</b> .....	<b>3</b>
1 Contexte.....	3
2 Problématique .....	3
2.1 Réponse d'un bâtiment à des vibrations – aspects mathématiques .....	4
2.1.1 Vibrations agissant le long des parois (type vent) .....	4
2.1.2 Vibrations agissant via les fondations (type tram, train, métro) .....	5
2.2 Particularité du comportement mécanique des structures bois .....	6
2.3 Application à la construction bois .....	6
3 Objectifs et démarches .....	6
<b>Mesure in situ</b> .....	<b>7</b>
4 Objectifs et problématiques des essais in situ .....	7
5 Présentation des chantiers.....	7
6 Mise en place des mesures .....	8
7 Résultats et analyses .....	10
7.1 Analyse temporelle .....	10
7.2 Analyse fréquentielle .....	12
7.3 Comparaison avec les accélérations admissibles (ISO 10-137) .....	14
7.4 Mesures de l'intensité du vent .....	15
7.5 Conclusion des essais in situ .....	17
<b>Mesures en laboratoire sur maquette taille réelle</b> .....	<b>18</b>
8 Objectifs et problématique des essais sur la maquette AdivBois .....	18
9 Présentation de la maquette.....	18
10 Mise en place des mesures .....	22
11 Résultats et analyse.....	25
11.1 Essais au marteau d'impact .....	25
11.2 Vibrations provoquées par une machine à laver .....	27
11.3 Essais machine à choc.....	29
11.4 Essais au ballon d'impact .....	31
11.5 Essais au compacteur .....	31
11.6 Conclusions sur les résultats de la maquette .....	35
12 Simulation de la maquette AdivBois .....	35
12.1 Présentation du modèle numérique.....	35
12.2 Description des matériaux .....	35
12.3 Résultats et comparaison avec les mesures .....	36
12.4 Conclusion et perspectives pour le modèle numérique.....	39
<b>Avancée de la réglementation</b> .....	<b>40</b>
13 Résumé des travaux sur les risques de dommages .....	40
14 Présentation du draft pour la perception des gênes tactiles .....	41
15 Prochaines étapes.....	42

# Introduction & contexte

## 1 Contexte

La loi d'orientation des mobilités (loi LOM) vise à repenser la mobilité dans un contexte national. En particulier, l'article 91 concerne les vibrations induites par les transports et les chantiers sur les bâtiments.

« Les nuisances générées par les vibrations que la réalisation ou l'utilisation des infrastructures de transport ferroviaire provoquent aux abords de celles-ci font l'objet d'une évaluation et de la détermination d'une unité de mesure spécifique. »

En 2021, il s'agissait de définir des classes de résistances des différentes typologies de bâtiments pour définir des seuils maximaux de vitesses particulières admissibles causées par des vibrations du point de vue résistance et confort.

Une problématique spécifique concerne les constructions bois compte tenu du faible retour d'expérience. Initialement, la décision du groupe de travail était de classer les bâtiment bois de deux étages ou plus en « hors catégories » ce qui nécessiterait une étude spécifique pour tout logement situé proche de la voie ferrée ou de zones de construction lourdes. L'objectif de cette action est de représenter la filière bois dans ce groupe de travail et d'apporter les éléments techniques nécessaires pour pouvoir définir une classe de résistance adaptée pour les constructions bois.

Lors de la participation au comité de rédaction, le FCBA est parvenu à retirer le classement des constructions bois moyenne hauteur en « constructions nécessitant une étude spécifique » vis-à-vis du risque de dommages. Les édifices bois allant de 2 à 6 étages sont considérés de la même manière que les édifices réalisés avec les autres matériaux.

En 2022, les avancées sur la réglementation ont principalement concerné la notion de gêne tactile. Lors d'une sollicitation extérieure, les vibrations peuvent induire une gêne chez les occupants des bâtiments, même s'il n'y a pas de risque de dommages. Cette gêne peut se caractériser par une sensation de mal de mer si les sollicitations sont à basses fréquences (par exemple oscillations dus au vent dans un bâtiment grande hauteur ou une passerelle) ou une fatigue musculaire dans le cas de signaux de forte fréquence.

## 2 Problématique

La construction bois prend une place de plus en plus importante dans le panorama architectural. La construction bois est une réponse aux enjeux climatiques mais elle présente néanmoins certaines spécificités.

L'écriture de la loi LOM se fait dans un climat de relative défiance vis-à-vis des structures bois et de leur comportement supposé vis-à-vis des vibrations extérieures. En 2019 est paru le document : « médiation relative aux nuisances générées par les TGV auprès des riverains des lignes Bretagne-Pays-de-la-Loire et Sud-Europe-Atlantique » [1]. Parmi les recommandations faites aux collectivités, certaines sont clairement dirigés en défaveur des solutions bois :

« Le phénomène de vibration par le sol peut être amplifié par certaines structures de bâtiment (ossature bois). Lors du classement des LGV (article L.571-10 du code de l'environnement), la mission recommande que les préfets de département informent les communes de tels phénomènes pour interdire ce type de construction dans les plans locaux d'urbanisme aux abords des LGV dans les zones recensées à risque vibratoire. »

Néanmoins certaines justifications sont discutables :

« Une fois transmises par le sol, ces vibrations peuvent être amplifiées par certaines structures des bâtiments (notamment les structures en bois), lorsque la fréquence de la vibration correspond à la fréquence propre du matériau récepteur. »

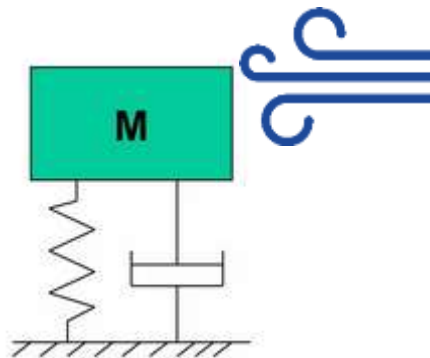
## 2.1 Réponse d'un bâtiment à des vibrations – aspects mathématiques

Pour en discuter, un rappel de physique. Le bois est le matériau de construction ayant le module rapport raideur/poids. Cela conduit à des bâtiments beaucoup plus légers que ceux en béton. Simplifions le problème et représentons le bâtiment par un système simple : un oscillateur un degré de liberté. Il est caractérisé par 3 grandeurs : sa masse  $m$ , sa raideur  $k$  et son amortissement  $c$  qui caractérise sa capacité à dissiper la vibration dans le temps. Un bloc d'acier aura un amortissement très faible tandis que du caoutchouc souple sera très amortissant.



Deux cas de figure sont à étudier dans le cas de problématiques de vibration : soit les efforts agissent au niveau des parois des bâtiments (vent, souffle), soit les vibrations sont transmises par le sol, dans ce cas elles viennent mettre en mouvement les fondations du bâtiment. Les développements mathématiques présentés ci-après sont volontairement simplifiés pour présenter le concept physique sans pour autant alourdir la lecture.

### 2.1.1 Vibrations agissant le long des parois (type vent)



Dans le cas d'un effort agissant le long des parois, la masse du bâtiment va avoir un effet important. Le principe fondamental de la dynamique nous donne l'équation suivante :

$$ma(t) + cv(t) + kx(t) = F(t)$$

Avec  $a$ ,  $v$ ,  $x$  respectivement l'accélération, la vitesse et le déplacement de la masse et  $F(t)$  la force due au vent. En supposant que la force due au vent est sinusoïdale et harmonique (sollicite une pulsation particulière  $\omega$ ), on peut écrire la sollicitation :

$$F(t) = F \sin(\omega t)$$

Dans ce cas, la résolution de l'équation de la dynamique donne le déplacement suivant :

$$x(t) = \frac{F}{m} \cdot DAF \cdot \sin(\omega t)$$

Le *DAF* correspond au Dynamic Amplification Factor, qui caractérise l'amplification de la réponse lorsque la sollicitation est proche de la fréquence de résonance de la structure. Si l'amortissement est nul, le *DAF* tend vers l'infini à la fréquence de résonance. Sinon, il tend vers un scalaire nommé facteur de qualité  $Q = 1/2\xi$ .

$$DAF = \frac{1}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\xi\omega\omega_0)^2}}$$

Avec  $\omega_0$  la pulsation propre de la structure et  $\xi$  le coefficient d'amortissement.

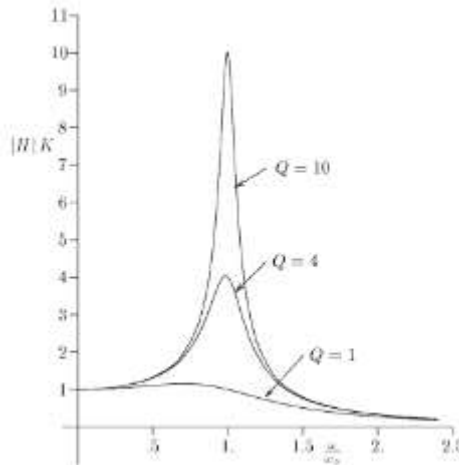
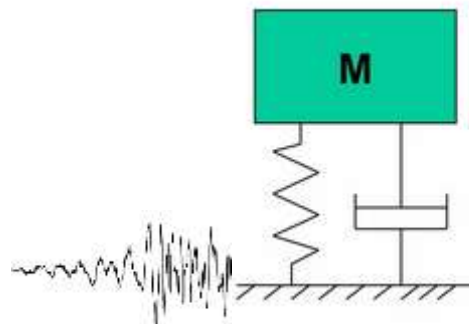


Figure 1 - *DAF* en fonction du rapport  $\omega/\omega_0$ . Le facteur de qualité  $Q$  dépend de l'amortissement ( $Q = 1/2\xi$ )

L'information à retenir est que dans ce cas de figure, la vibration ressentie est directement proportionnelle à la masse du bâtiment (par le coefficient  $F/m$ ). Les bâtiments bois étant plus légers, les vibrations induites par des sollicitations de type vent seront plus importantes. Dans ce cas, il peut être utile de modifier la forme de la structure pour limiter la force  $F$  appliquée par le vent et d'optimiser l'amortissement pour avoir un *DAF* le plus faible possible.

## 2.1.2 Vibrations agissant via les fondations (type tram, train, métro)



Dans ce cas les vibrations sont directement transmises par le sol avec une accélération  $a_0$ . Dans ce cas, l'équation du principe fondamentale de la dynamique s'écrit de la façon suivante :

$$ma(t) + cv(t) + kx(t) = ma_0(t)$$

Si l'on considère que l'accélération suit une loi du type  $a_0 = A \cdot \sin(\omega t)$ , alors la solution de cette équation peut alors s'écrire :

$$x(t) = A \cdot DAF \cdot \sin(\omega t)$$

Avec  $A$  qui ne dépend que de l'intensité du signal d'entrée, et pas de la masse de la structure. Le raisonnement est le même quel que soit le type de signal de vibration transmis en pied. Dans ce cas, la masse du bâtiment n'intervient

pas dans l'équation. La seule chose sur lequel il est possible de jouer est le facteur DAF, qui dépend de la fréquence propre du bâtiment ainsi que son amortissement.

## 2.2 Particularité du comportement mécanique des structures bois

Les bâtiments à dominante bois ont tendance à être plus léger mais aussi plus souple que les autres types de bâtiments. Comme expliqué précédemment, leur légèreté est un inconvénient vis-à-vis des vibrations induites par le vent : les déplacements causés par le vent sont inversement proportionnels à la masse du bâtiment.

Les bâtiments bois sont donc plus sensibles aux chargement de vent, mais aussi potentiellement de souffle causé par le passage d'un train à très haute vitesse. A noter qu'une amplitude de déplacement accru signifie potentiellement une gêne pour l'occupant, mais pas nécessaire un risque de dommage accru à la structure. La raideur des constructions en bois étant plus faible, à déplacement égal les contraintes générées par le mouvement sont plus faibles.

Cependant, vis-à-vis des vibrations transmises par le sol, qui sont les principales sources de vibrations visées par le projet de l'article 91 de la LOM, les structures bois ne sont pas particulièrement à risque. La masse ou la raideur n'intervient pas directement dans la réponse dynamique du bâtiment. La fréquence de résonance dépend quant à elle principalement de considération géométrique (hauteur, section) et est peu impacté par le matériau. Enfin, l'amortissement des bâtiments bois est relativement grand [2], du fait du nombre important d'assemblage avec du jeu.

## 2.3 Application à la construction bois

Sur la base d'hypothèses simples, les bâtiments à dominante bois ne semblent pas plus sensibles a priori aux vibrations émises par des sources extérieures que les autres types de bâtiments. La seule exception serait les effets de souffle liée aux trains grandes vitesses.

Au-delà de ces approches très simplifiées, il convient de vérifier plus en détail si ces considérations demeurent exactes. Pour cela, plusieurs essais seront réalisés pour quantifier l'effet des vibrations sur des bâtiments bois représentatifs.

## 3 Objectifs et démarches

FCBA a été commissionné en tant qu'expert construction bois en juillet 2021 pour intervenir dans les discussions autour de la rédaction de la LOM. Les constructions à dominante bois au-delà de R+2 sont encore peu fréquentes en France, mais leur nombre est en constante augmentation. Le groupe rédacteur de la note de synthèse s'interrogeait sur la réponse vibratoire de ce type de bâtiment. FCBA disposait de certains éléments bibliographiques et de simulation, mais dispose de peu de données expérimentales face à ce type de sollicitations.

L'objectif de ce projet est d'accumuler des données de mesure de vibration sur différente typologie de bâtiment à dominante bois. Associées à des modèles numériques, ils permettront de juger de la façon la plus précise le comportement dynamique des bâtiments à dominante bois, afin que les critères de la LOM soient justifiés scientifiquement et non définis a priori.

Durant le projet, des mesures ont été réalisées sur des bâtiments en fin de phase de chantier proche de voies de RER afin de disposer de données représentatives et de se confronter aux difficultés liées à ce type de mesure. Ensuite, la maquette acoustique réalisée dans le cadre des travaux d'AdivBois a été réutilisée dans le cadre de ce projet pour étudier la transmission des vibrations sur un bâtiment bois représentatif dans un environnement contrôlé. Différentes sollicitations, internes ou externes au bâtiment, ont été testées. En parallèle de ces travaux, le FCBA a participé au suivi des notes de synthèse pour la rédaction de l'article 91 de la LOM.

# Mesure in situ

## 4 Objectifs et problématiques des essais in situ

Le but est de démontrer l'aptitude des bâtiments à ossature bois à faire face à un environnement vibratoire causé par les moyens de transport urbains et toutes autres sources de vibrations externes. Pour ce faire, nous avons réalisé des mesures de vibrations ambiantes au sein de bâtiments multi étages à structure bois dans un environnement urbain et durant les heures de pointe là où le trafic est le plus important. Le niveau de vibration enregistré en différents points de la structure nous a permis de préjuger du niveau de confort et de la capacité de dissipation des vibrations du bâtiment. Ce rapport concerne les essais de vibrations sur deux chantiers : Hoya de Woodeum (situé à Issy-Les-Moulineaux) et Arboretum (situé à Nanterre). Ces deux bâtiments se situent en zone urbaine dense et à proximité immédiate (<300m) de voies de RER.

## 5 Présentation des chantiers

L'essai de vibration sur le chantier Hoya par Woodeum est réalisé le 22 Juin 2022. Il est situé à 127 Avenue de Verdun 92130, Issy-Les-Moulineaux. La mesure a été prise pendant les heures de pointe de Réseau Express Régional RER de 17h56 à 18h43. Durant cette période, le passage de 15 RER a été mesuré dont lequel 8 RER vont vers Paris et 7 RER vont vers Versailles. La figure ci-dessous montre le bâtiment sur le chantier qui est composé d'un rez-de-chaussée et de 7 étages, en plus du garage en rez-de-voirie qui est semi-enterré. Le bâtiment est construit en bois massif CLT qui lui permet d'obtenir le label Bâtiment Bas Carbone (BBCA). La figure ci-dessous montre aussi l'alentour du bâtiment, où on peut voir qu'il est assez proche du réseau ferroviaire (distance de 30 m).



Figure 2 - Bâtiment Hoya à Issy les Moulineaux

L'essai suivant est réalisé le 23/06/2022 sur le chantier Arboretum qui est situé à 1 Place des Papeteries, 92000 Nanterre. La mesure a été prise de 10h33 à 11h41. Durant cette période, il y avait 21 RER qui sont passés dont lequel 10 RER vont vers Nanterre et 11 RER vont vers Paris. La figure ci-dessous à gauche montre le chantier Arboretum. La figure à droite montre le réseau ferroviaire qui est assez proche du bâtiment mesuré (distance de 30 m). Dans le rectangle rouge, on voit bien un passage de RER à travers de la vitrine du bâtiment.



Figure 3 - Chantier Arboretum – Intérieur du bâtiment démonstrateur testé

## 6 Mise en place des mesures

Nous avons utilisé les matériels d'essais suivants : deux accéléromètres basse fréquence et haute sensibilité (voir figure ci-dessous), un anémomètre, trois acquisitions Minimus et trois batteries externes.

- Accéléromètre basse fréquence 1
  - Sensibilité de l'axe Z = 4,049 V/m/s<sup>2</sup>
  - Sensibilité de l'axe N = 4,058 V/m/s<sup>2</sup>
  - Sensibilité de l'axe E = 3,987 V/m/s<sup>2</sup>
- Accéléromètre basse fréquence 2
  - Sensibilité de l'axe Z = 4,031 V/m/s<sup>2</sup>
  - Sensibilité de l'axe N = 4,026 V/m/s<sup>2</sup>
  - Sensibilité de l'axe E = 4,017 V/m/s<sup>2</sup>
- Anémomètre
- Système d'acquisition Minimus
  - Rapport entre l'accéléromètre et Minimus = 0,002441
  - Rapport entre la vitesse du vent et Minimus = 391,49
  - Rapport entre la direction du vent et Minimus = 0,0431



Figure 4 : Accéléromètre basse fréquence et haute sensibilité

Les vibrations sont mesurées avec les accéléromètres. Elles sont installées au point le plus haut accessible du bâtiment et en bas du bâtiment (ex : garage). L'accéléromètre est branché sur l'acquisition Minimus qui elle-même est branché sur la batterie et le câble GPS. Toutes les informations sont stockées sur une carte SD. Il est possible d'observer en temps réel les données mesurées via un câble Ethernet (en bleu sur l'image ci-dessous). L'accéléromètre mesure les accélérations dans 3 directions : Z (axe vertical du bâtiment), E (est) et N (nord).



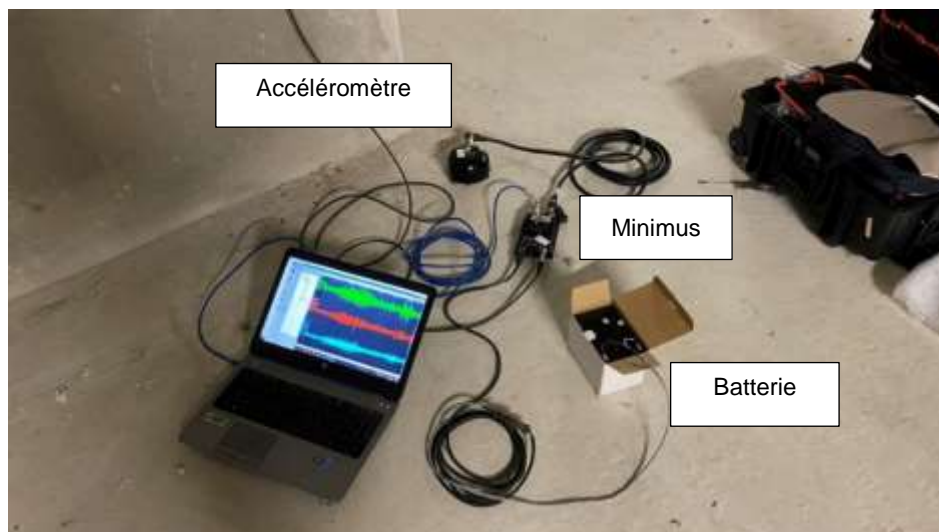


Figure 5 : La mise en place de l'accéléromètre dans la partie garage

La figure ci-dessous montre la même configuration d'essai au dernière étage du bâtiment.

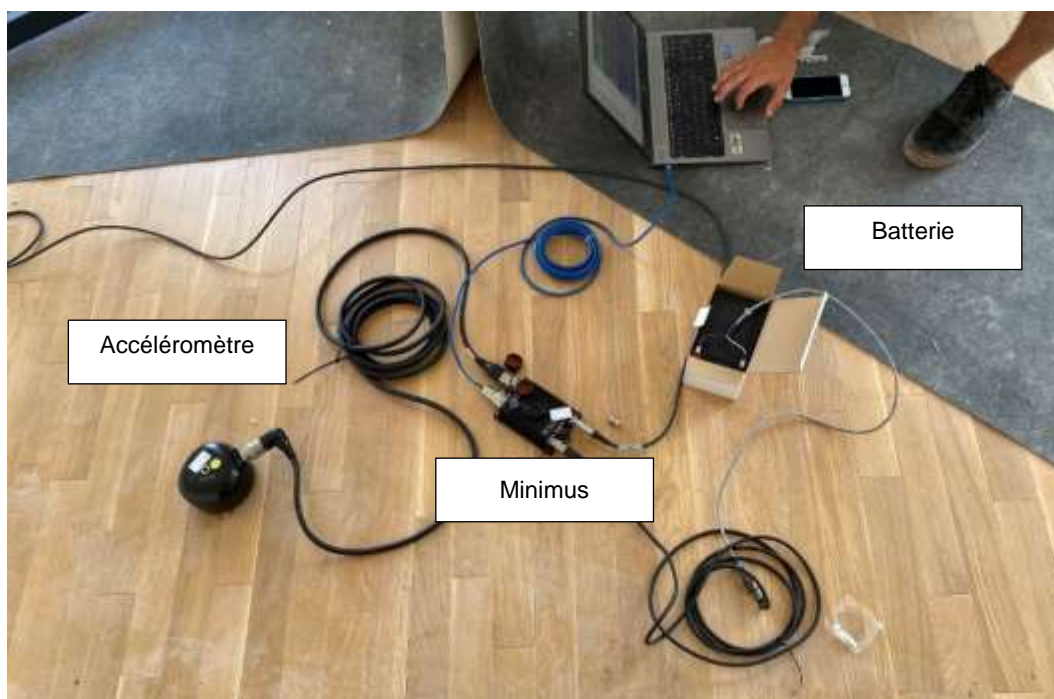


Figure 6 : L'accéléromètre au sommet du bâtiment

Un anémomètre est aussi installé sur le toit du bâtiment pour mesurer la vitesse et la direction du vent (voir figure ci-dessous). Il a la même configuration comme les accéléromètres (la batterie, l'acquisition Minimus et les câbles). Cette mesure de la vitesse du vent permet d'isoler les sources et de vérifier si les vibrations mesurées proviennent de l'activité humaine (RER, voiture, marche) ou du souffle du vent.



Figure 7 : L'anémomètre au sommet du bâtiment

## 7 Résultats et analyses

### 7.1 Analyse temporelle

La vibration est mesurée dans les trois dimensions de l'espace. La plupart des pics de vibrations mesurés sont concomitants avec des passages de RER comme on peut le voir sur la figure 7. Si cela ne présage pas du confort en vibration du bâtiment, il est néanmoins notable que la principale source de vibration ressentie dans le bâtiment Hoya (hors activités des occupants) est le passage des RER.

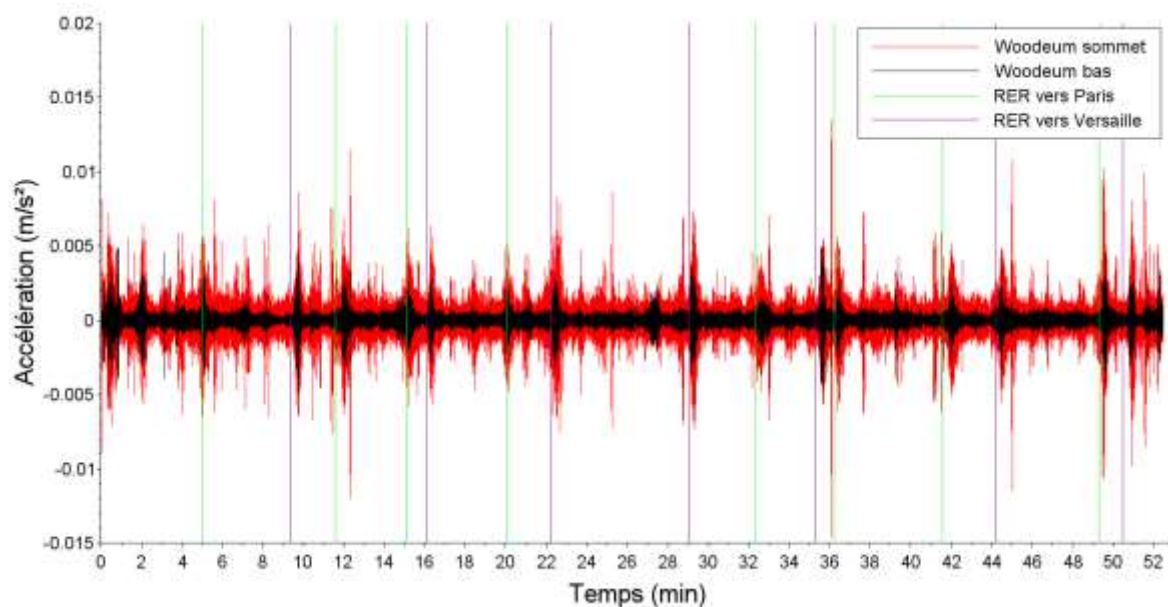


Figure 8 - Accélération dans la direction Z et instant de passage des RER – Bâtiment Hoya

Dans le cas du bâtiment Arboretum, on a mesuré un niveau de vibration de base très haut probablement dus aux activités du chantier. Des pics, relatifs aux vibrations engendré par les RER ne se dégage pas distinctement.

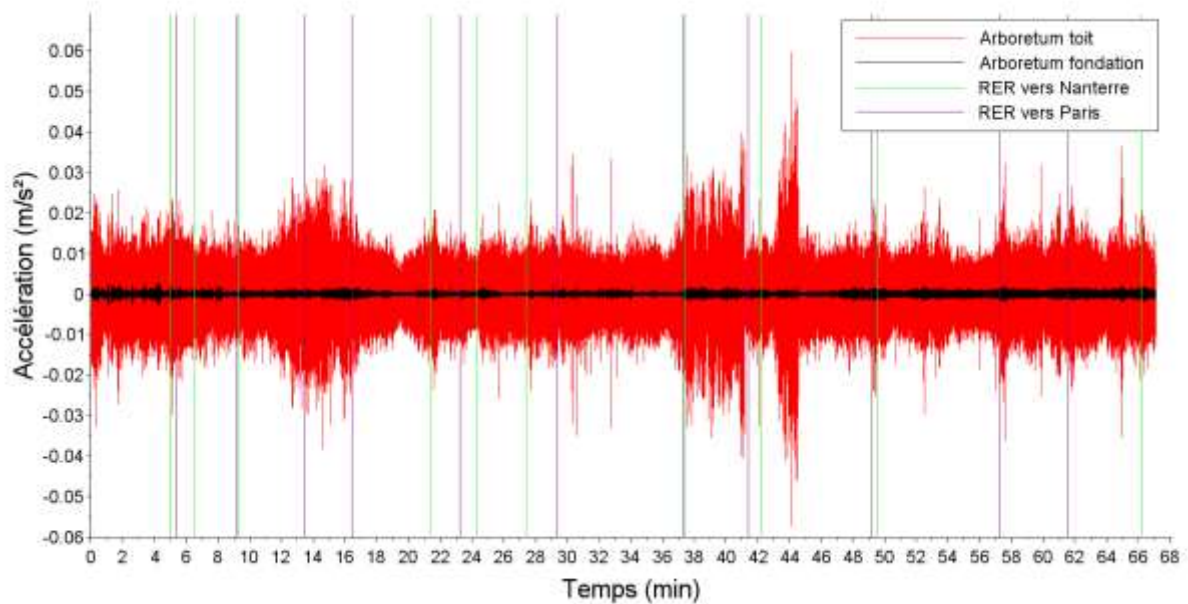


Figure 9 - Accélération dans la direction Z et instant de passage des RER – Bâtiment Arboretum

Les analyses temporelles brutes ne permettent pas de préjuger facilement de la dynamique des bâtiments. Les pics d'amplitude d'accélération très brèves (à très hautes fréquences) vont moins impacter le ressenti des occupants ou la structure du bâtiment que des mouvements de plus faible amplitude pendant une plus longue période. Un outil préconisé par l'ISO 2631 est la valeur efficace (RMS) sur une seconde.

$$a_{RMS} = \frac{1}{T} \int_0^T a(t) dt$$

On obtient une valeur d'accélération par seconde. Cette méthode permet de pondérer l'impact des hautes fréquences et d'obtenir des signaux comparables entre différentes études. Les allures des accélérations efficaces mesurées dans les deux bâtiments sont données sur les figures suivantes :

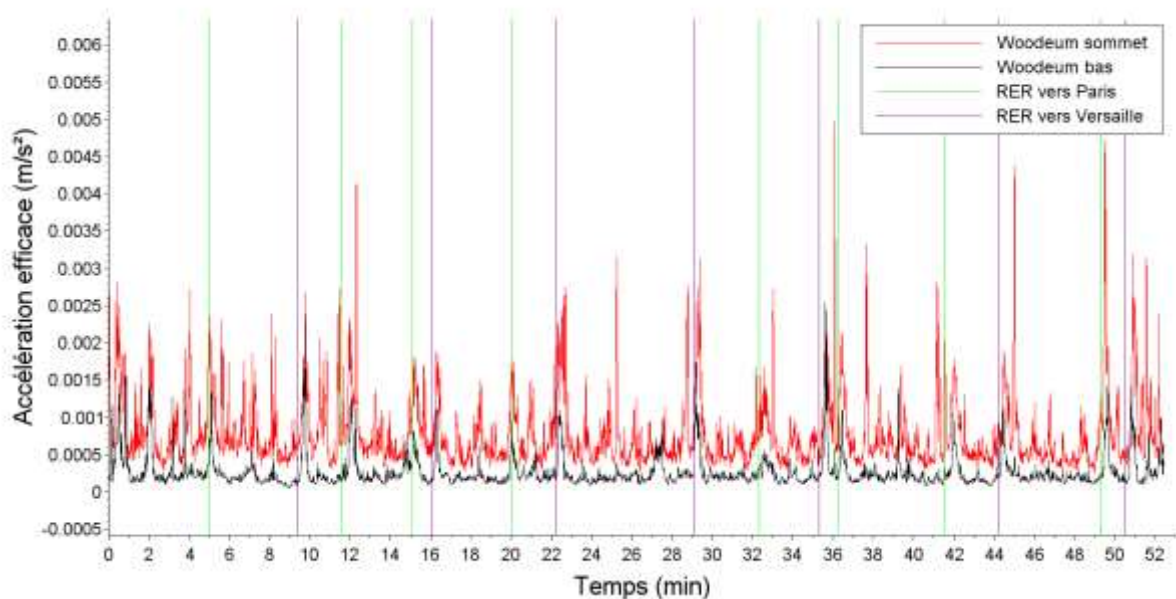


Figure 10 - Accélération efficace - bâtiment Hoya

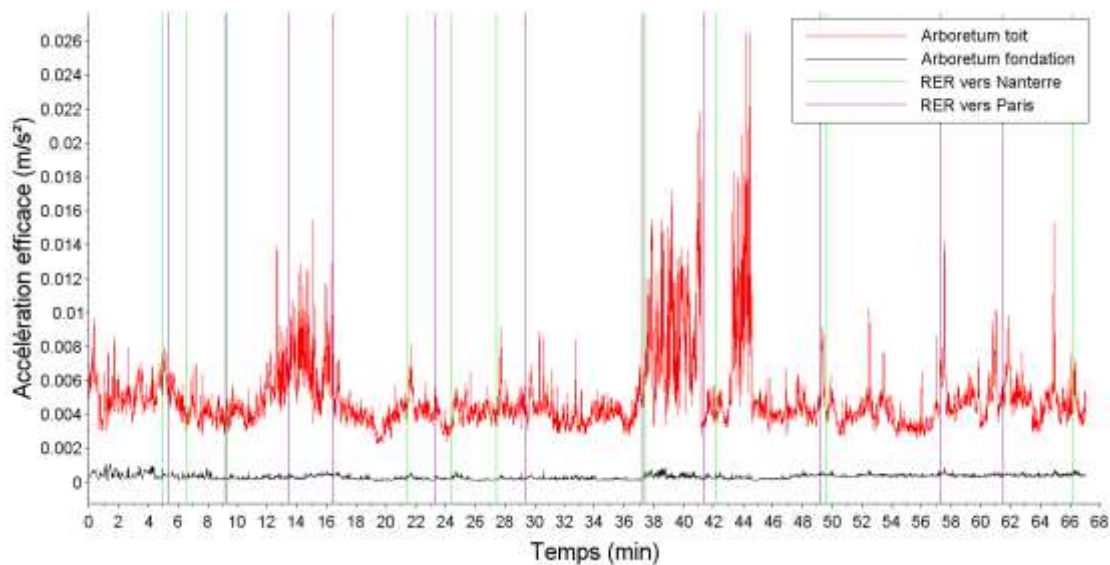


Figure 11 - Accélération efficace - bâtiment Arboretum

Les maximums d'accélération efficaces sont beaucoup plus faibles que les pics d'accélération en bandes fines, et ils correspondent mieux au ressenti des usagers. Dans le cas du bâtiment Hoya, les maximums sont fortement corrélés aux instants de passage de RER. On observe des accélérations de l'ordre de  $2,5 \text{ mm/s}^2$  à chaque passage, avec des pics pouvant monter jusqu'à  $5 \text{ mm/s}^2$ . Dans le cas de l'arboretum, le bruit ambiant est beaucoup plus fort (de l'ordre de  $5 \text{ mm/s}^2$ ) soit de l'ordre des accélérations engendrées par le RER. Nous supposons que le RER n'est pas la première source de vibrations subie par le bâtiment du fait du contexte de chantier et par conséquent, nous focaliserons l'étude sur le bâtiment Hoya.

La tableau ci-dessous regroupe la valeur RMS maximale pour chaque direction. La valeur RMS maximale au sommet est plus grand que celui en bas du bâtiment, ce qui signifie que les signaux sont amplifiés.

Direction	Valeur RMS maximale en bas ( $\text{mm/s}^2$ )	Valeur RMS maximale au sommet ( $\text{mm/s}^2$ )
Z	2,54	4,97
E	0,99	2,36
N	0,974	2,26

Figure 12 - Accélération efficace maximale suivant la direction pour le bâtiment Hoya

## 7.2 Analyse fréquentielle

Il est intéressant de regarder les vibrations dans le domaine fréquentiel. En effet, suivant les fréquences de vibrations de la structure et la fréquence des sollicitations, la réponse dynamique va considérablement varier. Le module de la transformée de Fourier de l'accélération indique les fréquences majoritaires dans la réponse dynamique de la structure, au niveau du rez-de-chaussée et du sommet du bâtiment.

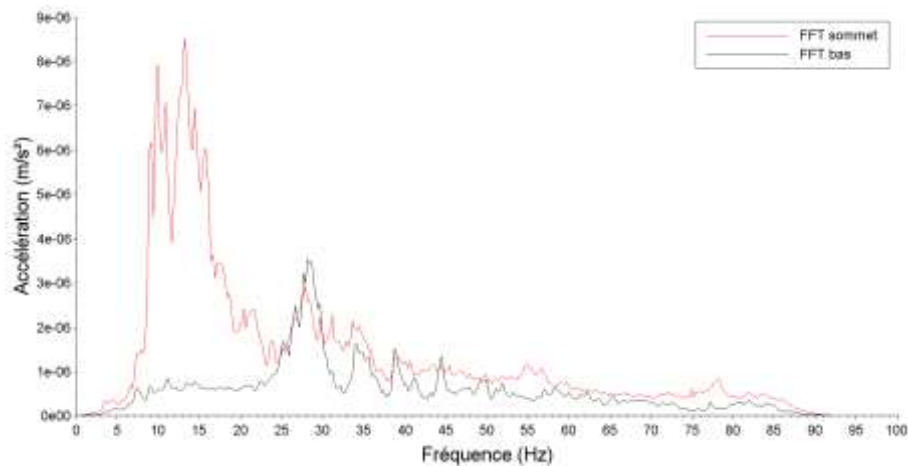


Figure 13 - Module de la transformée de Fourier au rez-de chaussée et au sommet

La FFT au niveau du rez-de-chaussée révèle un pic d'amplitude aux alentours de 28Hz. Au niveau du rez-de-chaussée, on peut supposer que le signal est peu amplifié ou amorti, il est donc révélateur des vibrations engendrées par le RER. Le RER sollicite donc majoritairement les fréquences autour de 28Hz, et à plus faible amplitude la gamme de 10-60Hz.

A l'opposé, la FFT est maximale au sommet de la structure pour des fréquences comprises entre 10 et 15Hz. Il s'agit très probablement des fréquences de résonance de la structure ou d'élément de la structure (plancher, sommier...).

Les FFT illustrées sur la Figure 13 sont calculées à partir de l'ensemble du signal. Cependant, les résultats sont dépendants de sollicitations brèves. Il est alors possible de représenter les composantes fréquentielles sous la forme d'un spectrogramme. Les spectrogrammes temps-fréquence correspondent à une suite de FFT réalisées sur des fenêtres temporelles réduites. La couleur représente l'intensité de la FFT.

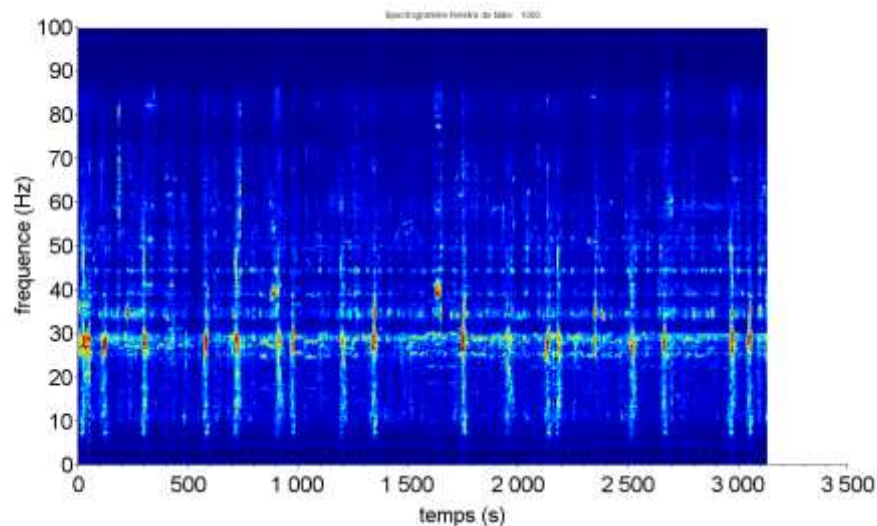


Figure 14 - Spectrogramme temps-fréquence : Accélération au pied du bâtiment

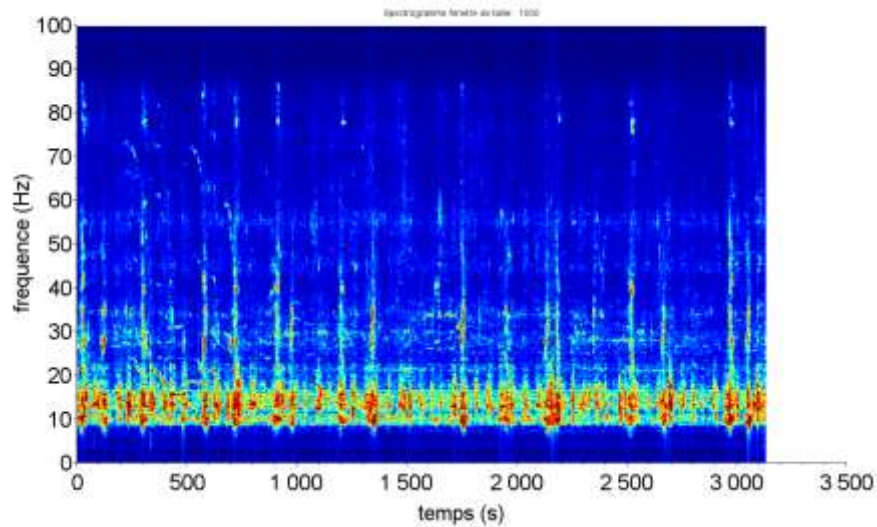


Figure 15 - Spectrogramme temps-fréquence : Accélération au sommet du bâtiment

Les spectrogrammes synthétisent beaucoup d'informations. Deux bandes continues colorées sont observables sur les Figure 14 et Figure 15 à respectivement 28Hz et autour de 13Hz. Dans le cas de l'accélération en partie basse du bâtiment, du fait de la position de l'accéléromètre, il s'agit probablement de l'accélération continue imposée par le trafic routier.

Pour l'accéléromètre en partie haute, l'intervalle de fréquence correspond probablement aux modes de résonance du bâtiment, que ce soit le mode local de vibration des planchers ou le mode de flexion général du bâtiment.

Outre ces éléments, des bandes verticales sont clairement observables et correspondent au passage des RER. Les RER agissent sur le bâtiment sur toute la gamme de 10-50Hz pendant des périodes courtes (-1mn). Ils interagissent particulièrement avec les modes de vibration des planchers.

### 7.3 Comparaison avec les accélérations admissibles (ISO 10-137)

Avec les fréquences trouvées grâce aux résultats fréquentiels et les accélérations efficaces maximales, les résultats pourraient être comparés avec la norme ISO 10-137. D'après la Figure 13, les accélérations maximales relevées sont bien en dessous des recommandations en terme de vibration par des référentiels de l'ISO 10-137. C'est-à-dire que le bâtiment Hoya respecte bien la norme en terme de vibration.

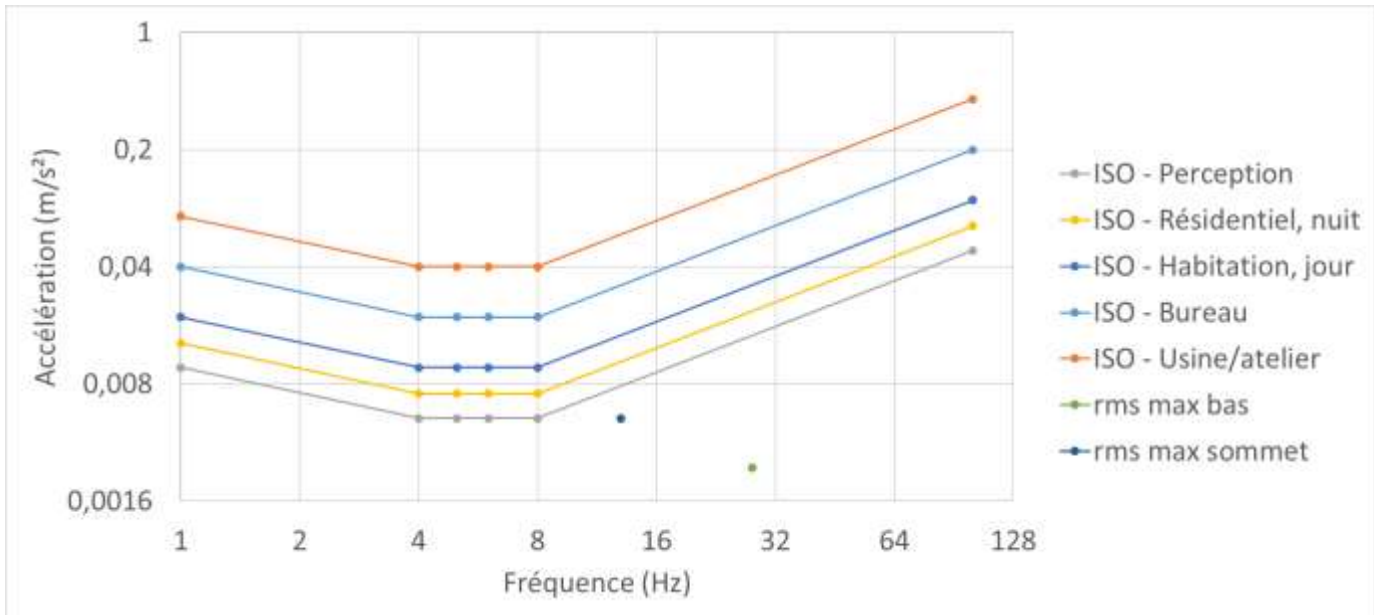


Figure 16 : Comparaison des accélérations mesurées sur le bâtiment Hoya par rapport à la norme ISO 10-137

Pour le bâtiment Arboretum, la Figure 17 compare l'accélération efficace maximale avec la norme ISO 10-137. Cette figure montre que les accélérations maximales sont en-dessous de la norme ISO-Perception. Même avec beaucoup de perturbations autour du bâtiment pendant l'essai, ce bâtiment arrive à toujours respecter la norme en terme de vibration.

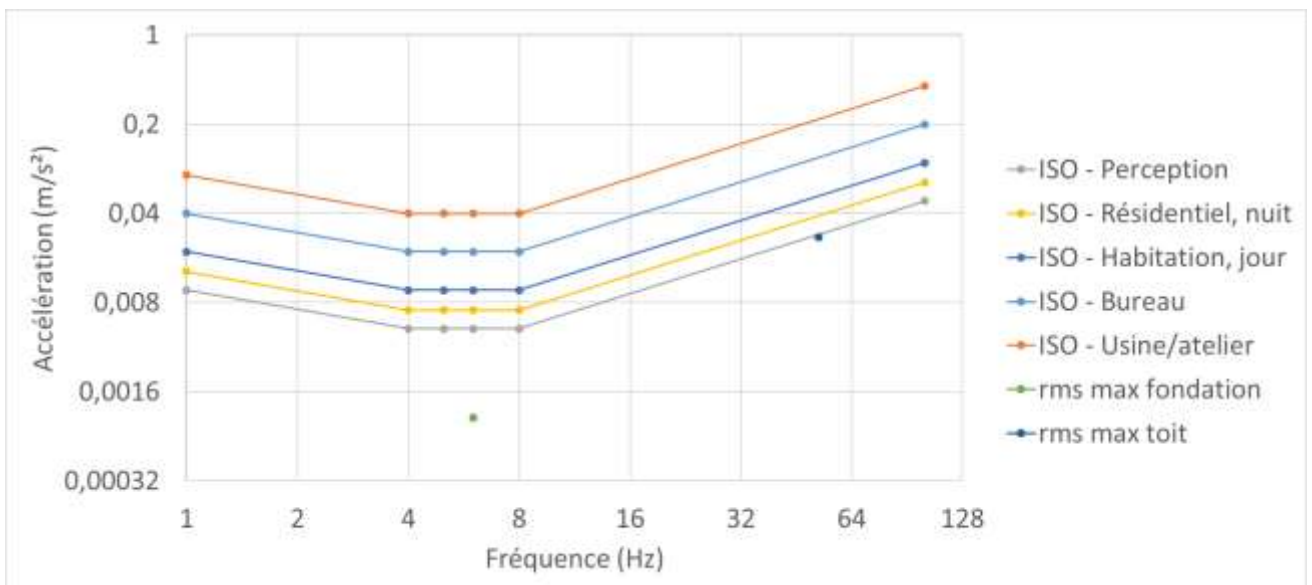


Figure 17 : Comparaison des accélérations mesurées sur le bâtiment Arboretum par rapport à la norme ISO 10-137

## 7.4 Mesures de l'intensité du vent

La mesure sur le toit avec l'anémomètre nous donne deux données importantes : la vitesse et la direction du vent. La figure ci-dessous représente la vitesse du vent au cours de l'essai. La vitesse moyenne du vent est de 2,008 m/s et la vitesse maximale du vent est de 8,465 m/s.

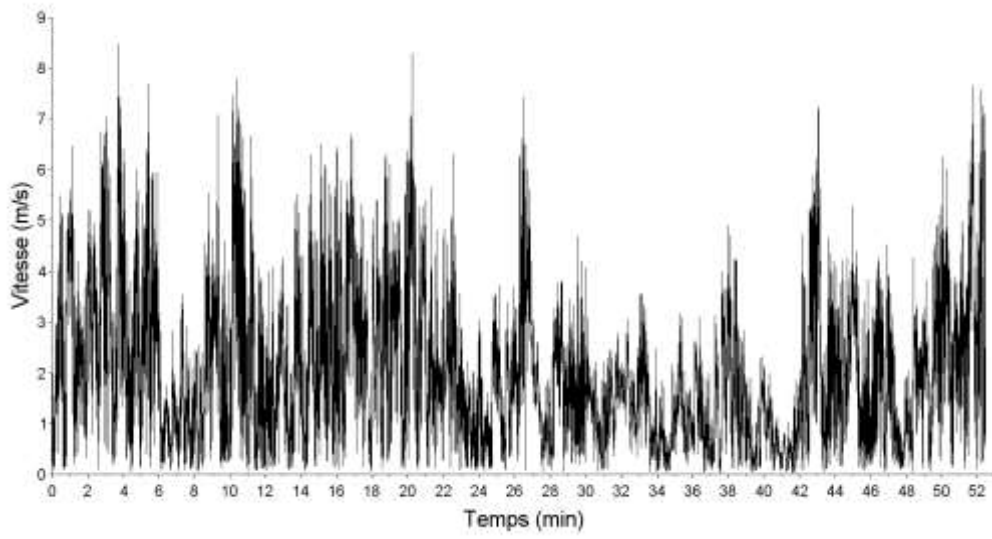


Figure 18 : Vitesse du vent



La figure ci-dessous représente la direction du vent qui varie entre 0° à 360°.

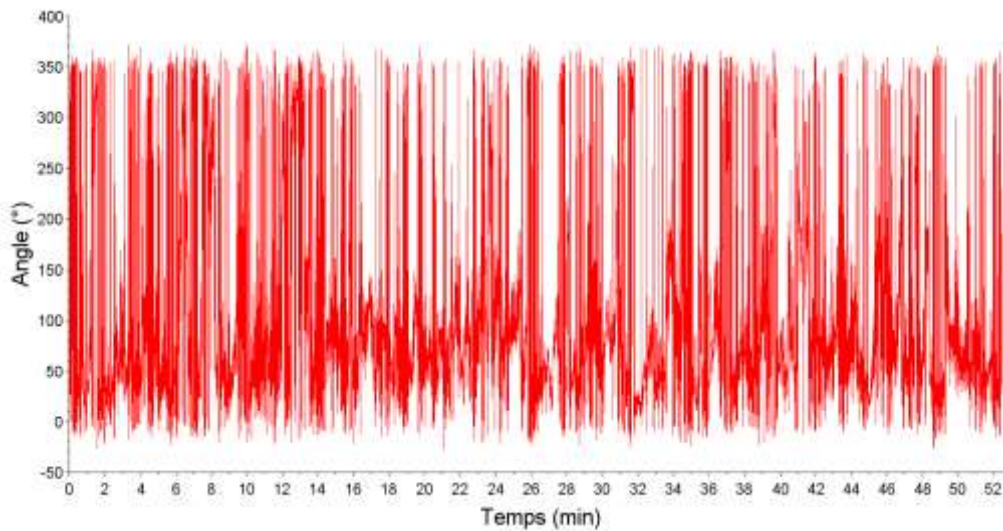


Figure 19 : Direction du vent

Dans le cas de nos mesures, la vitesse du vent est restée globalement faible et avec des variations peu importantes sur la durée de la plage de mesure. De plus, on n'observe pas de corrélation entre les pics d'amplitude du vent et les accélérations mesurées au sommet du bâtiment. Les vibrations sont donc principalement engendrées par le trafic ferroviaire, pas par l'activité de vent.

## 7.5 Conclusion des essais in situ

Les mesures in situ ont permis de mesurer la dynamique de bâtiments à dominante bois dans un environnement réel et à proximité de source de vibration. Les mesures ont permis d'identifier très distinctement le passage de RER mais les vibrations induites sont restées en dessous des seuils tolérés. En terme de valeur efficace, l'amplification mesurée au milieu de portée de plancher était de l'ordre de 2 pour les accélérations verticales et de 3 pour les accélérations horizontales. Des mesures complémentaires devraient être effectuées pour obtenir des données plus significatives. Néanmoins, ces mesures permettent de mettre en évidence la sensibilité réduite de bâtiments à dominante bois vis-à-vis des vibrations extérieures.

# Mesures en laboratoire sur maquette taille réelle

## 8 Objectifs et problématique des essais sur la maquette AdivBois

Les essais in situ sont très représentatifs de la réalité des signaux qui pourraient être perçus par les usagers, mais ils ne permettent pas de contrôler finement la source de vibration et le bâtiment testés n'est pas connus. L'intérêt des essais sur une maquette est de fournir des essais représentatifs dans un environnement parfaitement contrôlé, dans lequel il sera possible d'appliquer directement différents signaux. De plus, comme la géométrie et les composants du bâtiment sont connus, il sera possible de simuler la réponse du bâtiment, et ainsi d'extrapoler les résultats à un grand nombre de configurations et de sources.

## 9 Présentation de la maquette

Comme mentionné, les essais ont été réalisés sur la maquette AdivBois présente à FCBA Bordeaux. Le plan du bâtiment et la vue simplifiée sont affichés dans les figures suivantes. La structure est globalement une structure poteau-poutre.

Au rez-de-chaussée, des poteaux sont présents aux coins du bâtiment et du CLT en croix chrétienne à l'intérieur du rectangle. Le bâtiment est posé sur une dalle béton coulée en place. Le premier étage est similaire au rez-de-chaussée à l'exception de la plus grande paroi CLT qui est remplacée par un complexe poteau-poutre et de cloisons non porteurs. Au dernier étage, il n'y a plus qu'une paroi CLT dans la largeur de l'étage.

L'accès au différent salle se fait par des échafaudages sur chaque côté du bâtiment (Figure 26).

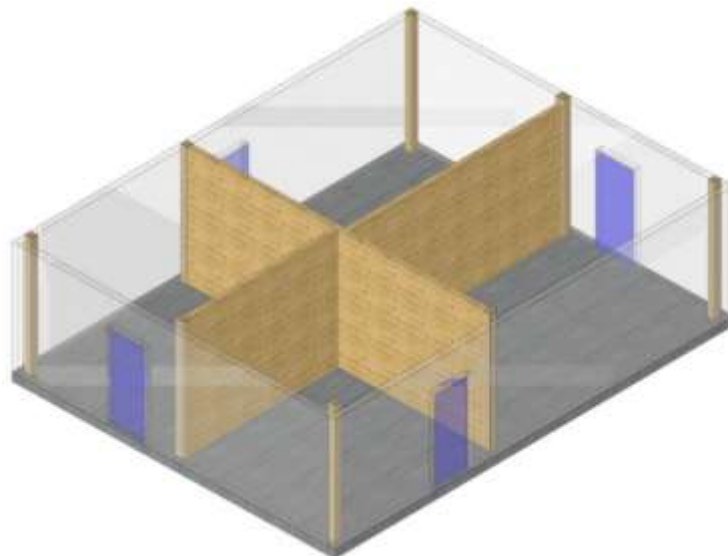


Figure 20 : Vue du rez-de-chaussée

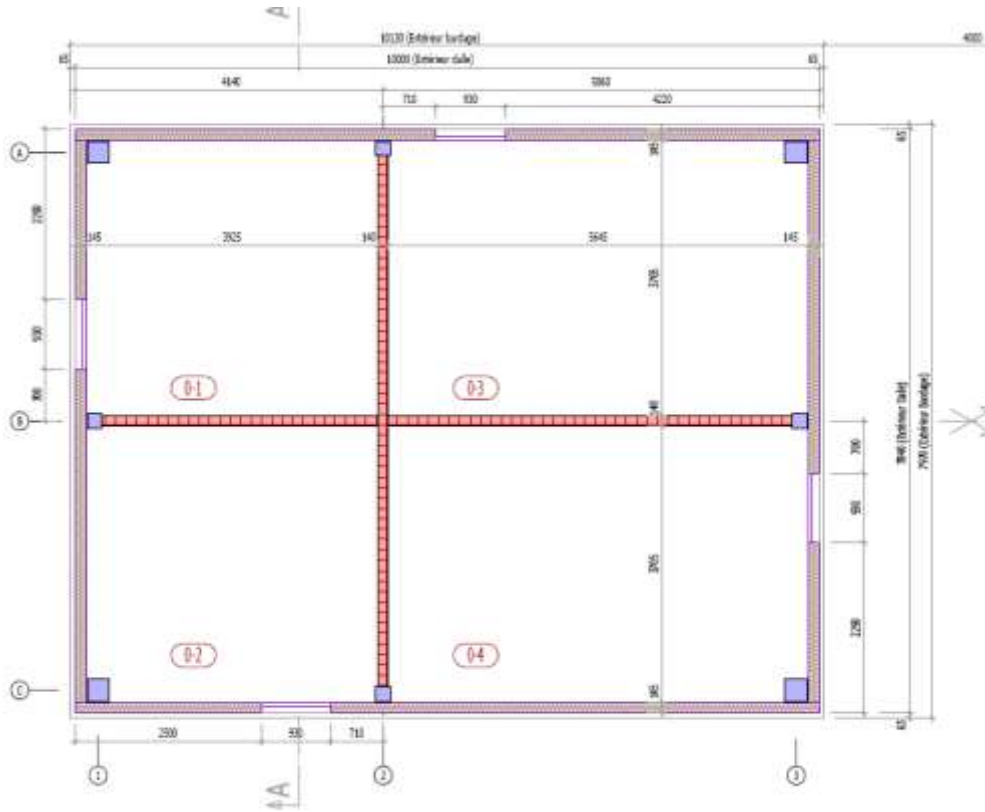


Figure 21 : Plan du rez-de-chaussée

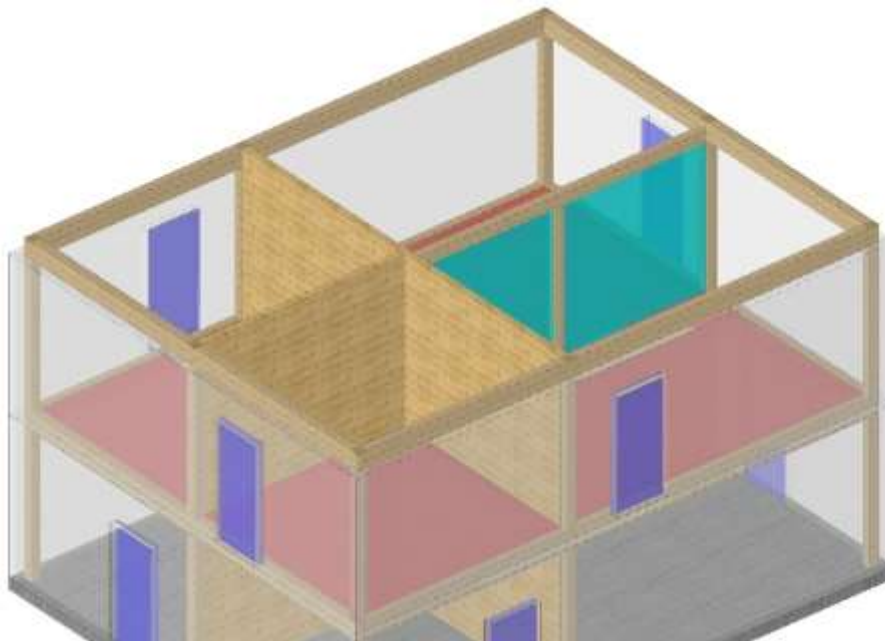
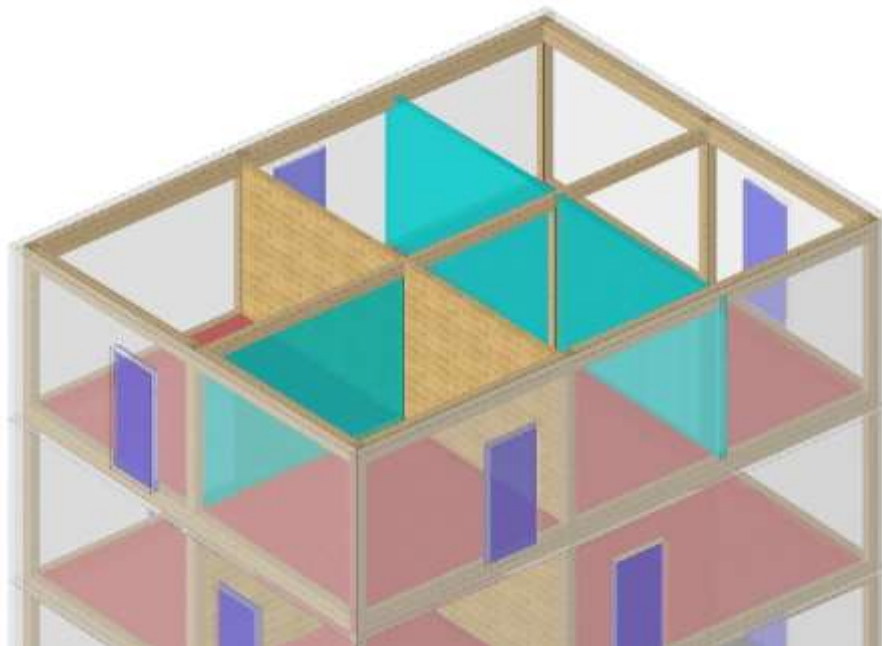
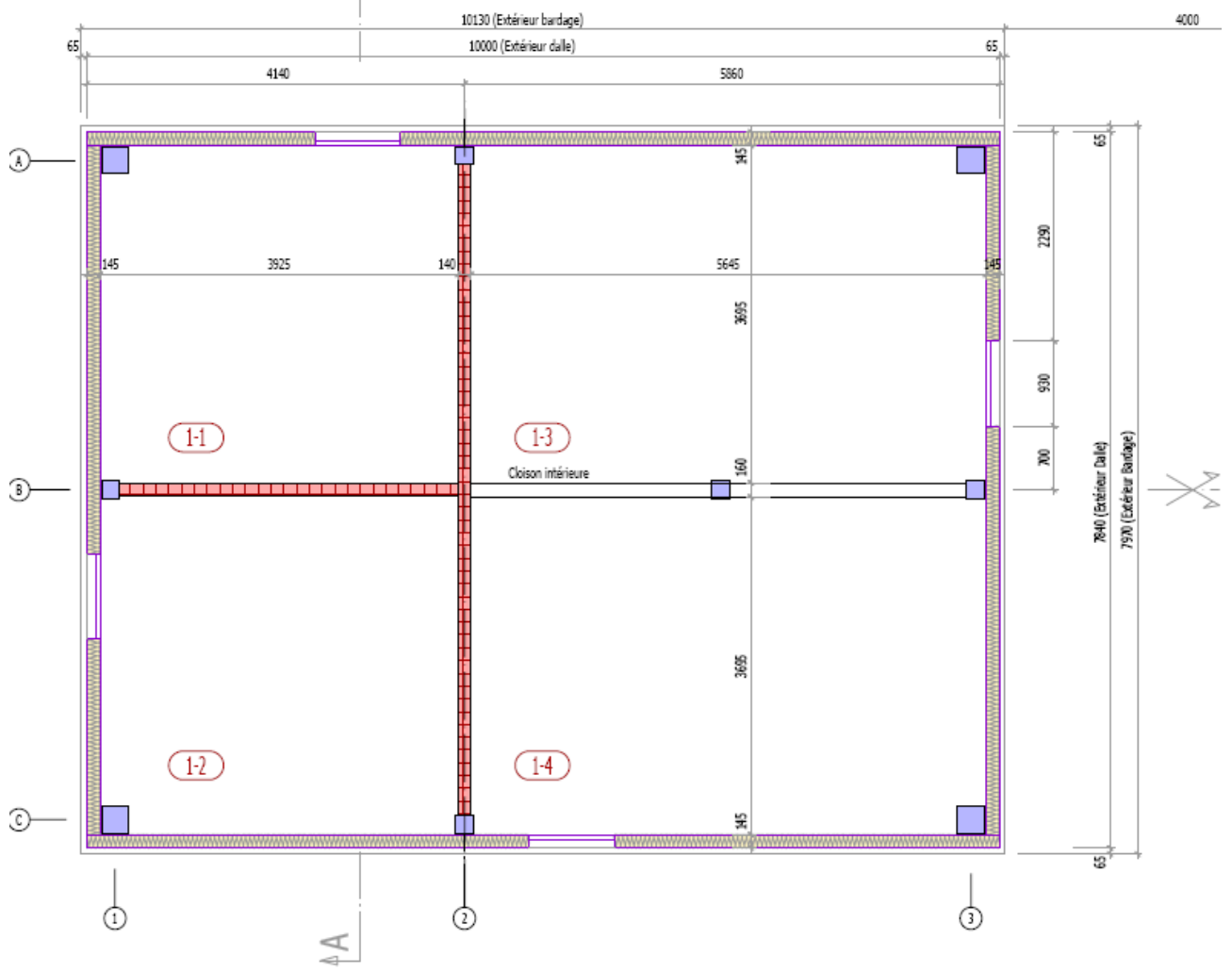


Figure 22 : Vue du premier étage



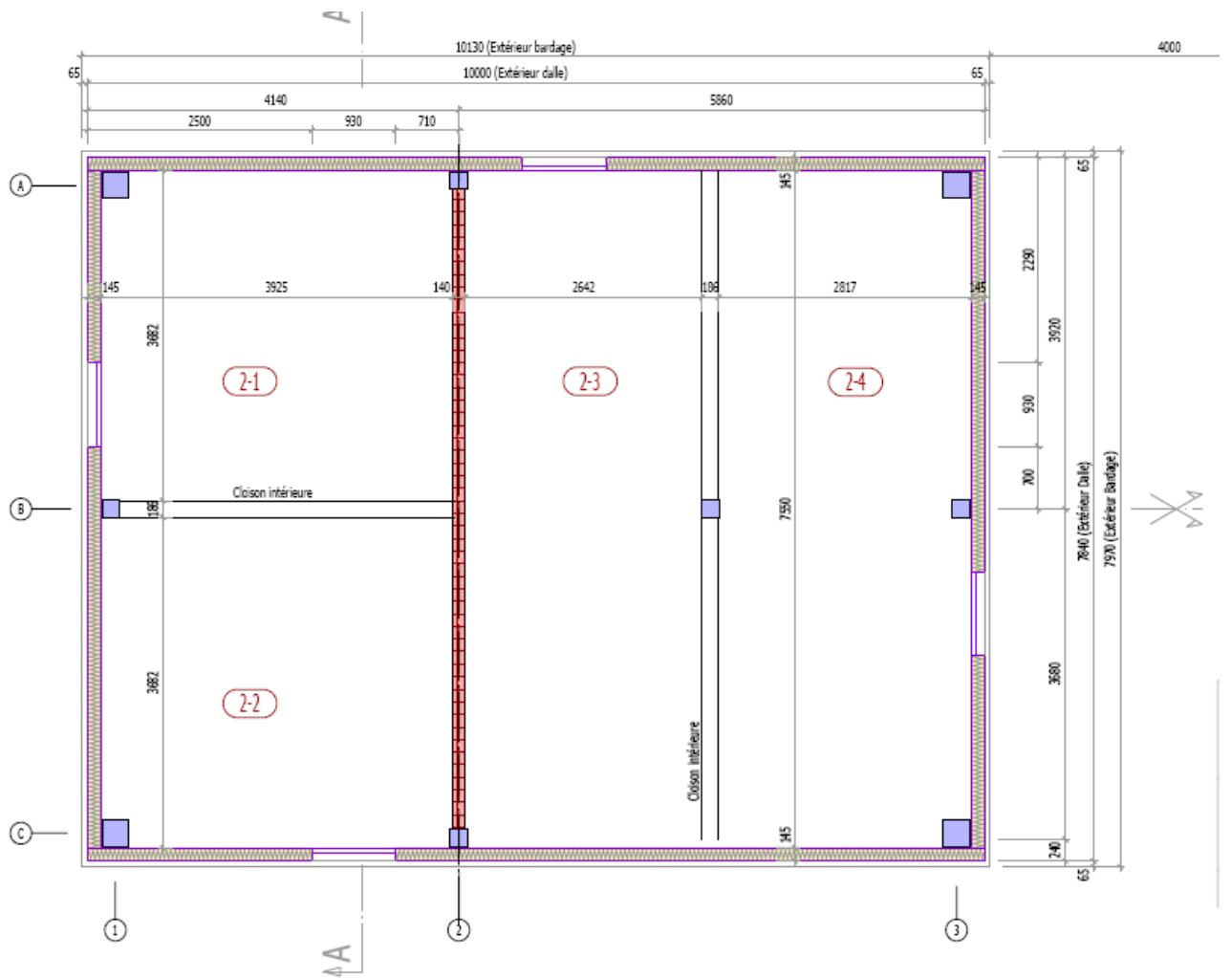


Figure 25 : Plan du deuxième étage



Figure 26 - Vue générale de la structure AdivBois, avec les escaliers externes pour accéder aux différentes salles.

Des mesures ont été effectués dans toutes les salles du bâtiment, mais nous nous sommes particulièrement intéressés aux transmissions des vibrations entre les salles 0-1, 1-1 et 2-1.

## 10 Mise en place des mesures

Les matériels suivants ont été utilisés : trois accéléromètres (voir Figure 27), trois systèmes d'acquisitions Minimus, un marteau d'impact, une machine à choc, un ballon d'impact, un compacteur et une machine à laver. Les accéléromètres ont les sensibilités suivantes :

- Accéléromètre 1
  - Sensibilité de l'axe Z = 4,049 V/m/s<sup>2</sup>
  - Sensibilité de l'axe N = 4,058 V/m/s<sup>2</sup>
  - Sensibilité de l'axe E = 3,987 V/m/s<sup>2</sup>
- Accéléromètre 2
  - Sensibilité de l'axe Z = 4,031 V/m/s<sup>2</sup>
  - Sensibilité de l'axe N = 4,026 V/m/s<sup>2</sup>
  - Sensibilité de l'axe E = 4,017 V/m/s<sup>2</sup>
- Accéléromètre 3
  - Sensibilité de l'axe Z = 4,027 V/m/s<sup>2</sup>
  - Sensibilité de l'axe N = 3,963 V/m/s<sup>2</sup>
  - Sensibilité de l'axe E = 4,001 V/m/s<sup>2</sup>

Le coefficient de passage entre les données de l'accéléromètre et minimus est de 0,002441.



Figure 27 : Accéléromètre

La figure ci-dessous montre le ballon d'impact utilisé pendant l'essai. Ce ballon est traditionnellement utilisé pour des mesures acoustiques pour simuler les sollicitations basses fréquences, comme la marche sur un plancher.



Figure 28 : Ballon d'impact

La figure ci-dessous montre l'installation des matériels de mesure au premier étage.

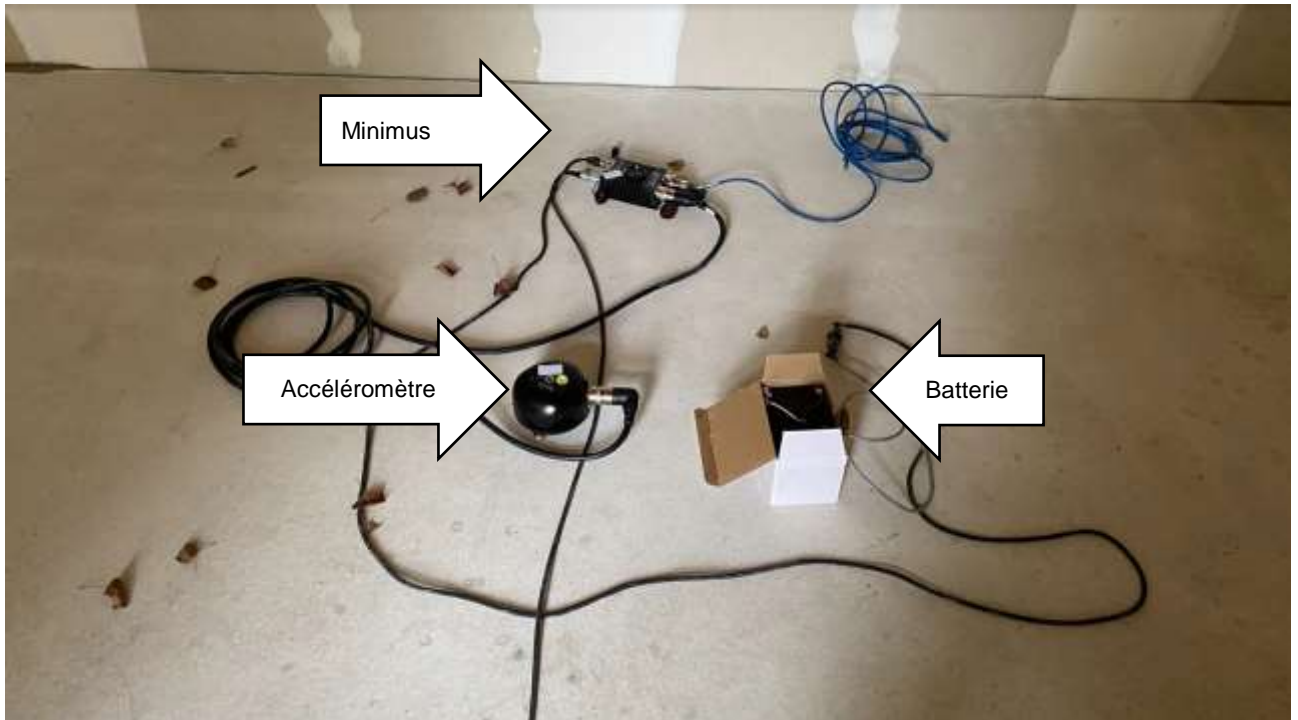


Figure 29 : Installation du matériel de mesure au premier étage

La machine à laver a été installée au 1<sup>er</sup> étage, à environ 1/3 de la portée du plancher. Dans cette salle, l'accéléromètre a été positionnée au 2/3 de la portée du plancher.



Figure 30 : Essai avec la machine à laver au premier étage



La figure ci-dessous montre le compacteur durant l'essai, à un mètre du bâtiment. Le compacteur utilisé est une plaque vibrante de 70kg.



Figure 31 : Zone d'emploi du compacteur

La machine à choc utilisée est une machine standardisée pour des essais acoustiques (NF EN ISO 717-2). Elle est composée de 5 marteaux de 500g qui chutent d'une hauteur de 40 cm. Il s'écoule 100ms entre deux impacts, donc la fréquence de 10Hz et ces harmoniques sont particulièrement sollicités par cette machine.



Figure 32 - Machine à choc standardisée

## 11 Résultats et analyse

### 11.1 Essais au marteau d'impact

Les essais au marteau d'impact sont réalisés pour déterminer la fréquence principale des planchers CLT. 8 mesures sont réalisées comme indiqué dans le tableau ci-dessous. Il consiste essentiellement à frapper le plancher à l'étage inférieur et mesurer les vibrations à l'étage supérieur. Chaque mesure consiste en 5 coups avec un

intervalle de 5 secondes. Pour cet essai, seuls les résultats dans la direction verticale sont étudiés étant donné que la sollicitation est uniquement verticale.

Tableau 1 : Emplacement des points de mesures pour l'essai au marteau d'impact

N° Mesure	Salle émettrice	Salle réceptrice
1	0-1	1-1
2	0-2	1-2
3	0-3	1-3
4	0-4	1-4
5	1-1	2-1
6	1-2	2-2
7	1-3	2-3
8	1-4	2-4

La figure ci-dessous montre les résultats temporels de la mesure numéro 1. On observe que les vibrations se sont bien transmises du RDC au premier étage. Ensuite avec ces résultats, on calcule la module de la transformée de Fourier rapide FFT pour trouver la fréquence principale des planchers. Le calcul se fait grâce au logiciel Scilab.

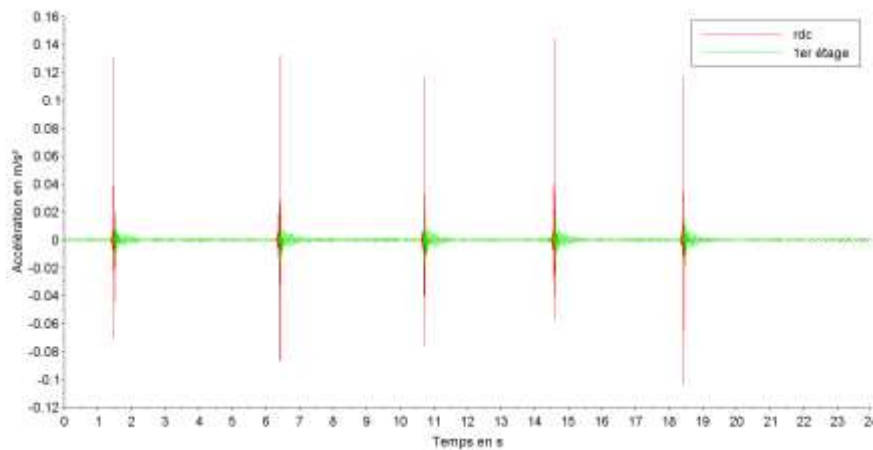


Figure 33 : Le résultat temporel de la mesure numéro 1

La mesure temporelle permet aussi de donner l'amortissement du plancher sur lequel est appliqué la charge du marteau en appliquant un décrétement logarithmique. Les planchers CLT du 1<sup>er</sup> étage ont des amortissements visqueux situés entre 2,5% et 3%.

L'image ci-dessous montre la FFT de la mesure numéro 1. On observe qu'au premier étage, la fréquence la plus sollicitée est à 14,2Hz qui représente la fréquence principale du plancher CLT. Les fréquences principales identifiées par les différentes mesures sont regroupées dans le tableau ci-dessous qui sont de l'ordre de 14 et 15 Hertz.



Figure 34 : FFT au rez-de-chaussée et au 1<sup>er</sup> étage lors de l'essai au marteau dans la salle 0-1

Tableau 2 : Fréquence principale des planchers

N° Mesure	Fréquence du plancher (Hertz)
1	14.2
2	14.2
3	15.7
4	15.2

Les essais au marteau ont permis d'identifier les fréquences des planchers et de déterminer le transfert des impacts de marteau entre les étages. Les impacts de marteau sont fortement amortis entre les étages, et leurs composantes fréquentielles changent complètement. Le marteau sollicite principalement les hautes fréquences à l'étage où a lieu l'impact, tandis que l'énergie se concentre sur la fréquence propre de vibration sur le plancher situé à l'étage supérieur.

## 11.2 Vibrations provoquées par une machine à laver

La machine à laver est une source de vibration importante et très courante à l'intérieur d'un bâtiment d'habitation. Si la machine est mal isolée ou si le plancher est trop souple, la vibration peut occasionner des bruits et des vibrations solidiennes engendrant de l'inconfort pour l'occupant. L'objectif de ces essais est à la fois de donner des estimations des niveaux de vibrations engendrés par une machine à laver mais aussi d'étudier la transmission de la vibration entre les étages.

Avec la machine à laver au premier étage, nous avons effectué deux mesures sur des cycles de rinçage et d'essorage avec les différentes vitesses de consigne : 1200 et 1000tr/min. Les opérations réalisées duraient à peu près 15 minutes.

La Figure 35 présente les mesures temporelles dans la direction verticale. Étant donné que la machine à laver se trouve au premier étage, il est cohérent que les signaux au cet endroit soient plus forts que ceux des autres étages. Les vibrations transmises au deuxième étage sont plus importantes, probablement du fait de la souplesse du plancher CLT.

Les vibrations sont maximales durant les 5 dernières minutes du cycle, correspondant à la phase d'essorage.

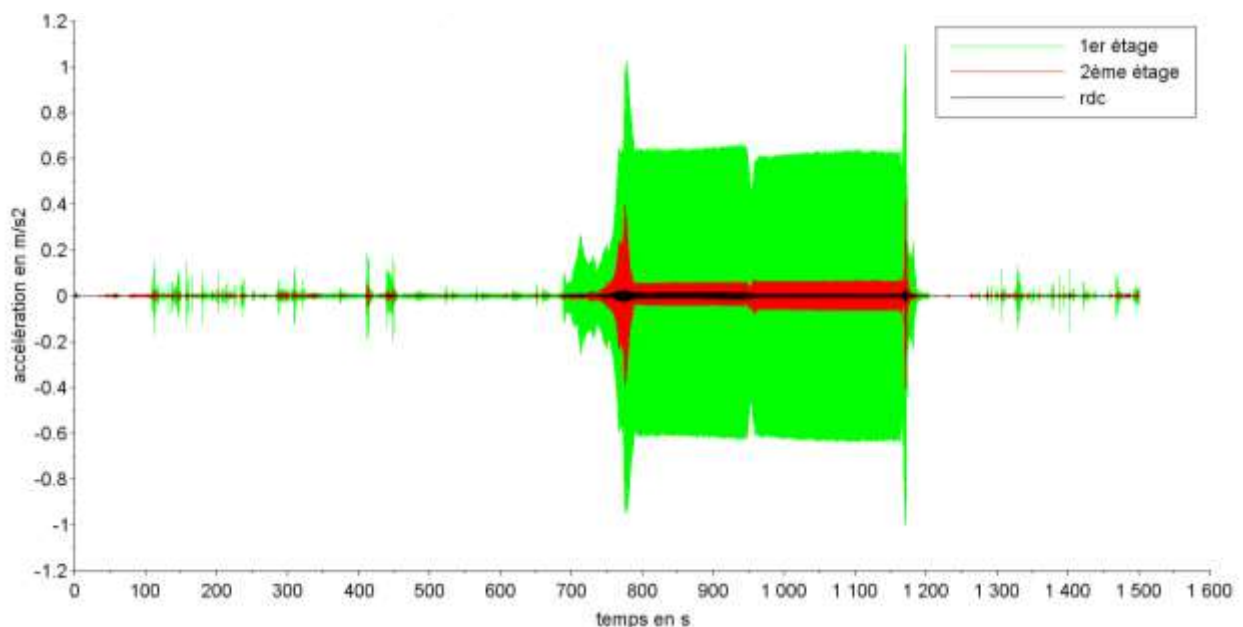


Figure 35 : Les résultats temporels de l'essai de machine à laver dans la direction verticale pour un vitesse de rotation de consigne de 1200tr/min.

La figure ci-dessous montre les spectrogrammes temps-fréquence de cet essai. On observe une variation dans la fréquence sollicitée suivant l'avancé du cycle. Durant le cycle de rinçage, la fréquence est faible (autour de 7-8 hertz). L'accélération durant cette phase est très faible (voir Figure 35). Au début de l'étape d'essorage, vers 650s, la rotation du tambour s'amplifie progressivement jusqu'à atteindre la vitesse de rotation de consigne. C'est durant cette phase d'incrément de la fréquence que l'amplitude des vibrations est la plus importante.

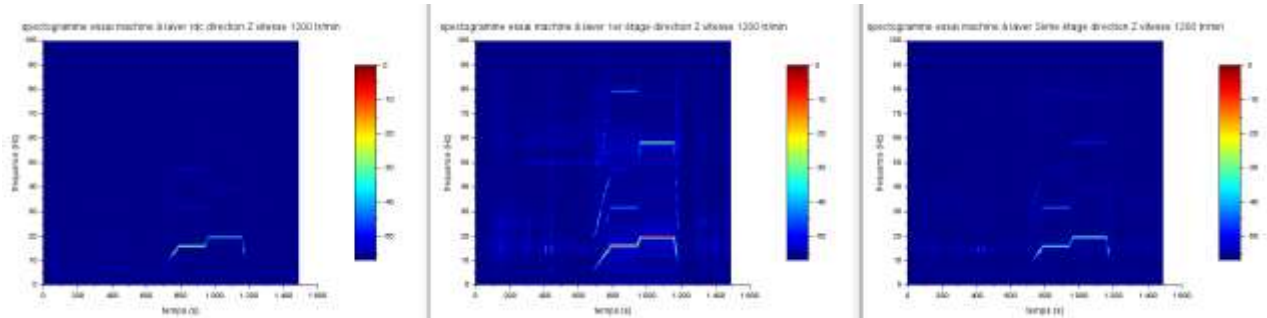


Figure 36 : Les spectrogrammes de l'essai de machine à laver (rdc-1er étage-2ème étage) pour une vitesse de consigne de 1200tr/min

Les accélérations RMS maximales sont calculés et représentés dans le Tableau 3. La RMS maximale de 0,75m/s<sup>2</sup> se trouve au premier étage, à proximité immédiate de la machine à laver.

Tableau 3 : Les accélérations RMS maximales de l'essai de machine à laver

Etage	RMS max (m/s <sup>2</sup> )
0	0.0177
1	0.7465
2	0.2769

Selon la figure ci-dessous, on observe que le fonctionnement d'une machine à laver dans ce bâtiment ne respecte pas la norme ISO 10-137 ce qui peut dire que ce bâtiment n'est pas idéal pour cette activité dans la vie quotidienne. La maquette dans laquelle sont réalisés les essais est composée de matériaux légers avec le sol qui est nu. Ce qui explique ces niveaux de vibrations élevés qui seraient insupportables pour un immeuble d'habitation.

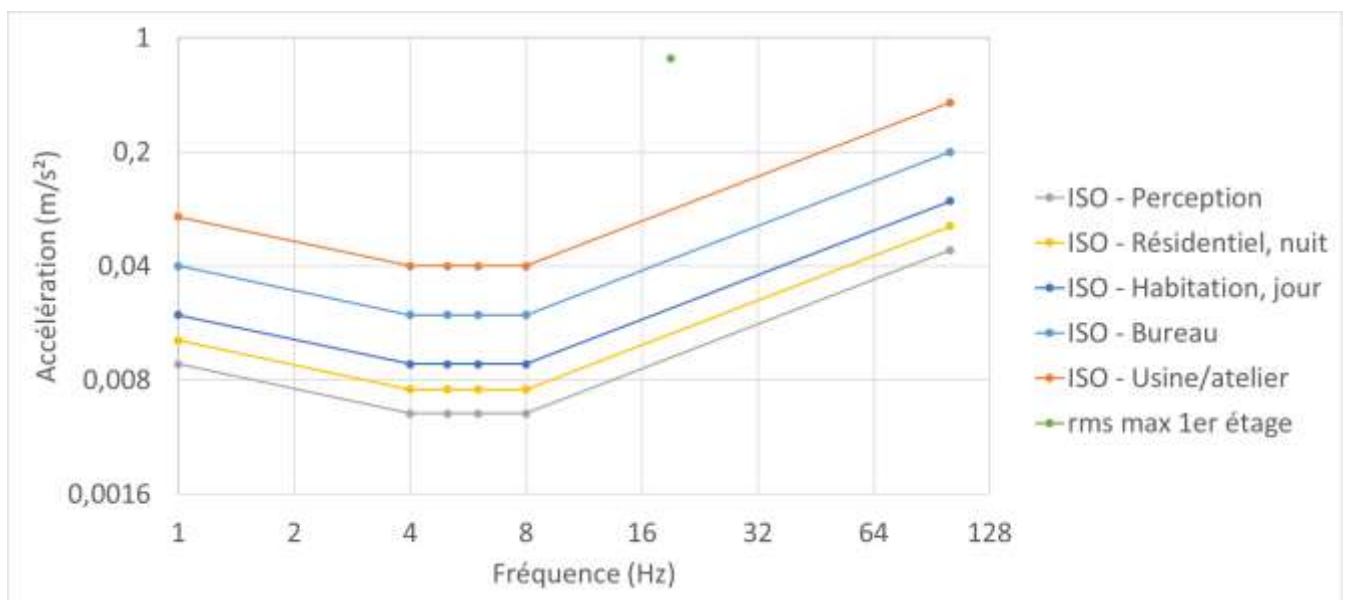


Figure 37 : Comparaison entre la RMS maximale et la norme ISO 10-137

Le tableau ci-dessus indique les amplifications maximales entre le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup> étage. Il est intéressant d'observer qu'il n'y avait pas d'amplification entre ces deux étages quelle que soit l'approche.

Tableau 4 : Amplifications maximales pour l'essai de machine à laver

FRF		Amplification maximale
Fréquence		RMS
13.7		0.371

## 11.3 Essais machine à choc

Deux mesures sont réalisées avec une machine à choc standardisée pour les mesures acoustiques. La machine à choc est décrite dans le §10. Une mesure est réalisée avec la machine à choc au rez-de-chaussée et une deuxième mesure avec la machine à choc au 1<sup>er</sup> étage. Dans ce rapport on présente les résultats de la mesure d'accélération verticale.

La figure ci-dessous montre les résultats temporels. Etant donné que la machine était située au rez-de-chaussée, les signaux mesurés à cet endroit sont supérieurs à ceux mesurés aux autres étages. Les vibrations issues de la machine à choc semblent réduites entre le rez-de-chaussée et les étages. De plus, les signaux au premier et deuxième étage semblent assez similaires.

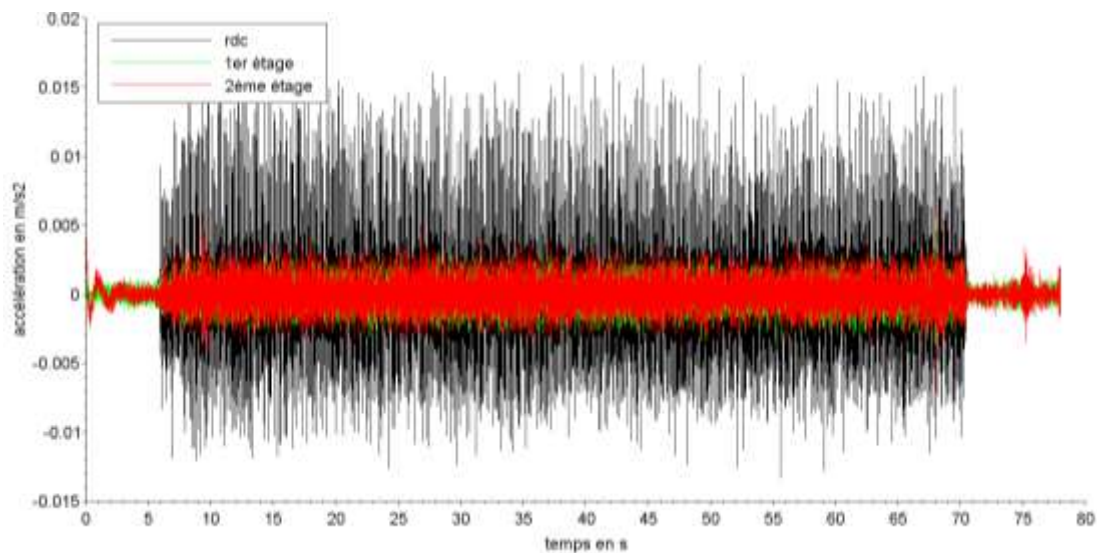


Figure 38 : Résultats temporels de l'essai de machine à choc en Z pour une sollicitation au rez-de-chaussée

Dans le domaine fréquentiel, on trace la FRF à chaque étage (Figure 39). Dans les deux cas, un pic d'amplification est clairement observable pour une fréquence d'environ 25 Hertz, qui correspond à priori à une des fréquences de résonance principale des planchers des étages. Les amplifications pour chacun des étages sont données dans le Tableau 5.

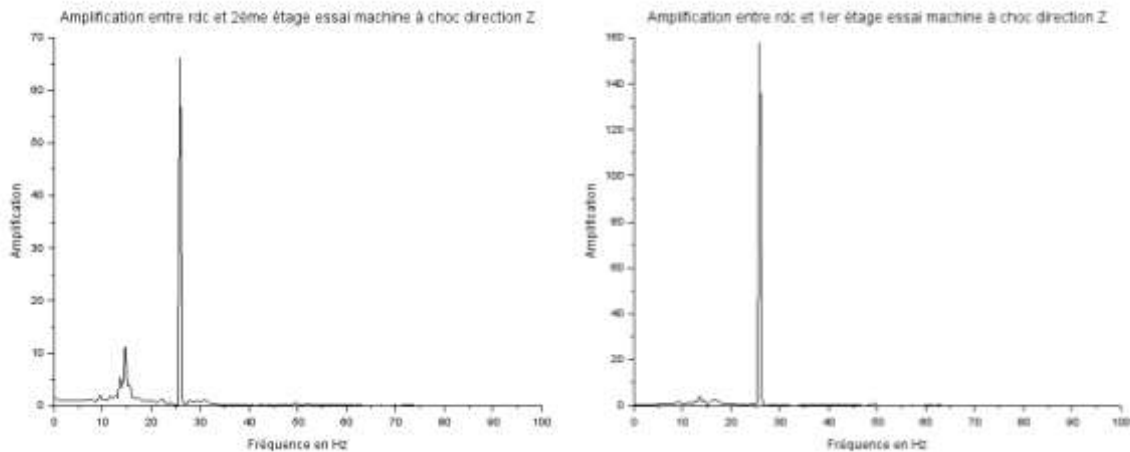


Figure 39 : Les amplifications entre chaque étage trouvées avec l'approche FRF

Tableau 5 : Les amplifications pour l'essai de machine à choc

Config	FRF		Amplification RMS
	Fréquence	Amplification maximale	
Entre RDC et 1 <sup>er</sup> étage	25.9	157	0.329
Entre 1 <sup>er</sup> et 2 <sup>ème</sup> étage	66.1	25	0.422

Les FFT à chaque étage sont affichées dans la figure ci-dessous. Au rez-de-chaussée, on observe qu'il y a des pics d'amplitude élevés tous les 10 Hertz aussi présents sur les autres étages, ce qui vient du fait que le temps entre chaque impact est de 100 ms. Néanmoins, on observe que toute la gamme de 20 à 90Hz est sollicitée.

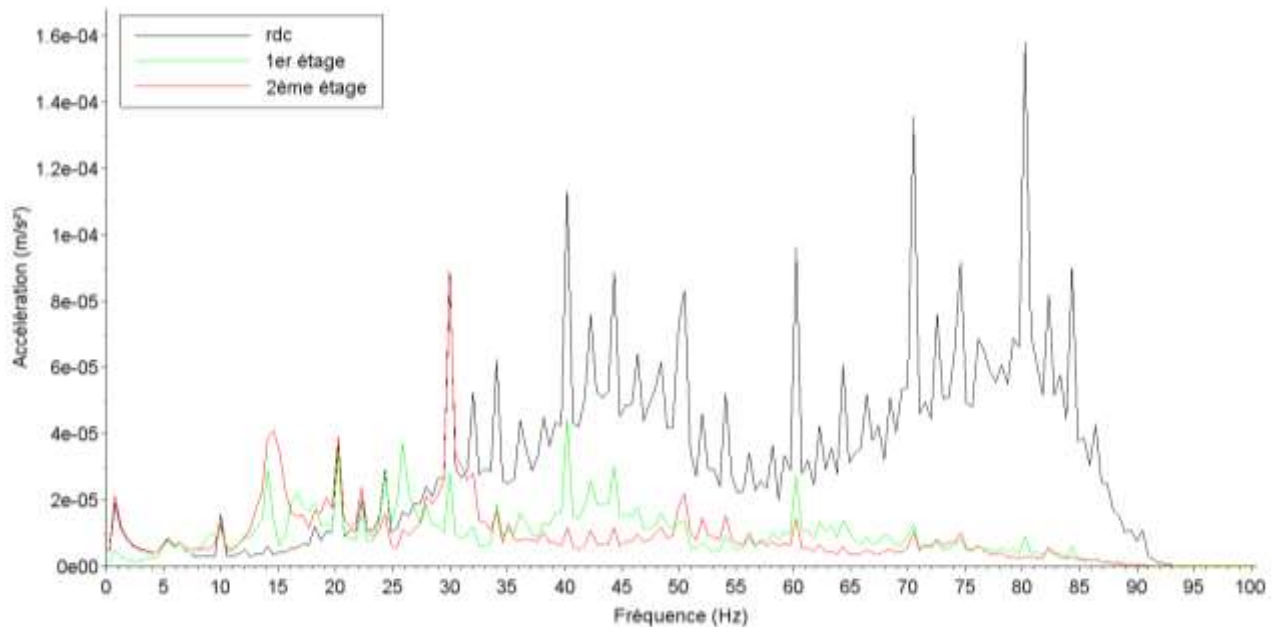


Figure 40 : FFT de l'essai de machine à choc dans la direction verticale

Les sollicitations entretenues multi fréquentielles engendrent une réponse quasi harmonique des planchers situés au-dessus de leur fréquence de résonance. Néanmoins, l'amplification des vibrations RMS du plancher est largement inférieur à 1 (autour de 0,4), ce qui caractérise une dissipation de l'énergie de vibration entre les étages pour ce type de signaux.

## 11.4 Essais au ballon d'impact

L'essai au ballon d'impact est réalisé pour trouver l'amortissement global du bâtiment pour de faibles fréquences. L'idée est de comparer le comportement du bâtiment entre l'essai et le modèle numérique présenté dans le paragraphe suivant. En faisant varier la valeur d'amortissement dans le modèle numérique jusqu'à ce qu'on trouve des comportements similaires avec ceux de l'essai au ballon d'impact.

La figure ci-dessous montre la comparaison des résultats temporels entre l'essai et la simulation. La corrélation entre essai et simulation montre un niveau d'amortissement de l'ordre de 4.5 % sur les différents planchers.

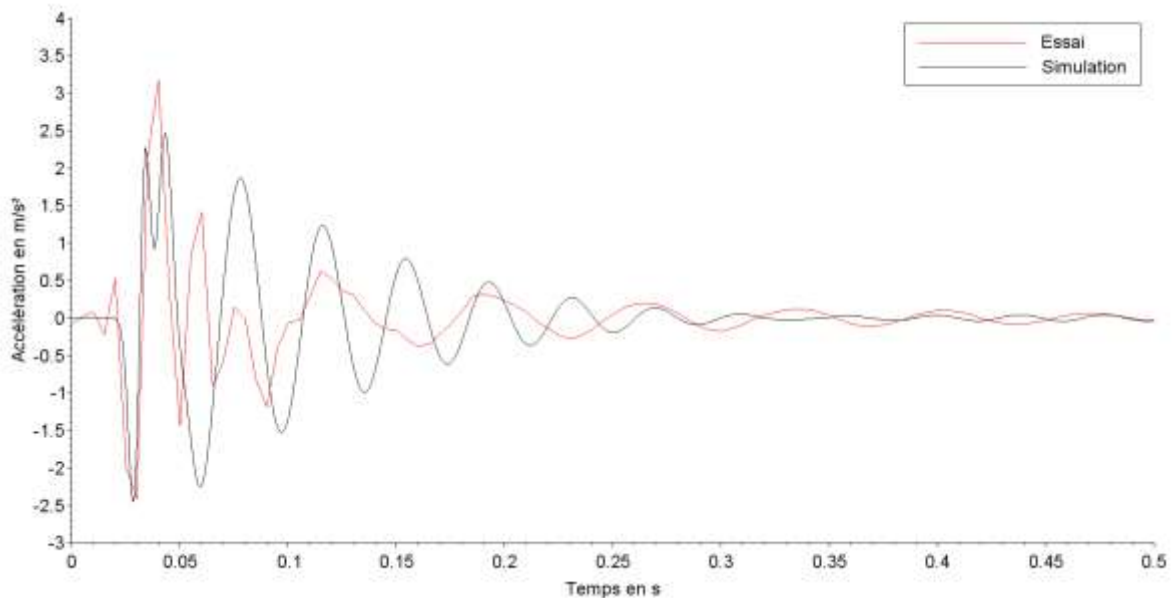


Figure 41 : Comparaison des résultats temporels entre l'essai et simulation

On observe néanmoins que l'allure des mesures expérimentales et de la simulation sont très différents : en réalité, la dissipation d'énergie dans la structure fait appel à des phénomènes complexes (frottement, choc, viscosité...) qui ne sont pas reproduit par la simulation. L'amortissement identifié est une valeur équivalente en considérant un amortissement visqueux linéaire.

## 11.5 Essais au compacteur

Cet essai était le seul avec des vibrations extérieures. Un accéléromètre est installé sur chaque étage pour mesurer les accélérations. Deux mesures sont réalisées avec un compacteur à 5m puis à 1m du bâtiment, à proximité de l'angle de la salle 0-1 (voir Figure 21).

Dans ce rapport, on présente les résultats de la mesure la plus proche du bâtiment dans toutes les directions. La direction Z correspond à la hauteur, N à la largeur et E à la longueur du bâtiment.

La figure ci-dessous montre les résultats temporels dans la direction verticale. On observe qu'il n'y a pas de grands écarts entre les accélérations mesurées à chaque étage qui peut être interprété en tant qu'un mouvement global du bâtiment.

Ensuite, on réalise les spectrogrammes pour visualiser les fréquences sollicitées.

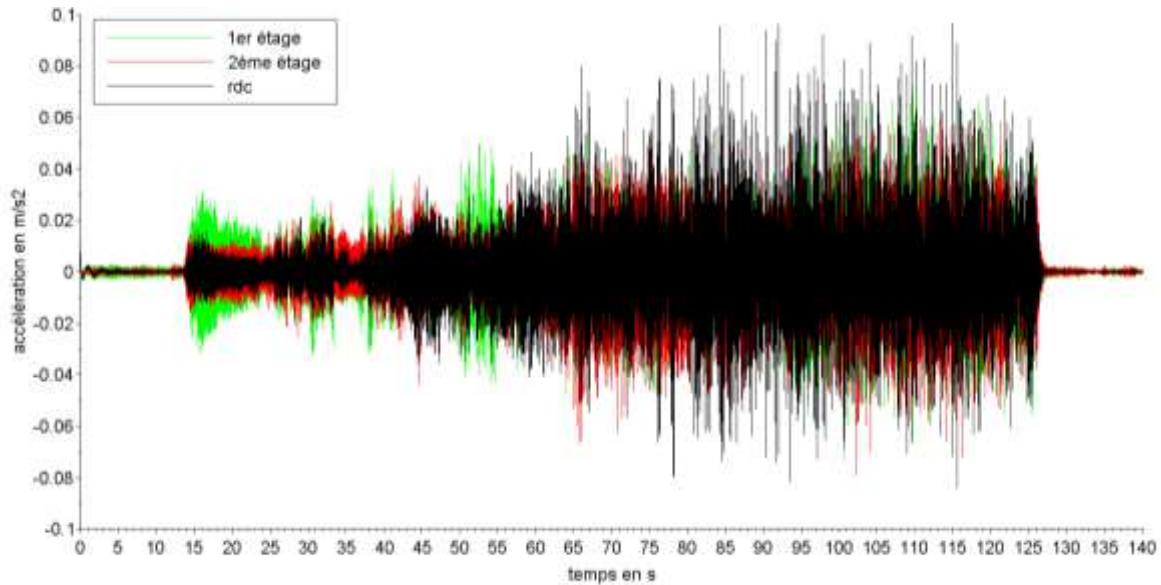


Figure 42 : Résultats temporels dans la direction verticale de l'essai au compacteur

Les figures ci-dessous montrent les spectrogrammes dans la direction Z. Au rez-de-chaussée, on voit une gamme de fréquence entre 40-70 Hertz. On peut voir que les basses fréquences sont filtrées au premier étage, et les hautes fréquences sont filtrées au deuxième.

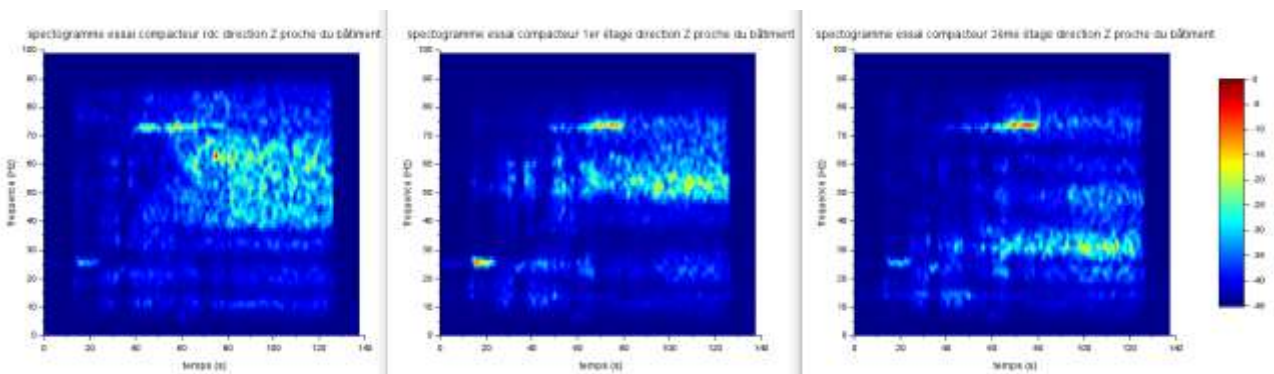


Figure 43 : Spectrogramme dans la direction Z (rez-de-chaussée / 1er étage / 2ème étage)

Par la suite, on calcule les accélérations efficaces RMS sur une seconde. Le tableau ci-dessous réunit les RMS maximales au différent étage dans chaque direction. La valeur la plus élevée de 0.0249 m/s<sup>2</sup> se trouve au rez-de-chaussée dans la direction verticale.



Direction	Etage	RMS max (m/s <sup>2</sup> )
Z	0	0.0249
	1	0.0229
	2	0.0239
N	0	0.0047
	1	0.0132
	2	0.0066
E	0	0.0062
	1	0.0130
	2	0.0121

Figure 44 : Les accélérations RMS maximales durant l'essai au compacteur

La figure ci-dessous montre la comparaison entre la RMS maximale avec la norme ISO 10-137. Le compacteur engendre des vibrations proches des limites imposées dans des constructions résidentielles la nuit.

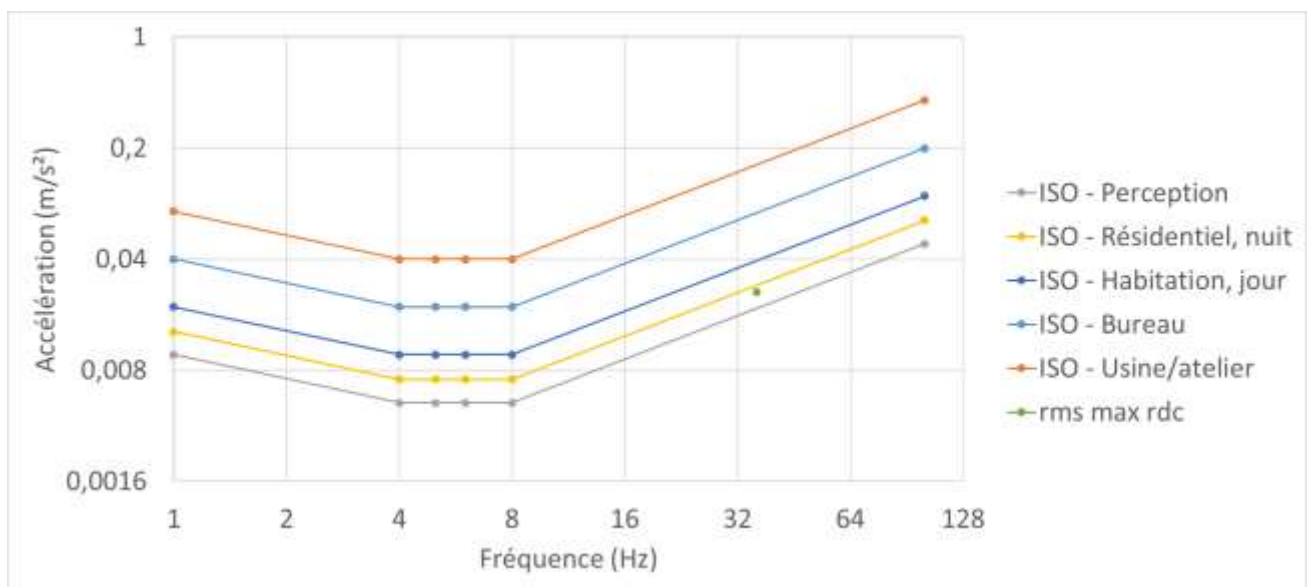


Figure 45 : La comparaison entre la RMS maximale dans la direction verticale et la norme ISO 10-137

Ensuite, deux méthodes ont été utilisées pour déterminer les amplifications des vibrations entre la base et le sommet du bâtiment : FRF pour déterminer les amplifications maximales propres à une fréquence et le rapport entre les RMS maximales pour déterminer les amplifications globales entre chaque étage.

Les amplifications entre le rez-de-chaussée et le sommet dans la direction verticale déterminées par la FRF sont illustrées dans la figure ci-dessous. On observe une amplification maximale de 5,46 à 30Hertz.

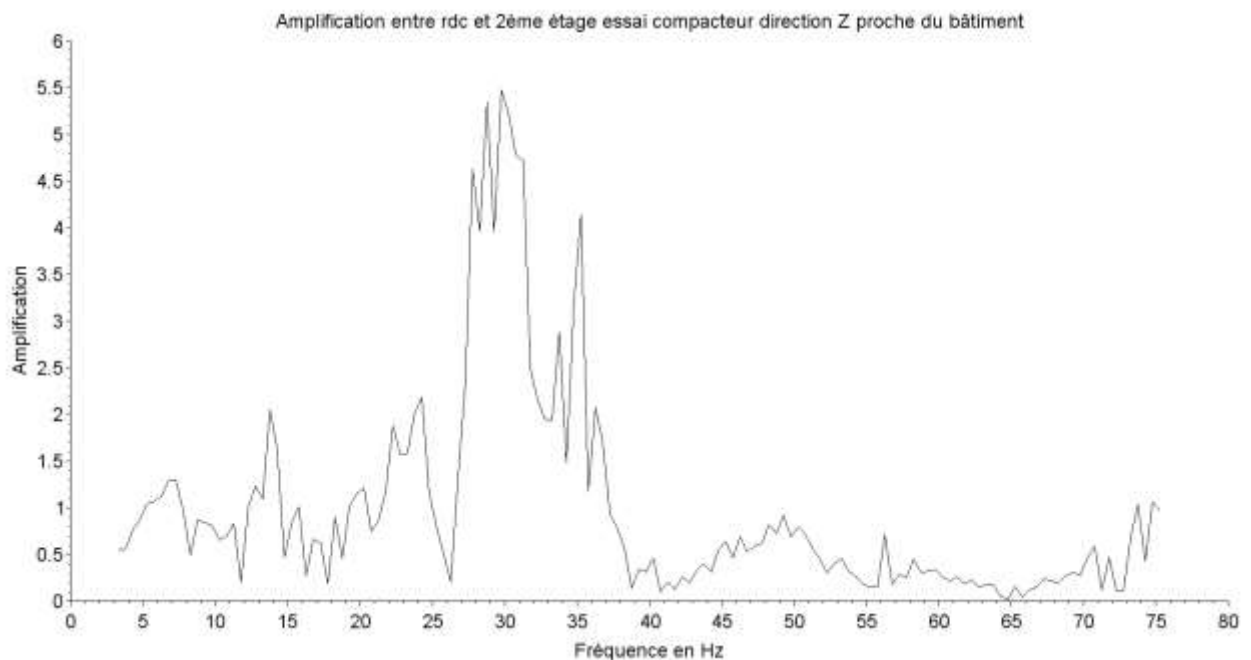


Figure 46 : Fonction de transfert de l'accélération verticale entre le RDC et le deuxième étage pour l'essai au compacteur

Le tableau ci-dessous regroupe les amplifications maximales de l'essai de compacteur. Avec la première méthode, on trouve qu'il y avait plus d'amplification transversalement que verticalement, ce qui signifie que le bâtiment est plus souple dans cette direction.

Avec la deuxième méthode, les amplifications sont proches à 1 en Z, qu'on suppose que c'est lié au mouvement global du bâtiment. Dans la direction N et E, on trouve des amplifications de l'ordre de 2.

Tableau 6 : Amplifications maximales de l'essai de compacteur

Direction	Comparaison	Amplification maximale FRF		Amplification maximale RMS
		Fréquence (Hz)	Amplification maximale	
Z	Rdc et 1 <sup>er</sup> étage	56	2.74	0.92
	Rdc et 2 <sup>ème</sup> étage	30	5.46	0.96
N	Rdc et 1 <sup>er</sup> étage	47	6.39	2.81
	Rdc et 2 <sup>ème</sup> étage	7	8.46	1.40
E	Rdc et 1 <sup>er</sup> étage	35	8.52	2.10
	Rdc et 2 <sup>ème</sup> étage	45	7.86	1.95

Dans le cas d'une sollicitation externe, on remarque que les vibrations verticales sont globalement transmises aux étages intégralement mais sans amplification. Les modes de vibration « verticaux », c'est-à-dire la traction du bâtiment dans le sens de la hauteur, intervienne à des fréquences très hautes. Les sollicitations typiques (transport, travaux) provoquent de signaux de fréquence beaucoup plus basses. Dans ce cas, la structure se comporte comme un solide rigide, et transmet l'ensemble des vibrations sans les amplifier ni les filtrer (voir partie théorique, Figure 1.)

Dans les directions « horizontales » N et E, les fréquences des sollicitations et des modes de résonance du bâtiment sont du même ordre de grandeur. On observe donc une amplification des vibrations, que ce soit en terme d'amplification maximale de la FRF qu'en terme de grandeur RMS. Néanmoins, les valeurs d'amplification sont relativement faibles, ce qui traduit un amortissement important. De plus dans le cas du compacteur, l'intensité dans la direction horizontale était 4 à 5 fois plus faible que dans la direction verticale. Il reste à définir si cette observation est aussi vérifiée pour des sollicitations issues des transports.

## 11.6 Conclusions sur les résultats de la maquette

Différentes sollicitations ont été appliquées sur les maquettes AdivBois, depuis l'intérieur ou l'extérieur du bâtiment. Concernant les essais au marteau d'impact, ils ont permis d'identifier les fréquences propres des différents planchers. L'amortissement identifié au marteau est de l'ordre de 3%. On observe aussi un filtrage important des hautes fréquences avec ce type de sollicitation.

La machine à laver est l'essai qui induit le plus de vibrations dans le bâtiment, principalement à l'étage où elle est située. Le signal est purement harmonique, avec une fréquence de sollicitation qui augmente entre les phases de rinçage et d'essorage. C'est dans cette phase de transition que l'on observe les accélérations les plus importantes.

La machine à choc, à l'instar du marteau, induit des signaux de hautes fréquences. Le signal est très amoindri entre les étages et est filtré : l'essentiel de l'énergie se concentre sur les modes de vibrations des planchers.

Le ballon d'impact génère des chocs plus importants et plus réparti que les marteaux d'impacts. Les amortissements identifiés avec cette méthode sont de l'ordre de 4%. Néanmoins les chocs sont très courts et ne génère pas d'accélération RMS très importante.

Enfin, le compacteur est la seule source de vibration externe qui a été testée. On observe de la même façon que pour le marteau et la machine à choc une nouvelle répartition de l'énergie dans les fréquences, les signaux hautes fréquences ayant tendance à être globalement filtrés par la structure, quel que soit la direction. Pour ce type de signal avec une répartition fréquentielle étendue, l'amplification du signal RMS est de l'ordre de 1 dans la direction verticale, ce qui suppose un comportement de type corps rigide dans cette direction. Dans les directions horizontales, les vibrations sont amplifiées d'un facteur 2 à 3. Les fréquences des sollicitations sont du même ordre de grandeur que les modes de flexion globaux de la structure, il est donc normal d'observer une amplification modale.

## 12 Simulation de la maquette AdivBois

### 12.1 Présentation du modèle numérique

Un modèle numérique du bâtiment AdivBois a été développé pour extrapoler les résultats avec ceux obtenus lors des essais. Nous avons utilisé le logiciel Cast3m, développé par le Commissariat à l'Energie Atomique CEA, pour effectuer les simulations en utilisant la méthode des éléments finis.

Comme présenté dans la figure ci-dessous, nous avons décidé de le concevoir avec des éléments de coques et de poutres pour simplifier la conception et réduire le nombre d'éléments. Les poteaux et les poutres sont constitués d'éléments de poutre tandis que les planchers et les murs sont constitués d'éléments de coque. Les éléments de menuiserie n'ont pas été pris en compte puisqu'ils interviennent à priori peu dans la réponse vibratoire du bâtiment.

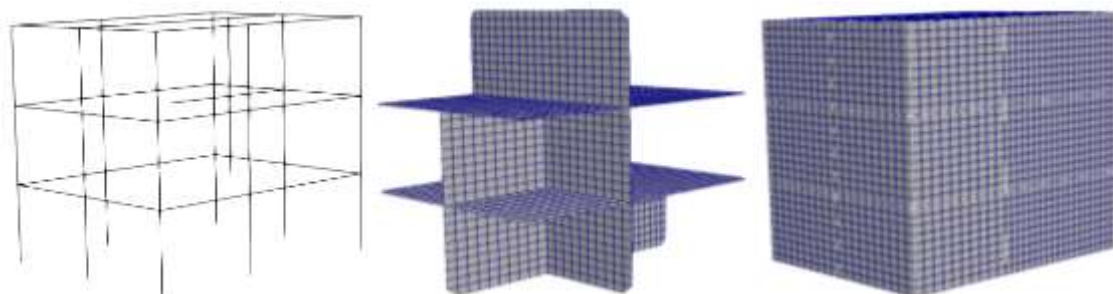


Figure 47 : Le modèle numérique réalisé sur Cast3m. A gauche les poutres et poteaux modélisés avec des éléments filaires (poutre de Bernoulli). Au centre des coques représentant les parois et planchers intérieurs et à droite des coques pour les éléments extérieurs.

### 12.2 Description des matériaux

Il y a 4 types matériaux appliqués dans ce modèle : GL24, C24, OSB et CLT. Les propriétés de chaque matériau sont décrites dans le tableau ci-dessous. En ce qui concerne les conditions aux limites, nous avons encastré tous

les poteaux au niveau du sol. Les encastremets sont appliqués également aux liaisons entre les poteaux et les poutres. Les planchers sont également considérés comme encastrés dans les poutres. Cette approche permet de conserver un modèle linéaire et d'être en mesure de réaliser des calculs rapides. Il serait néanmoins nécessaire de prendre en compte la raideur et le caractère dissipatif des liaisons pour avoir un modèle précis.

Tableau 7 : Les matériaux et ses propriétés

Objet	Matériaux	$\rho(kg/m^3)$	$E_L(Mpa)$	$E_T(Mpa)$	$\nu$	section( $m^2$ )	e(m)
Poteau d'angle	GL24	380	11.6	0.39	0.4	0.0768	-
Poutre périphérique	GL24	380	11.6	0.39	0.4	0.0800	-
Poutre intermédiaire	GL24	380	11.6	0.39	0.4	0.0512	-
Poteau intermédiaire	C24	420	11.0	0.37	0.4	0.0400	-
Mur OSB	OSB	550	4.93	1.98	0.4	-	0.145
Mur CLT	CLT	500	6.33	4.26	0.4	-	0.140
Plancher CLT	CLT	500	6.33	4.26	0.4	-	0.140

## 12.3 Résultats et comparaison avec les mesures

Nous avons réalisé trois types de calculs sur ce modèle : une analyse modale, une étude dynamique d'un essai au marteau d'impact et une étude dynamique d'un essai de machine à laver. Mais seulement les deux premiers sont présentés dans ce rapport, aucun résultat significatif n'a pu être extrait des calculs avec la machine à laver. La première simulation est réalisée pour trouver les fréquences propres du bâtiment et vérifier qu'elles correspondent à celles mesurées expérimentalement. Pour les 4 premiers modes, nous avons trouvés des fréquences comprises entre 16,1 et 18,3 Hertz qui représentent globalement les fréquences du plancher. En les comparant aux fréquences trouvées lors du test au marteau (14-15 Hertz), nous avons un écart de l'ordre de 14%. La différence provient de la modélisation des connexions : dans le modèle, les liaisons ont été considérés comme infiniment rigide alors qu'elles ont dans la réalité une certaine souplesse, même si elle est difficile à déterminer.

Tableau 8 : Résultats d'analyse modale de la simulation

Mode	Fréquence (Hertz)	Type de mode
1	16,1	Flexion plancher
2	16,7	Flexion plancher
3	16,9	Flexion plancher
4	18,3	Flexion d'ensemble
5	18,7	Flexion plancher
6	19,1	Flexion d'ensemble

La figure ci-dessous montre la vue déformée du premier mode à 16,1 Hertz. Ce mode correspond principalement à un mode de flexion du plancher du deuxième étage, qui est un peu plus souple que celui du 1<sup>er</sup> étage du fait de la position des parois verticales. A noter qu'un mode de vibration est représenté à une constante près, le déplacement est fortement amplifié ici pour aider à la visualisation.

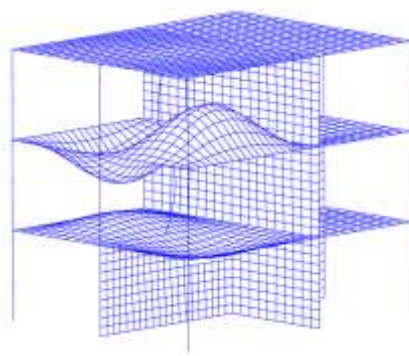


Figure 48 : Représentation du 1<sup>er</sup> mode de vibration de la structure AdivBois

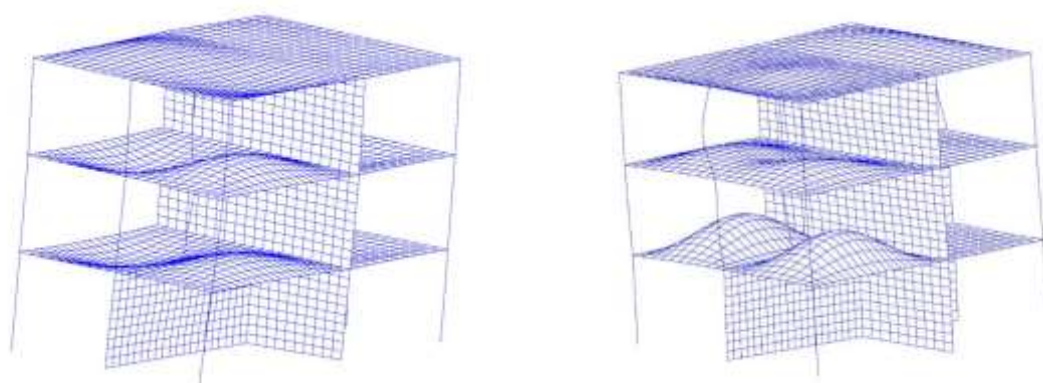


Figure 49 - Modes de flexion d'ensemble de la structure AdivBois

La structure modélisée est légèrement plus raide que la structure réelle mais a néanmoins un comportement modal similaire.

Ensuite, nous avons exécuté une simulation de ballon d'impact. Le signal du ballon a été appliqué au deuxième étage (croix blanc dans la figure ci-dessous) et les accélérations sont mesurées au premier et deuxième étage (les croix noirs).

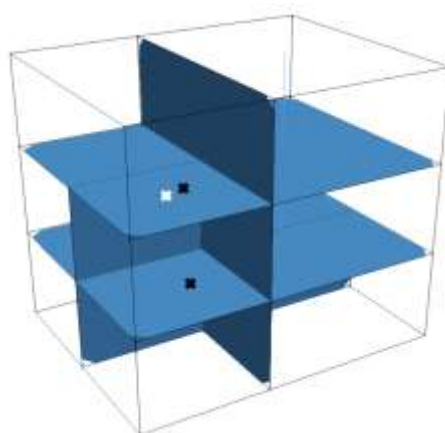


Figure 50 : Les emplacements du point d'application et des points de mesure

La figure ci-dessous montre le signal d'entrée du modèle numérique. Le signal a été représenté par une gaussienne dont les caractéristiques (amplitude maximale et temps de contact) ont été déterminé en supposant un choc quasi-parfait entre une masse ponctuelle représentant le ballon et le sol.

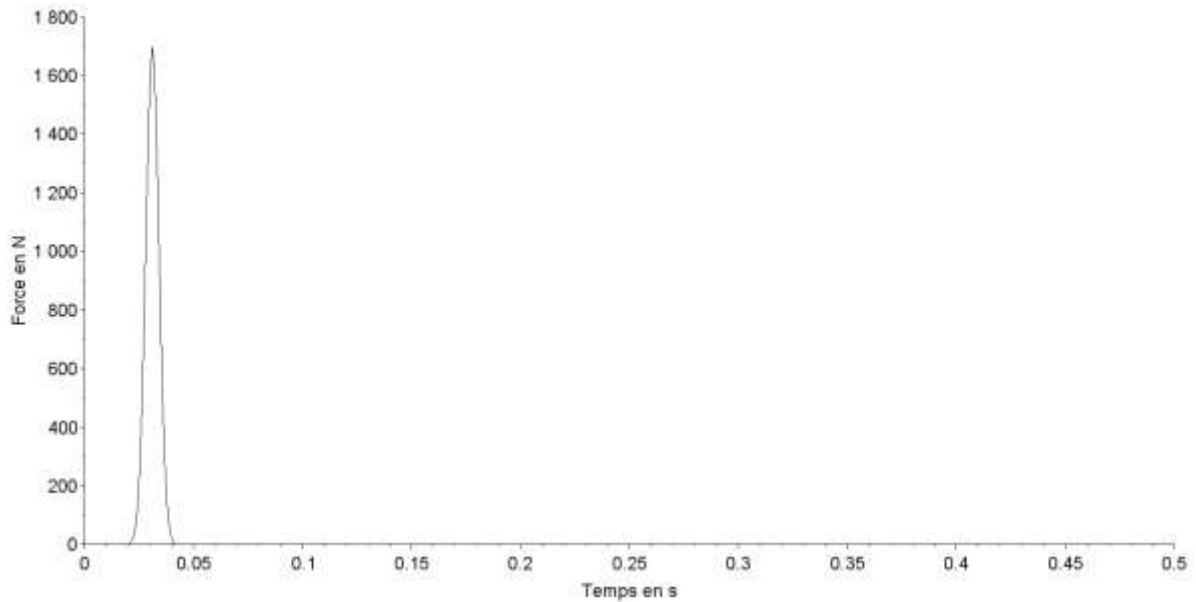


Figure 51 : Le signal du ballon d'impact qui a servi en tant qu'un signal d'entrée pour le modèle numérique

La figure ci-dessous montre les accélérations obtenues au deuxième étage et les comparaisons avec les résultats d'essai. Nous avons remarqué que les accélérations maximales et minimales sont proches. Par contre, la différence est totalement visible sur la durée d'une période du signal. Les simulations ont une fréquence plus élevée qui vient de la non-modélisation de la souplesse des liaisons. L'amortissement visqueux de la structure a été déterminé pour coller au mieux avec les résultats expérimentaux.

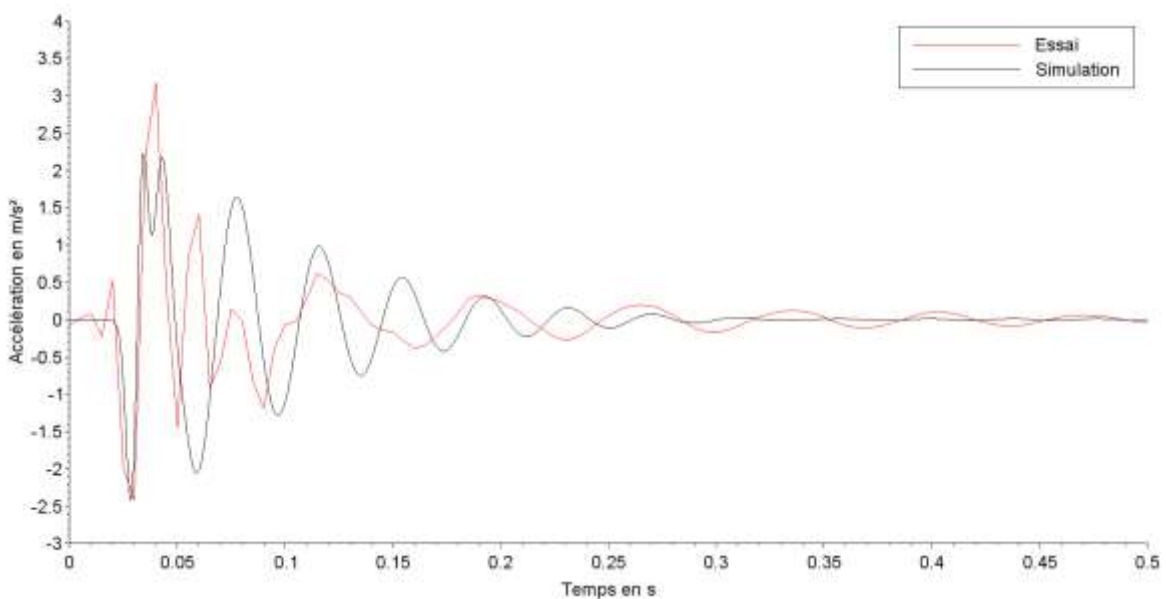


Figure 52 : La comparaison des accélérations au deuxième étage

La figure ci-dessous montre les accélérations entre l'essai et la simulation au premier étage. Comme au deuxième étage, la fréquence du plancher est différente pour les deux configurations. De la même façon, l'amortissement est calé de façon à correspondre aux données expérimentales.

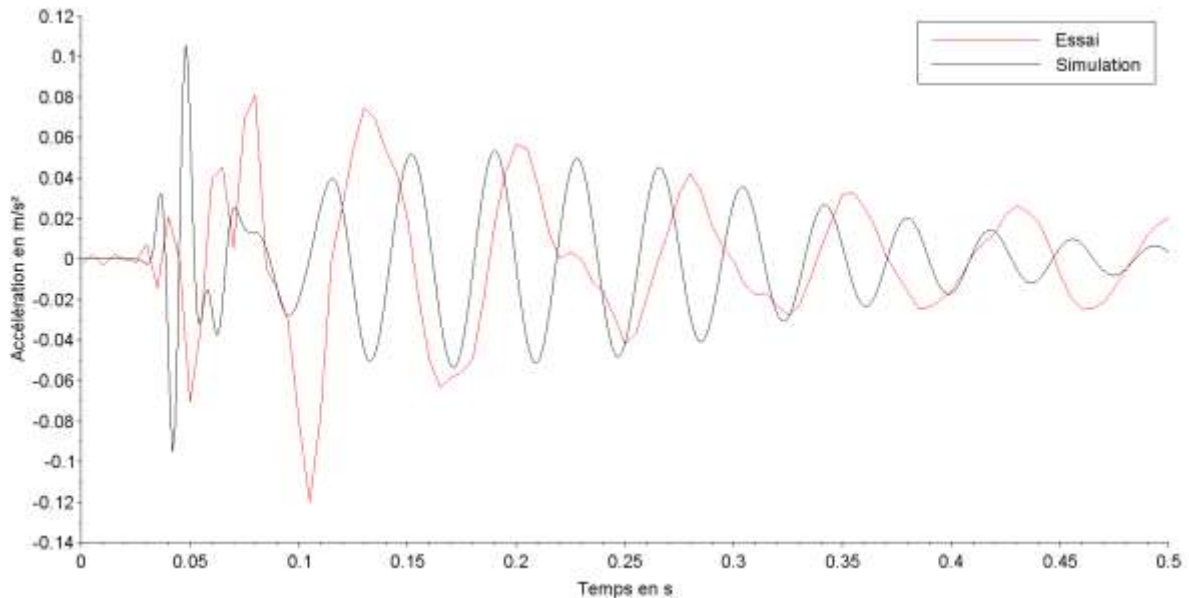


Figure 53 : La comparaison des accélérations au premier étage

Le modèle numérique montre qu'un amortissement visqueux autour de 4%-4,5% est nécessaire pour représenter la dissipation d'énergie lors d'un impact à basse fréquence. On observe néanmoins que la dissipation expérimentale est fortement non-linéaire, ce qui traduit des effets de frottements ou de contacts. L'amortissement de la structure sera donc très différent suivant l'amplitude de la sollicitation. L'amortissement équivalent pour des événements de plus faibles amplitudes (effet du vent sur les parois du bâtiment par exemple) est probablement plus faible.

## 12.4 Conclusion et perspectives pour le modèle numérique

Le modèle numérique de la structure AdivBois permet de représenter la dynamique de ce système complexe, notamment la réponse en vibration. La modélisation des liaisons est une problématique complexe sur laquelle le travail reste à faire et qui aura un impact important sur la réponse vibratoire du bâtiment.

Sur la base de ce modèle, nous pourrions envisager de tester de nombreux signaux représentatifs de transport routier ou ferroviaire pour vérifier le niveau de transmission entre les étages et définir la sensibilité des structures à dominante bois à différents signaux de vibration.

# Avancée de la réglementation

## 13 Résumé des travaux sur les risques de dommages

L'article 91 de la loi LOM traite de deux problématiques : la résistance des structures aux dommages générés par la vibration et la notion de gêne tactile. Le 1<sup>er</sup> aspect traité est concerné à la problématique des dommages. Nous présentons ici la synthèse des travaux menés autour de la notion de dommage. A noter que certaines questions ne sont pas encore résolues à l'heure où nous écrivons ce rapport.

Les catégories de vibrations prises en compte sont les suivantes :

- Vibrations impulsionnelles isolées et rares
- Vibrations impulsionnelles à impulsions répétées ou intermittentes (engin de battage, compacteur)
- Vibrations continues ou assimilées (ferroviaire, routier)
- Tir de mines

Le comité de rédaction de la note de synthèse s'est basé sur le formulaire du 23 juillet 1986 en terme de méthodologie. Il a été cependant étendu à tout type d'ouvrages. Les bâtiments sont classés en trois niveaux de sensibilité, dépendant de la nature du bâtiment mais aussi du sol et du type de fondation. Le classement est défini par un tableau de ce type, suivant la catégorie de construction (entre A et F), le type de fondation (entre I et III) et le type de sol (entre 1 et 6).

Ensembles	Catégories de constructions (vibrations acceptables décroissantes)						
	A	B	C	C	D	E	F
	1er et 2ème groupes	1er et 2ème groupes	1er groupe	2ème groupe	1er et 2ème groupes	1er groupe 2ème groupe	≤ R+8 (inférieur ou égal à 26m)
Constructions résistantes	I1 I2	I1, I2, II1, I3, II2	I1, I2, III1, II2	I1, I2, I3			I1, I2, I3, II1, II2
Constructions sensibles		II3, I5	I3, I4, I5, II3, II4, III1, III2,	I4, I5, II1, II2, II3, II4, II5, III1, III2, III3	III1 II2, III1 II3, II4, III3 II5, III3	II1, II2, III1, II3, III2	II3, I4, II4, III1, III2, I5
Constructions très sensibles		II5	II5, III3, III4, III4	III4 III5	III4, , III5	III3, II4, III4, II6, III6	II5, III5

La méthode de mesure envisagée est celle de la NF EN 90-020-1 (Vibrations et chocs mécaniques - Méthodes de mesurage et d'évaluation - Partie 1 : Mesurage et évaluation des réponses des structures aux vibrations générées par les activités humaines). La question de la zone de mesurage reste en suspens (en base du bâtiment ou au point d'amplitude maximale).



Dans les cas des bâtiments bois > R+2 et < R+8, il était prévu initialement de les classer dans une catégorie à part, comme les monuments historiques et les ruines. Pour ces bâtiments particuliers, une étude préalable aurait été nécessaire pour justifier de la sensibilité du bâtiment. Après échanges, ces bâtiments ont finalement été classés dans les mêmes catégories que les bâtiments moyennes hauteurs réalisés avec les autres matériaux.

Pour chaque classe de sensibilité, des seuils maximaux, définis en vitesse crête-crête, seront définis suivant les gammes de fréquences excités.

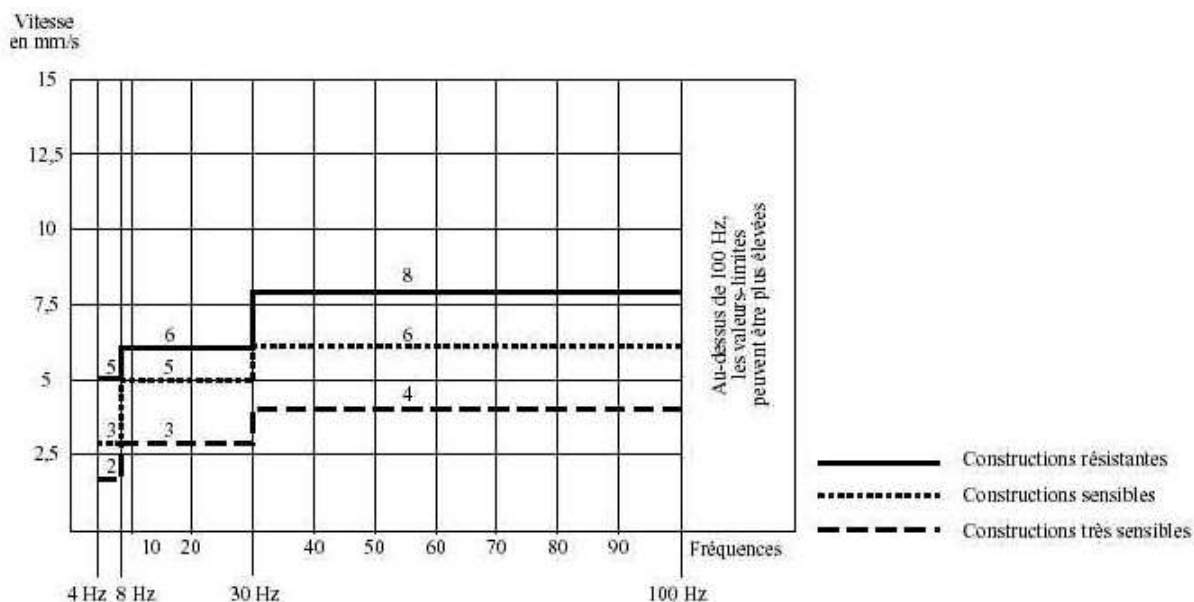


Figure 54 - Extrait d'un graphe du circulaire de 86 présentant des seuils de dommages. La même méthodologie sera employée mais les valeurs de seuils ne seront pas les mêmes.

Les niveaux des seuils sont différents suivant le point de mesure (fondation ou aux étages). Le document devrait faire l'objet d'un retour des ministères début 2023.

## 14 Présentation du draft pour la perception des gênes tactiles

Le draft sur la perception de gêne tactile vise à définir des seuils pour assurer le confort vibratoire des bâtiments à proximité de voies de chemins de fer ou d'axes routiers. Le document ne traite que du cas des constructions de nouvelles lignes ou de construction de nouveaux bâtiments à proximité de ligne existante. De la même façon, un retour des ministères est attendu en 2023, et certaines questions peuvent rester en suspens.

Les seuils prédéfinis pourraient être modifiés dans les 3 ou 5 prochaines années. Le signal d'intérêt pour la problématique du confort serait dans la plage [1-90Hz]. Il est proposé de réaliser jusqu'à 3 mesures, une en fondation, une en milieu de plancher au niveau d'intérêt et éventuellement une à l'emplacement où le ressenti est le plus fort. Deux indicateurs sont retenus : la valeur efficace mobile  $L_{vmax,1s}$  (comme utilisé dans le cadre de ce document) ou un indicateur sur la durée d'un évènement ( $L_{vqevent}$ ).

Les seuils seront différents suivant les périodes : une période jour de 6h à 22h et une période nuit de 22h à 6h avec des seuils plus restrictifs. Les catégories et sous-catégories de bâtiments qui pourraient être considérés comme particulièrement concernés doivent encore faire l'objet de discussion. Pour le reste, des seuils de vibrations sont proposés hors point singulier (ex : appareil de voie, joint sur voies...)

Tableau 9 - Valeur des seuils concernant la gêne tactile. Ces seuils pourront être modifiés dans le document final.

TYPE DE STRUCTURES	PERIODE	LVMAX,1S	LVEQEVENT
BATIMENTS	Jour	72db ou 0,2mm/s	66dB
	Nuit	69db ou 0,14mm/s	
ACTIVITES SENSIBLES		Etudes spécifiques à mener	

## 15 Prochaines étapes

Les notes de synthèses des experts concernant les risques de dommages et la gêne tactile ont été transmises aux DG. Le projet d'arrêté suivra la procédure classique de consultation de ce type de texte réglementaire : avis du CNB, avis du CNEN et consultation du public au titre du code de l'environnement.

## Outil technologique reconnu

FCBA et ses équipes d'experts accompagnent les entreprises des filières forêt-bois et ameublement dans l'amélioration de leur compétitivité sur leur marché

L'Institut met à disposition de ces entreprises le savoir-faire de ses ingénieurs et techniciens et la technologie de ses laboratoires, accompagne les professionnels dans la normalisation, l'amélioration de la qualité de leurs produits et les aide à intégrer les innovations technologiques. FCBA diffuse également de l'information scientifique et technique, fruit de son expertise en recherche et développement et veille technologique, économique et documentaire.

### Aide à la conception et à l'innovation

Concevoir et construire avec le bois, respecter les normes et la réglementation. Pour l'ameublement, concevoir par l'usage et proposer des matériaux innovants avec le centre de ressources INNOVATHEQUE.

### R & D

Être le porteur de l'innovation technologique pour permettre le développement des entreprises.

### Centre de formation

Développer votre savoir-faire et vos compétences avec nos formations catalogue ou sur-mesure.

### Bureau de normalisation

Animer et coordonner les travaux de normalisation du bois et des produits dérivés du bois et de l'ameublement.

### Organisme certificateur

Marquage CE/RPC, CTB, NF, OFG, PEFC, FSC...

### Laboratoires à la pointe

Chimie, physique, mécanique, biologie, finition, feu, biosourcés, matériaux...



INSTITUT  
TECHNOLOGIQUE

## Pour nous rejoindre

---

### SIÈGE SOCIAL

10, rue Galilée  
77420 Champs-sur-Mame  
+33 (0)1 72 84 97 84

---

### BORDEAUX

Allée de Boutaut - BP227  
33028 Bordeaux Cedex  
+33 (0)5 56 43 63 00

---

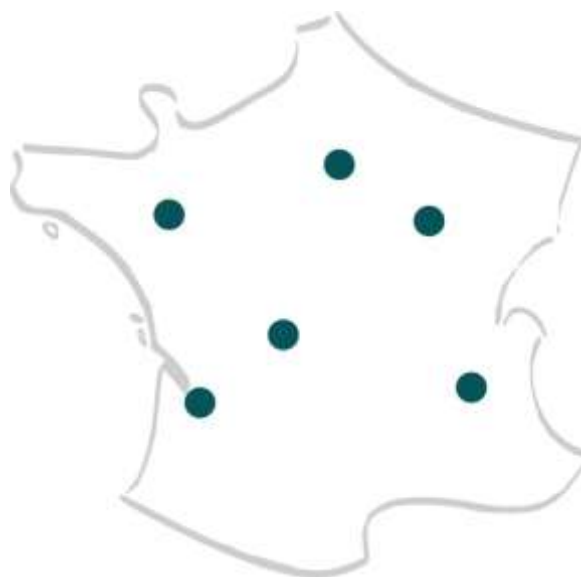
### GRENOBLE

Domaine Universitaire  
CS 90251  
38044 Grenoble Cedex 9  
+33 (0)4 56 85 25 30

---

### CESTAS-PIERROTON

71, route d'Arcachon  
33610 Cestas  
+33 (0)5 56 79 95 00



### NANTES

15, boulevard Léon Bureau  
44200 Nantes  
+33 (0)6 80 34 38 63

---

### CHARREY-SUR-SAÔNE

60, route de Bonnencontre  
21170 Charrey-sur-Saône  
+33 (0)3 80 36 36 20

---

### VERNEUIL-SUR-VIENNE

Domaine des Vaseix  
87430 Verneuil-sur-Vienne  
+33 (0)5 55 48 48 10



[fcba.fr](http://fcba.fr)

---

