
Rapport d'étude vibratoire

Projet PANAM : Installation d'un microscope STEM sur le site de Jussieu
Université Paris Sorbonne, site de Jussieu, Paris 5e (75)



Référence projet : AA156300
Référence document : 32603_SORBONNE_PANAM_MES-VIB_ind2_AA156300.docx
Date : 28/11/2024
Indice : 2
Destiné à : Mme Mélanie MALAURENT-HEDIDAR
Pour le compte de : SORBONNE UNIVERSITE

Ce document ne peut en aucun cas être utilisé (même par extrait) sans autorisation préalable écrite d'AVLS.

Suivi des indices

Ind.	Date	Objet de l'indice	Rédaction	Vérifications	Approbation
1	13/11/2024	Version initiale	E. LALIGANT	J. BOUNISSOU	C. LAURENT
2	28/11/2024	Ajout de l'étude d'une variante élargie de massif (§ 4.6) et de commentaires en synthèse §6.1.3	E. LALIGANT	J. BOUNISSOU	C. LAURENT

Sommaire

1. PREAMBULE	4
2. CONTEXTE	4
2.1. Situation.....	4
2.2. Local.....	5
2.3. Exigences vibratoires du microscope.....	6
3. CAMPAGNE DE MESURES VIBRATOIRES	8
3.1. Conditions de mesurage et méthodologie.....	8
3.1.1. Généralités.....	8
3.1.2. Matériel de mesure	8
3.1.3. Conditions de mesure	8
3.1.4. Points de mesure	9
3.1.5. Admittances aux points de mesure.....	9
3.2. Exemple de résultats de mesures	10
3.3. Résultats statistiques	13
3.3.1. Comparaison des points 1 et 2.....	13
3.3.2. Comparaison des résultats en journée et de nuit	15
3.3.3. Statistiques de dépassement du critère.....	16
3.4. Essais vibratoires contrôlés.....	18
3.4.1. Résiduel, CTA, marche & ascenseur.....	19
3.4.2. Local de liquéfaction	20
3.4.3. Passages de véhicules	21
3.4.4. Claquement de portes	23
4. MODELISATION DE LA STRUCTURE FUTURE	24
4.1. Méthodologie d'étude de la future structure.....	24
4.2. Paramètres du modèle et recalage.....	27
4.3. Gabarit de correction.....	28
4.4. Application aux données mesurées	30
4.5. Atténuation vibratoire requise	31
4.6. Variante élargie de massif.....	32
5. SOLUTIONS D'ISOLATION VIBRATOIRE	37
5.1. Solutions passives	38
5.1.1. MinusK – Appuis à raideur négative.....	38
5.1.2. Bilz – BiAir Horizontal + Vertical.....	39
5.2. Solutions actives	41
5.2.1. TMC Stacis.....	41
5.2.2. Table Stable - AVI.....	42
5.3. Synthèse des solutions antivibratiles envisageables.....	45
5.4. Exemples de dimensionnement de plateforme désolidarisée	46
6. SYNTHESE ET CONCLUSION	51
6.1. Synthèse.....	51
6.1.1. Campagne de mesures.....	51
6.1.2. Etude numérique de la structure future	52
6.1.3. Etude de solutions antivibratiles.....	52
6.2. Conclusion.....	53
ANNEXE 1. TERMINOLOGIE	54
ANNEXE 2. PHOTOGRAPHIES DES CAPTEURS	57

1. PREAMBULE

Dans le cadre du projet PANAM d'aménagement d'un local de microscopie sur le site de Jussieu, une campagne de mesures vibratoires a été menée par AVLS afin de :

- Caractériser l'environnement vibratoire du site pendant une longue durée,
- Evaluer l'effet de sources vibratoires identifiées,
- Déterminer les principales caractéristiques dynamiques de la structure existante pour l'étude d'extrapolation à la structure future.

Ces mesures ont été réalisées du 29/08/2024 au 03/09/2024.

Le présent rapport présente :

- La méthodologie adoptée,
- Les résultats de mesures,
- La comparaison aux exigences vibratoires du microscope,
- Les études numériques d'extrapolation à la structure future,
- Les solutions antivibratiles envisageables dans la situation constatée.

L'Annexe 1 fournit la définition des différents termes, unités et seuils utilisés dans le rapport.

2. CONTEXTE

2.1. Situation

Le plan ci-après permet de visualiser l'environnement du projet et les sources vibratoires ferroviaires et routières.

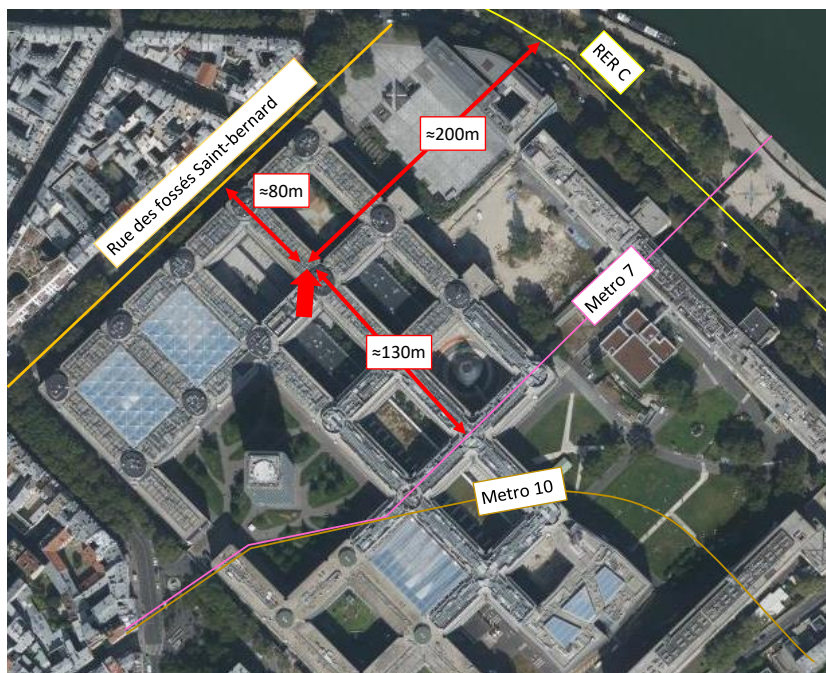


Figure 1 : Localisation du local microscope dans le site

Le projet est situé dans l'enceinte du campus de Jussieu (flèche rouge), la source de vibrations extérieure au site la plus proche est la rue des fossés Saint-Bernard à environ 80 mètres. On note que la chaussée de cette rue est en mauvais état et est fréquemment circulée par des bus.

2.2. Local

Le local qui va accueillir le microscope électronique se situe entre le rez-de-chaussée et le R-1. Les photographies ci-dessous présentent les deux étages à l'état présent.



Figure 2 – Vue de la future salle microscope au RdC



Figure 3 – Vue de la future salle microscope au R-1

La future installation du microscope est schématisée en coupe ci-dessous. Le microscope sera posé sur un ensemble {massif fondé sur pieux + système d'isolation vibratoire} désolidarisé de la structure courante du bâtiment. Cet ensemble permet de positionner l'équipement au niveau RDC en traversant le niveau de sous-sol. On note qu'un complexe de protection électromagnétique doit être inséré entre la tête de massif et le microscope.

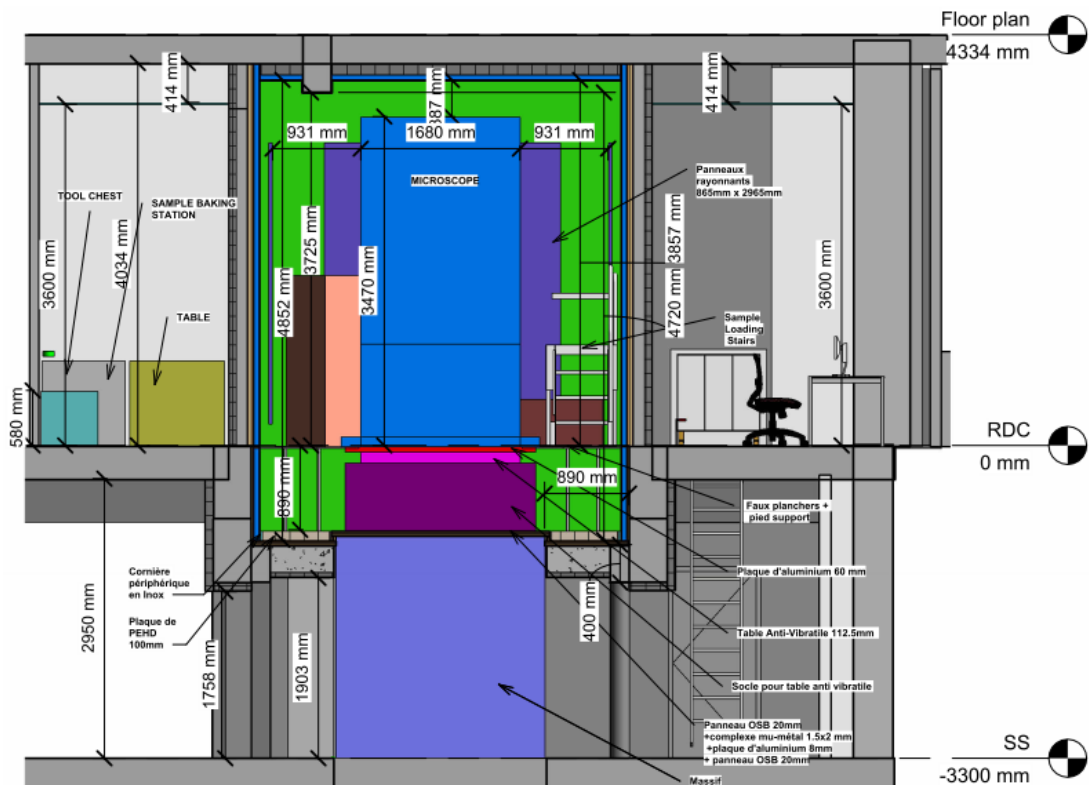


Figure 4 : Vue en coupe du futur aménagement du local microscope

2.3. Exigences vibratoires du microscope

La référence du microscope est UltraSTEM 200MC du fabricant NION. La notice d'installation comprend les spécifications vibratoires rappelées dans la figure suivante.

4) Floor Vibrations

Measuring with a 1/3-octave bandwidth, for each frequency band the rms vibration needs to be less than 1.0 $\mu\text{m/s}$ for frequencies between 0.5 Hz and 2 Hz and less than 0.5 $\mu\text{m/s}$ for frequencies between 2 Hz and 500 Hz. These specifications refer to the floor that the microscope suspension system rests on. If the microscope is positioned on a vibration-isolated platform, the specification refers to this platform.

If there is a vibration-isolated platform the microscope sits on, such as the TMC Stacis system supporting the microscope's platform (<http://www.techmfg.com/products/stacis/stacisiii>, <http://www.techmfg.com/products/stacis/quiteisland>) the platform should be at least 2.0 x 2.2 m in size, so that there is room on it for a) the microscope, b) the microscope cover and c) cable support frame, which needs to be located on the isolated platform so that cables do not bring vibrations to the column. If a passive isolation is used for the platform, the platform needs to be around 4000 kg or more in weight, otherwise the platform's suspension and the Nion suspension may couple to produces strong resonant frequencies. If the platform uses active suspension, then it can be lighter: 2000 kg or more.

*Because external vibrations are somewhat unpredictable, it is a good idea to have a safety margin such that **typical** vibrations throughout the day are at least 2x weaker than the levels given above, i.e. <0.5 $\mu\text{m/s}$ for frequencies between 0.5 Hz and 2 Hz and <0.25 $\mu\text{m/s}$ for frequencies between 2 Hz and 500 Hz.*

Figure 5 : Spécifications vibratoires du NION UltraSTEM 200MC

Les exigences sont donc exprimées sous forme de spectre de vitesse par bandes de tiers d'octave. Le critère vibratoire à respecter s'applique à la structure accueillant le microscope donc, dans le cas présent, à l'arase supérieure du socle antivibratile.

Les conditions de mesurages pour comparaison à ce critère ne sont pas précisées. On ne sait pas notamment s'il faut le comparer à un spectre vibratoire instantané (valeur sur 1 seconde par exemple) ou à un spectre moyenné sur une certaine durée (moyenne sur un évènement vibratoire tel qu'un passage de véhicule par exemple). Plusieurs hypothèses seront considérées dans la suite du rapport (max 1s et statistiques par indices fractiles).

On note qu'une notion de marge de sécurité d'un rapport 2 est suggéré par rapport à ce critère.

La figure suivante représente le critère en dB_v comparativement aux gabarits vibratoires « VC » de l'ASHRAE couramment utilisés dans le contexte de laboratoires. Une description de ces gabarits est fournie en Annexe 1.

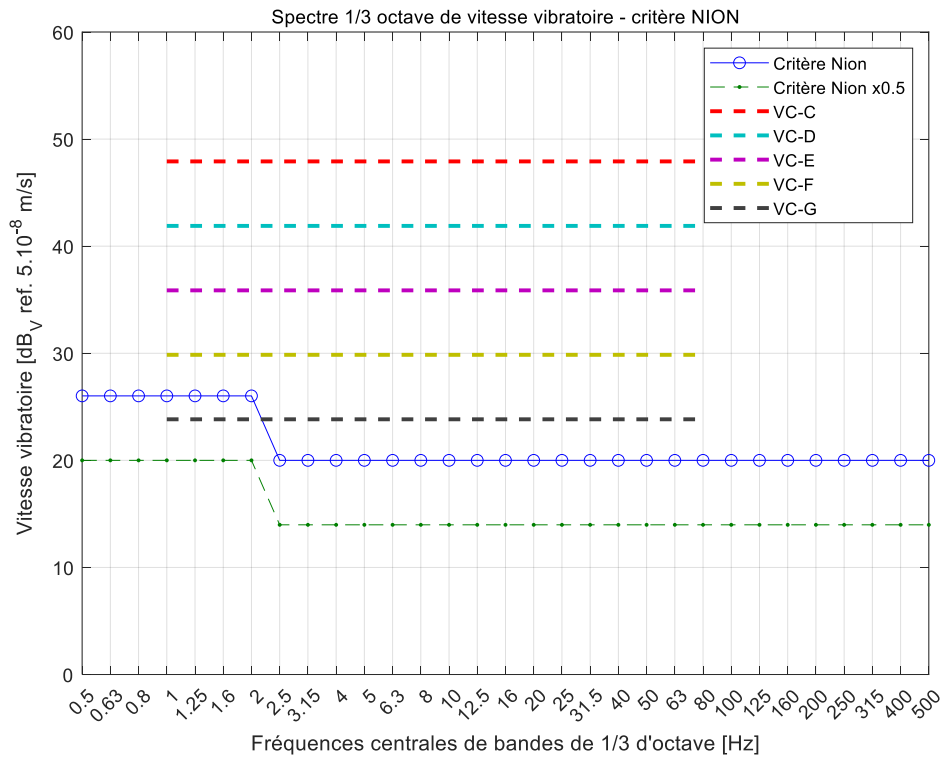


Figure 6 : Seuils vibratoires du NION UltraSTEM 200MC comparés aux gabarits ASHRAE

Le critère du microscope représente des niveaux vibratoires extrêmement faibles de l'ordre du gabarit VC-G, ce qui est rarement mesuré sur site, a fortiori lorsque des sources vibratoires sont proches (routes, voies ferrées, activité humaine...).

3. CAMPAGNE DE MESURES VIBRATOIRES

3.1. Conditions de mesurage et méthodologie

3.1.1. Généralités

La campagne de mesures a consisté en l'enregistrement des niveaux vibratoires de façon continue en 2 points de mesure dans les trois directions de l'espace. Les mesures se sont déroulées du 29/08/2024 au 03/09/2024.

La fréquence d'échantillonnage était de 2048 Hz.

3.1.2. Matériel de mesure

- 2 vélocimètres tridirectionnels IDETEC 1.0 Hz 29 V/ms-1,
- 1 système d'acquisition 12 Voies PXI 4462,
- 1 PC portable,
- 1 marteau d'impact PCB 086D20 0.24 mV/N – 22 kN crête.

3.1.3. Conditions de mesure

Les conditions de mesures sur la période d'acquisition sont les suivantes :

- Les 29 et 30 août sont considérées relativement calmes sur le site car avant la rentrée des étudiants,
- Les 2 et 3 septembre comprennent la rentrée universitaire et donc potentiellement une plus grande activité du site,
- Les 31 août et 1^{er} septembre sont en weekend donc l'activité interne du site est censée être très calme,
- Les vélocimètres ont été fixés rigidement à la structure béton par des chevilles,
- Le revêtement de sol du plancher bas sous-sol avait été retiré cependant une sous-couche adhésive subsistait par endroits ; les points ont été positionnés de façon à éviter ces zones,
- Les sources vibratoires internes au bâtiment suivantes ont été identifiées :
 - o Activité du local technique « Liquéfaction » : compresseurs et circulation d'un chariot élévateur,
 - o Fonctionnement d'équipements techniques proches (CTA et split de climatisation),
 - o Claquement de portes dans le bâtiment,
 - o Circulations routières sur la voie de desserte interne,
 - o Marche piétonne dans le bâtiment,
 - o Ascenseur.
- Les sources vibratoires externes au site sont (cf. Figure 1) :
 - o La circulation routière sur la rue des fossés Saint Bernard et autres voies plus éloignées,
 - o Le passage de métros (lignes 7, 10 et RER C)

Le local de liquéfaction comprend 3 compresseurs générant des vibrations notables :

- *Compresseur n°1 : compresseur de récupération à piston le plus petit,*
- *Compresseur n°2 : compresseur de récupération à piston le plus imposant,*
- *Compresseur n°3 : compresseur Kaiser à vis.*

3.1.4. Points de mesure

Le tableau suivant présente la position des points de mesure et leur dénomination.

Point de mesures	Localisation	Observations
1	En pied de poteau structurel – Niveau PB R-1	Ce capteur vise à caractériser les niveaux vibratoires sur un point raide de la structure
2	Sur le plancher bas R-1	Ce capteur vise à caractériser les niveaux vibratoires à l'emplacement des futures fondations du microscope

Les points de mesures sont repérés sur le plan ci-dessous.

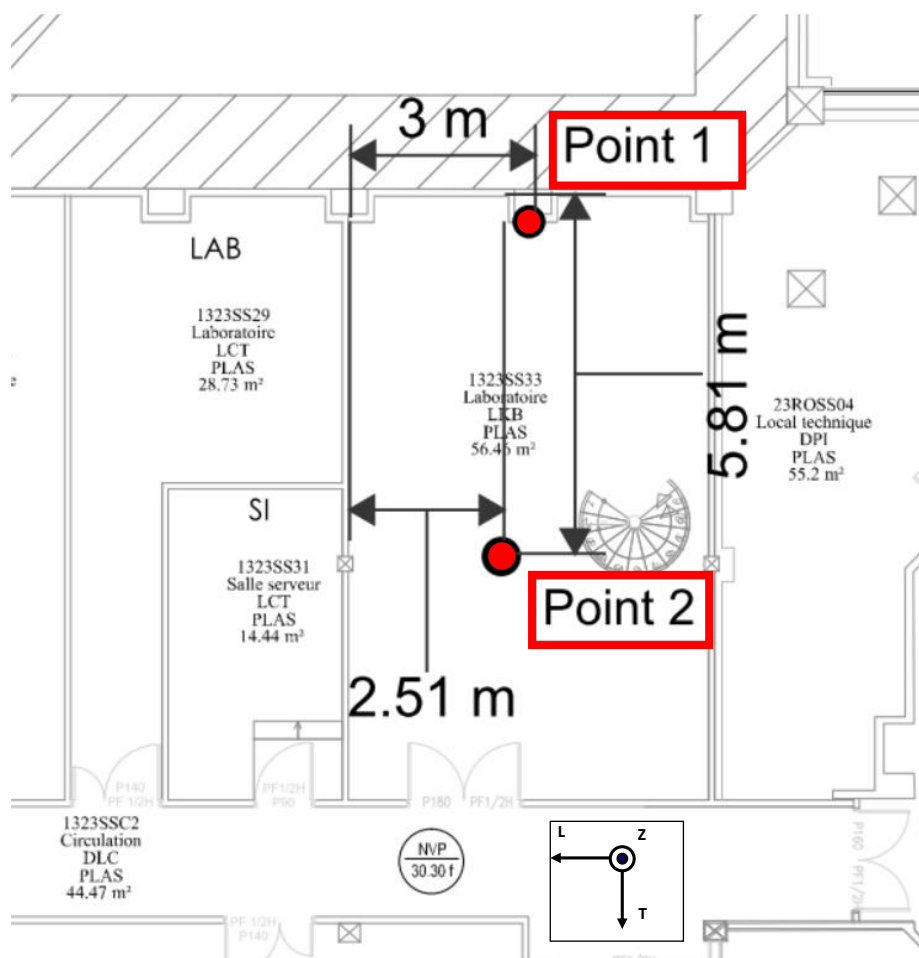


Figure 7 : Localisation des points de mesures

Les photographies des points de mesure sont présentées en Annexe 2.

Les directions de mesure seront notées par la suite Z : vertical, L : longitudinal, T : transversal.

3.1.5. Admittances aux points de mesure

Une mesure d'admittance permet de tracer le rapport de la réponse vibratoire par rapport à une force unitaire injectée (unité = (m/s)/N) : elle caractérise la rigidité et l'inertie du support. A l'aide d'un marteau instrumenté, une force connue est donc injectée à proximité du capteur ; le signal de vitesse vibratoire résultant est relevé permettant ainsi le calcul de l'admittance.

La cohérence est également tracée (la cohérence permet d'estimer la causalité de la réponse par rapport à l'excitation – elle vaut 1 lorsque le signal de sortie est entièrement causé par le signal d'excitation ; 0 dans le cas contraire).

La figure suivante présente les admittances des directions mesurables des points de mesure.

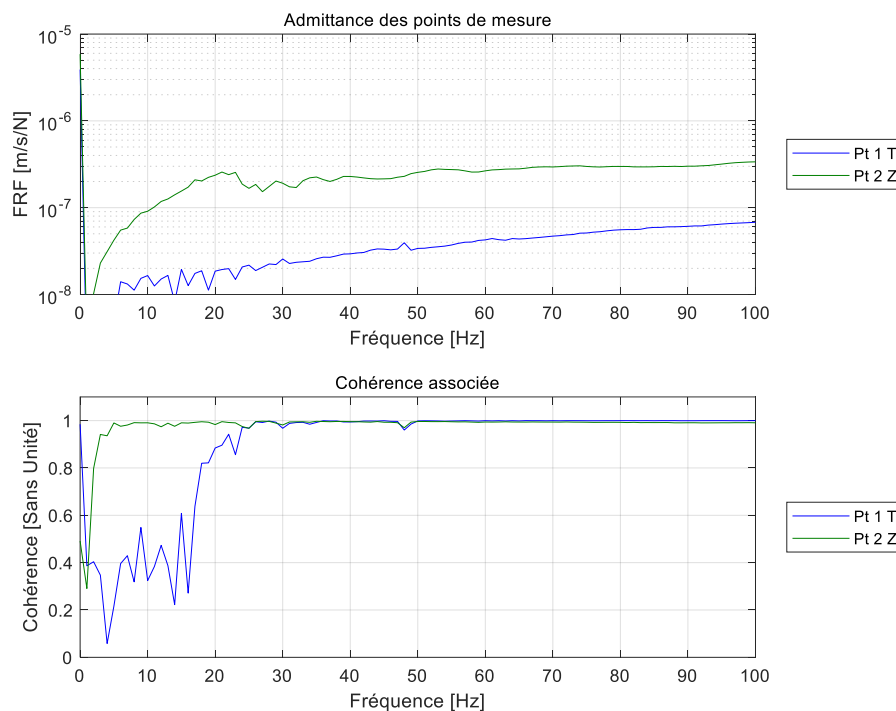


Figure 8 : Admittances mécaniques - Point 1 dir. T & Point 2 dir. Z

On constate que :

- L'admittance transversale au point 1 reste inférieure à $7 \cdot 10^{-8}$ m/s/N en dessous de 100 Hz, ce qui témoigne d'un point particulièrement raide et massif ne présentant pas de résonance en basses fréquences ;
- L'admittance verticale au point 2 atteint environ $2 \cdot 10^{-7}$ m/s/N en dessous de 100 Hz, ceci est également représentatif d'une structure raide et massive. On note une légère amplification vibratoire centrée à 22 Hz mais elle est très amortie.

3.2. Exemple de résultats de mesures

On présente ci-dessous pour exemple les résultats de mesures au passage d'un bus passant sur la rue des fossés Saint-Bernard. Le signal temporel enregistré au point 2 (directions Z, L et T) est présenté ainsi que les spectres FFT associés jusqu'à 200Hz.

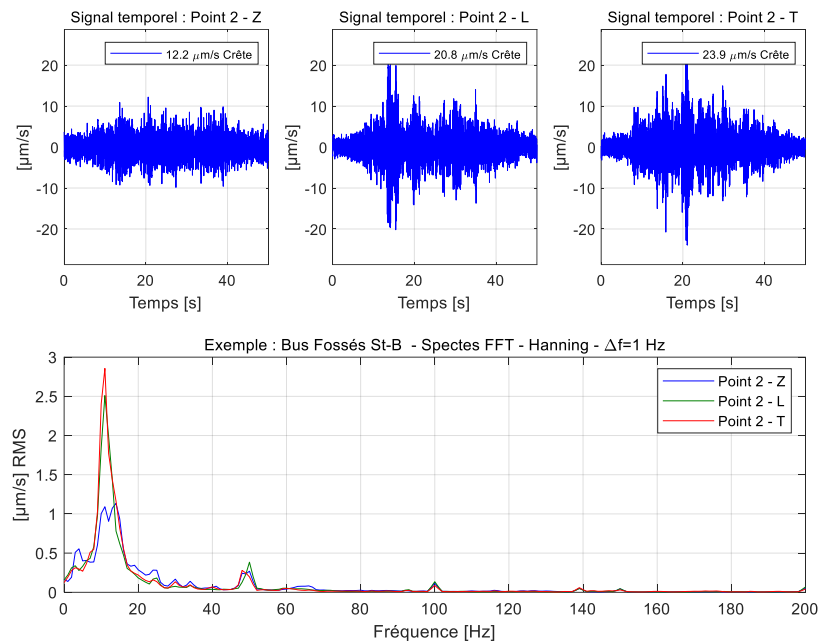


Figure 9 : Signaux temporels de vitesse et spectres associés lors d'un passage de bus – Point 2

On remarque nettement le passage de bus sur les signaux temporels, en particulier dans les directions horizontales L et T de 10s à 40s environ. Les niveaux de vitesses vibratoires crêtes atteignent de $12.2 \mu\text{m/s}$ (direction Z) à $23.9 \mu\text{m/s}$ (direction T).

Les spectres FFT associés à ces signaux présentent un pic d'amplitude autour de 10Hz-12Hz qui est plus marqué dans les directions L et T.

On note des niveaux légèrement marqués aux fréquences 4Hz (Z), 50Hz et 100Hz.

Pour caractériser les amplitudes de vibrations atteintes par rapport à des seuils couramment utilisés (gabarits « VC », cf terminologie en Annexe 1), on condense les spectres FFT sous forme de spectres par bandes de tiers d'octave et on les convertit en dBV (référence 5.10^{-8} m/s) comme présenté ci-dessous.

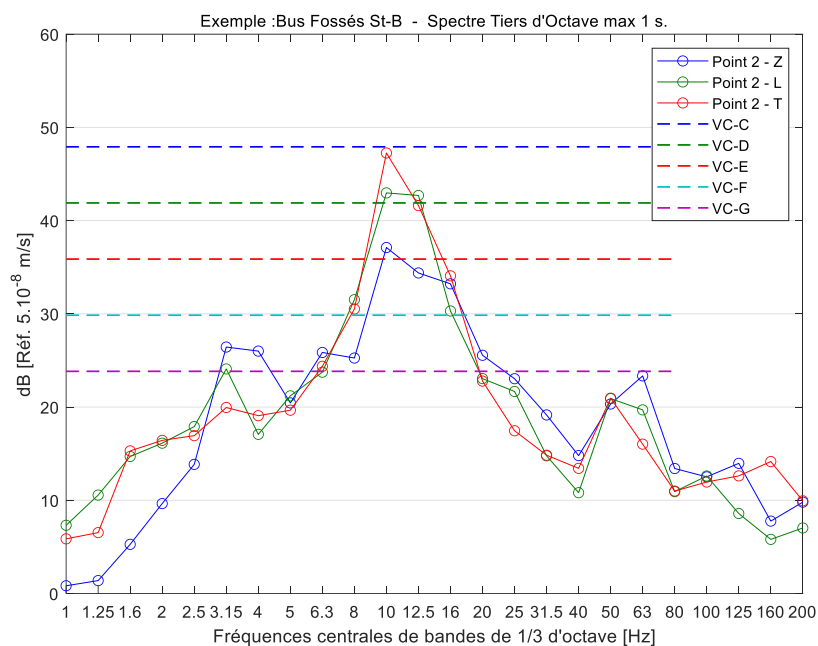


Figure 10 : Spectres de vitesse vibratoire par bandes de tiers d'octave lors d'un passage de bus – Point 2

Ces courbes présentent un maximum au tiers d'octave 10Hz avec une amplitude de 37 dB_v (direction Z) à 47 dB_v (direction T), ce qui correspond aux gabarit VC-E à VC-C.

On note donc que malgré la grande distance à la rue des fossés Saint-Bernard (80m), les vibrations engendrées au passage du bus peuvent atteindre des niveaux de l'ordre de VC-C, ce qui est incompatible avec le critère NION comme nous le verrons par la suite.

3.3. Résultats statistiques

On trace ci-dessous les spectres par bandes de tiers d'octave [1 – 400Hz] calculés sur des périodes horaires de 9 heures représentant une journée ou une nuit.

Les courbes affichées sont des indices fractiles (percentiles). La courbe L50 correspond au niveau vibratoire dépassé 50% du temps et la courbe L90, au niveau dépassé 90% du temps (cf terminologie en Annexe 1).

Les indices fractiles et la durée de dépassement cumulée associée sont listés ci-dessous :

- *Max* : maximum atteint par tiers d'octave sur 9h (il ne s'agit pas d'un évènement unique),
- *L0.1* : 32 secondes /9h,
- *L1* : 5 minutes /9h,
- *L5* : 27 minutes /9h,
- *L50* : 4.5 heures /9h,
- *L95* : 8.5 heures /9h.

3.3.1. Comparaison des points 1 et 2

On prend l'exemple des niveaux vibratoires mesurés le 02/09/2024 de 9h à 18h pour comparer les résultats aux points 1 et 2 (directions Z, L et T) dans la figure ci-dessous.

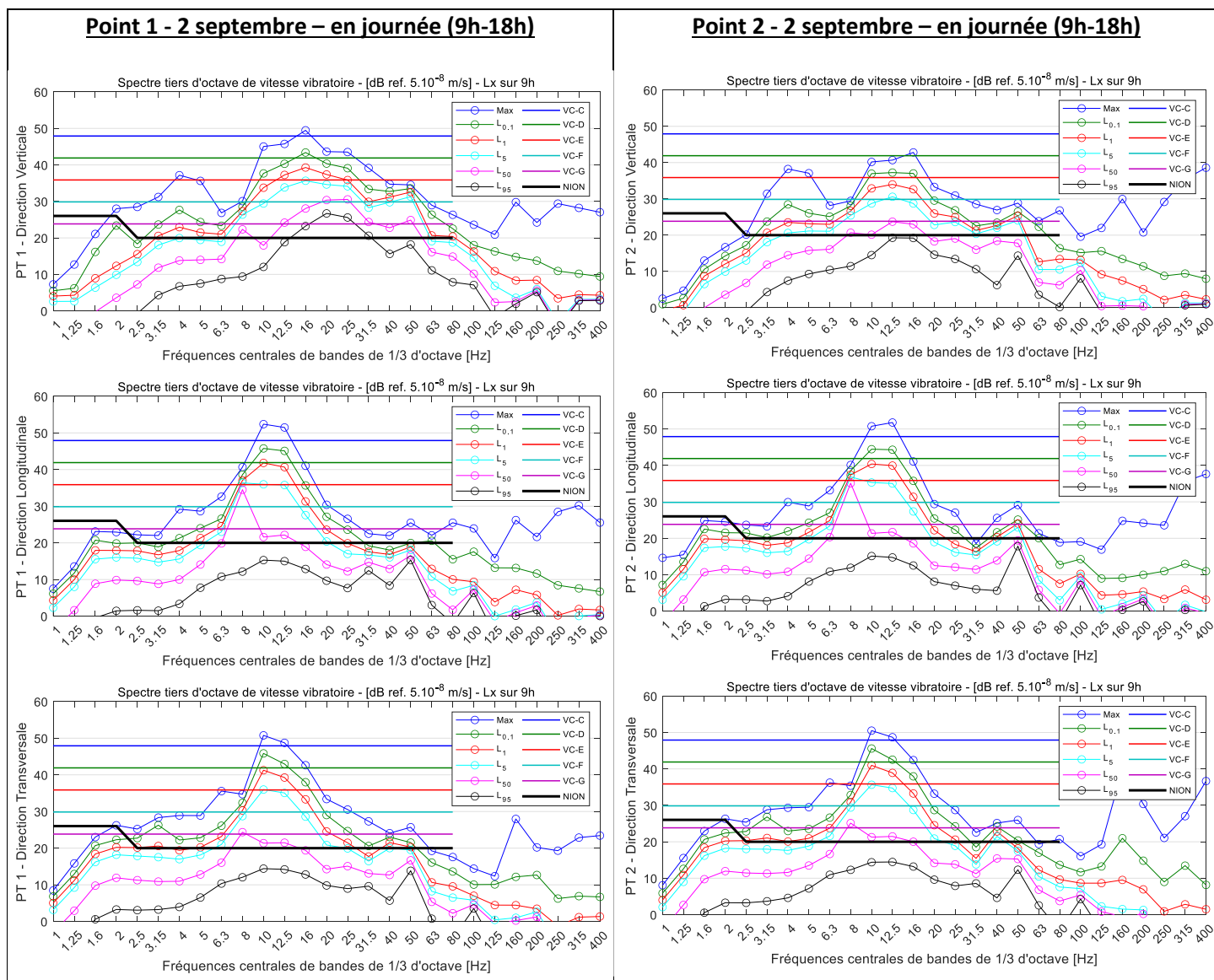


Figure 11 : Indices fractiles - Points 1 et 2 - 02/09/2024 de 9h à 18h

Observations :

- On note que la courbe « Max » correspond au maximum atteint pendant toute la période de mesures et peut correspondre à un évènement dans le local qui n'est pas représentatif de l'ambiance vibratoire usuelle,
- Dans la direction Z, les niveaux au point 1 sont plus élevés qu'au point 2.
- Dans les directions horizontales, les niveaux vibratoires aux deux points sont très proches,
- En Z au point 1, les niveaux sont maximaux au tiers d'octave 16Hz et l'indice L0.1 atteint le gabarit VC-D (42 dB_V) ; En Z au point 2, les niveaux sont maximaux au tiers d'octave 12.5Hz et l'indice L0.1 atteint le gabarit VC-E (36 dB_V) ;
- En L au point 1, les niveaux sont maximaux au tiers d'octave 10Hz et l'indice L0.1 dépasse le gabarit VC-D pour atteindre 46 dB_V ; En L au point 2, les niveaux sont similaires ; On note un pic d'amplitude à 8Hz sur le L50 correspondant vraisemblablement au fonctionnement du local technique de liquéfaction ;
- En T au point 1, les niveaux sont maximaux au tiers d'octave 10Hz et l'indice L0.1 dépasse le gabarit VC-D pour atteindre 46 dB_V ; En T au point 2, les niveaux sont similaires ;
- Le critère NION est dépassé dès l'indice L50 pour toutes les directions et les maxima de dépassement sont situés entre les tiers d'octave 10Hz et 16Hz avec des écarts dépassant 20 dB ;
- En très basses fréquences, de 1Hz à 2Hz, le critère NION est généralement respecté.

On note que les vibrations dans la plage de fréquence 8Hz – 16Hz correspondent généralement à des sollicitations routières. Les compresseurs à pistons du local de liquéfaction proche créent toutefois également des vibrations autour de 8Hz comme présenté par la suite.

3.3.2. Comparaison des résultats en journée et de nuit

Pour voir la différence entre les niveaux vibratoires de jour et de nuit, on compare dans la figure suivante les indices fractiles obtenus au point 2 en journée le 02/09/2024 de 9h à 18h et de nuit du 02/09 au 03/09 de 21h à 6h.

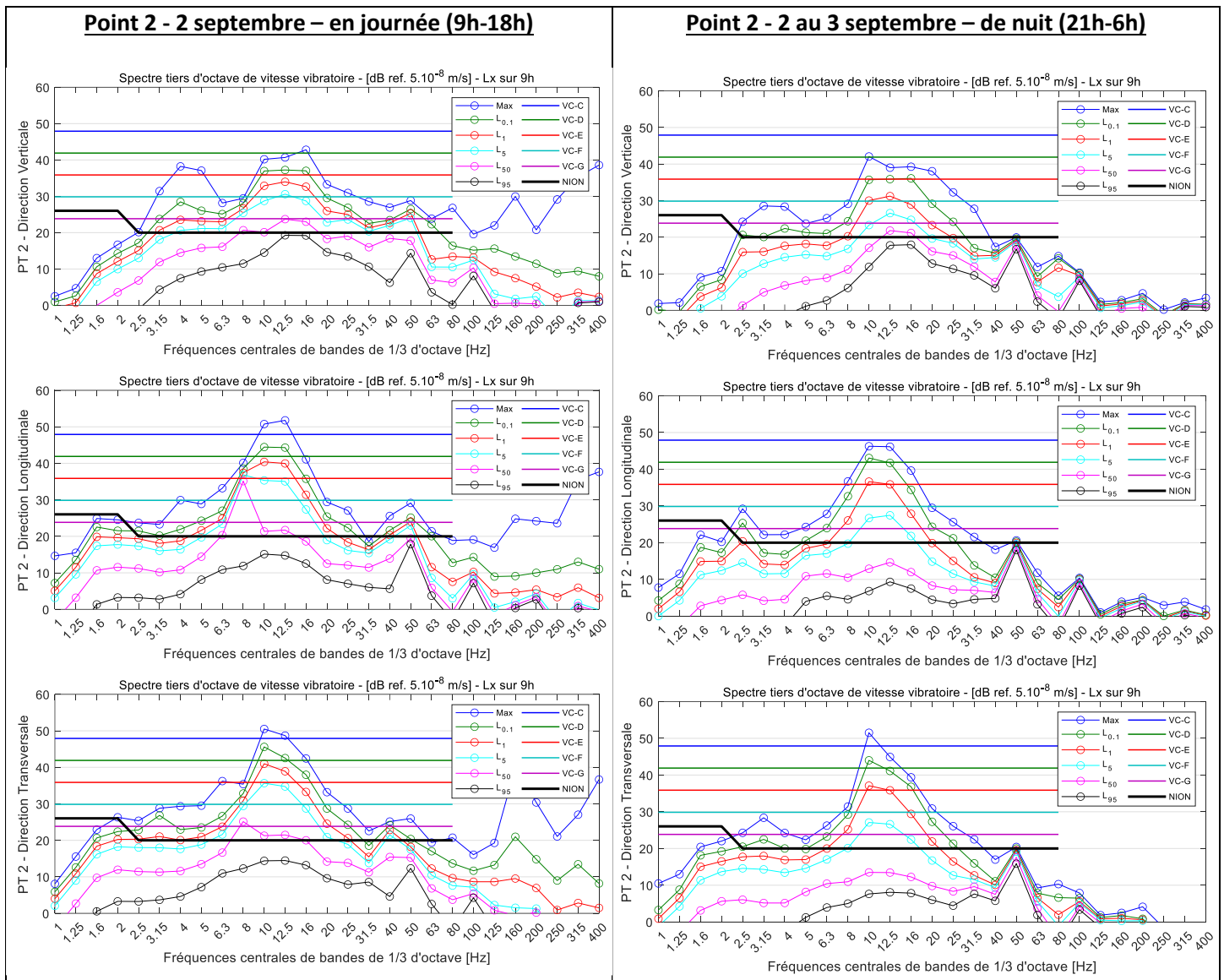


Figure 12 : Indices fractiles – Point 2 - 02/09/2024 de 9h à 18h & Nuit du 02 au 03/09/2024 de 21h à 6h

Observations :

- Dans les trois directions, on constate que les niveaux les plus élevés représentés par les indices Max, L0.1 et L1 sont légèrement réduits de nuit, de l'ordre de 3 à 5 dB ;
- Dans les directions L et T, Les indices L5, L50 et L95 montrent un affaiblissement plus notable, de l'ordre de 8 dB ;
- Le critère NION reste donc couramment dépassé de nuit.

3.3.3. Statistiques de dépassement du critère

Pour approfondir l'étude des dépassements du critère NION, l'évolution temporelle de la comparaison à chaque seconde au critère NION est tracée au point 2 dans les directions Z, L et T.

Lorsque le niveau est négatif (bleu) le critère est respecté, en positif (rouge) il est dépassé.

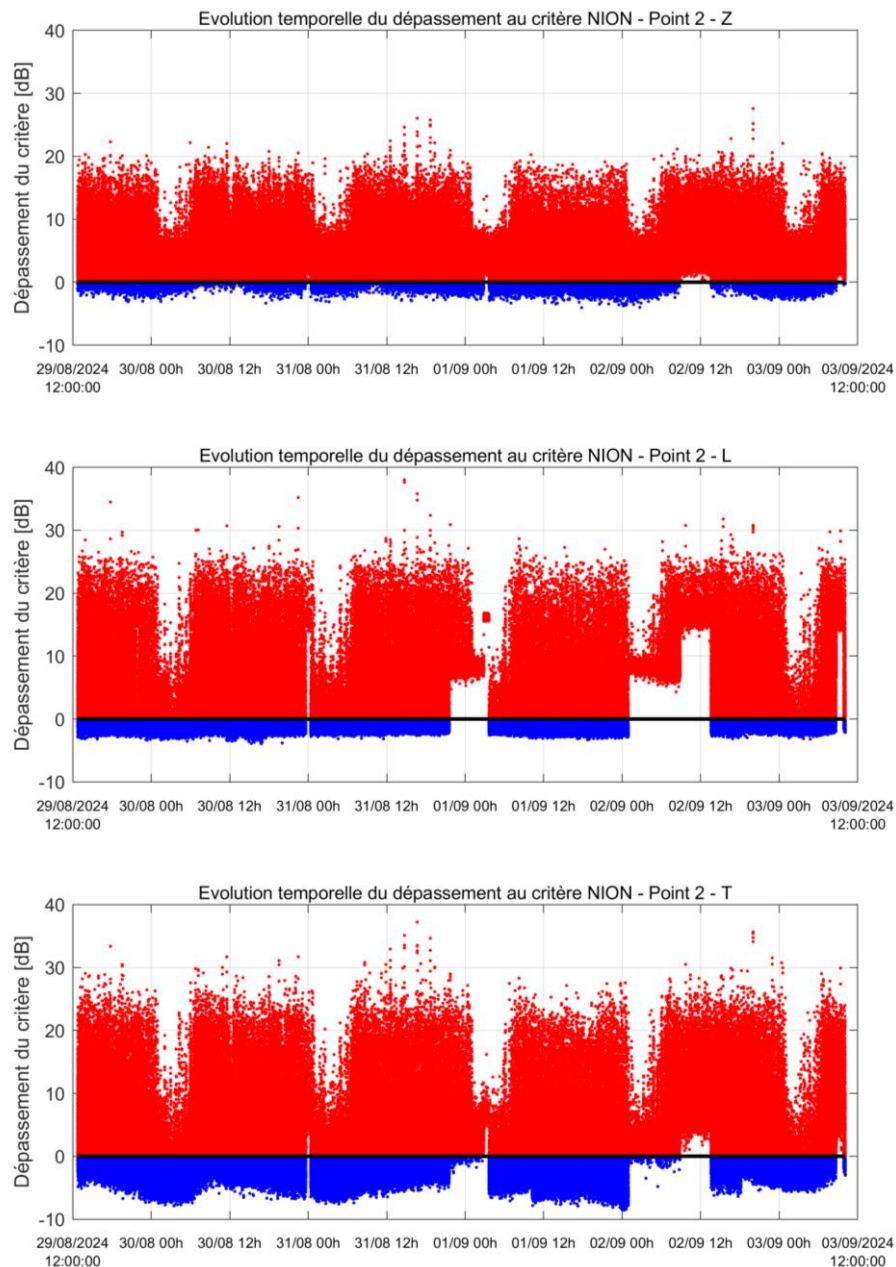


Figure 13 : Evolution temporelle de la comparaison au critère NION - Point 2

Comme vu avec les indices fractiles, le critère NION est dépassé la majorité du temps.

On constate l'effet jour/nuit avec une occurrence plus faible de pics de dépassement dans les horaires 1h-6h. Le fonctionnement des compresseurs à piston est visible en direction L les nuits du 01/09 et 02/09.

Les pics de dépassement dépassant 20 dB surviennent régulièrement tout au long de la journée avec un évènement toutes les 1 à 2 minutes (passage de véhicule vraisemblablement).

Pour étudier plus précisément les événements les plus forts, la figure suivante présente les spectres de vitesse vibratoire mesurés au point 2 pour une partie des événements associés aux pics de dépassement. Cette extraction automatique ne permet pas de déterminer l'origine des événements.

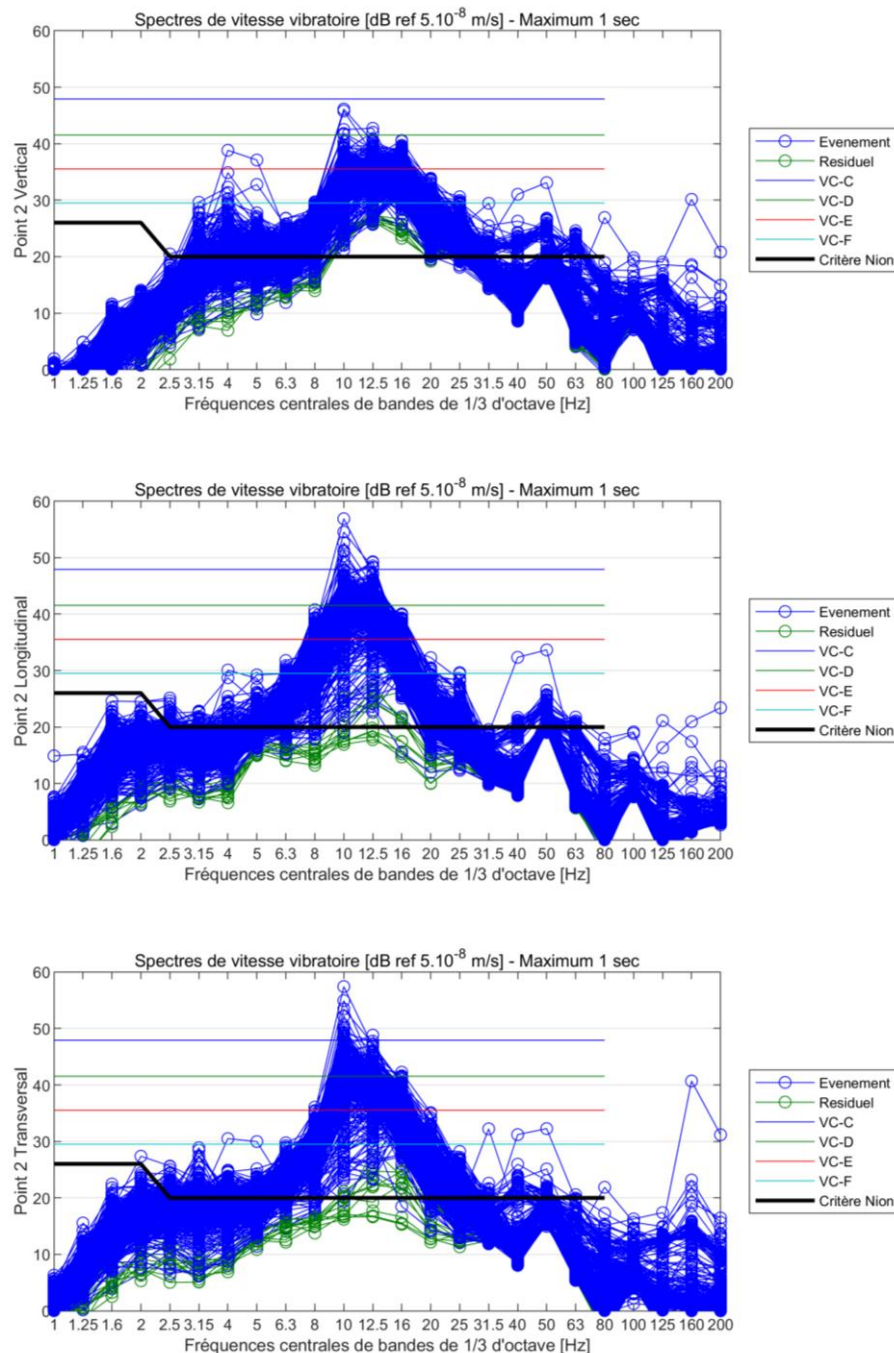


Figure 14 : Spectres tiers d'octave de vitesse vibratoire lors des événements les plus forts - Point 2

Observations :

- En Z, le critère NION est dépassé par la majorité des événements du tiers d'octave 3.15Hz à 80Hz ; Les niveaux sont maximaux entre 10Hz et 16Hz atteignant VC-D et on note des émergences en basses fréquences, entre 3.15Hz et 5Hz ; En très basses fréquences, de 1Hz à 2Hz, le critère est largement respecté ;
- En L et T, les maxima sont mesurés à 10Hz et 12.5Hz et peuvent dépasser largement le critère et atteindre VC-C ; On note que le critère NION est approché aux tiers d'octave 1.6Hz et 2Hz.

3.4. Essais vibratoires contrôlés

On étudie à présent des évènements identifiés ou provoqués lors d'essais contrôlés. Seuls les résultats au point 2 sont présentés car ils sont jugés plus représentatifs des niveaux subis par le futur massif de fondation du microscope qui sera localisé à cet emplacement.

Les évènements suivants sont étudiés :

- *Niveaux résiduels et CTA adjacente,*
- *Marche d'un opérateur dans le local aux niveaux R-1 et RDC,*
- *Fonctionnement de l'ascenseur le plus proche,*
- *Fonctionnement des équipements du local de liquéfaction,*
- *Passages de véhicules sur la voie de desserte interne, au niveau du local de liquéfaction et sur la rue des fossés Saint-Bernard,*
- *Claquements de portes aux alentours du local.*

3.4.1. Résiduel, CTA, marche & ascenseur

La figure suivante présente les niveaux de vitesse vibratoire (max 1s) atteints au point 2 dans les 3 directions pour les évènements : niveaux résiduels avec CTA, marche R-1 et RDC & ascenseur.

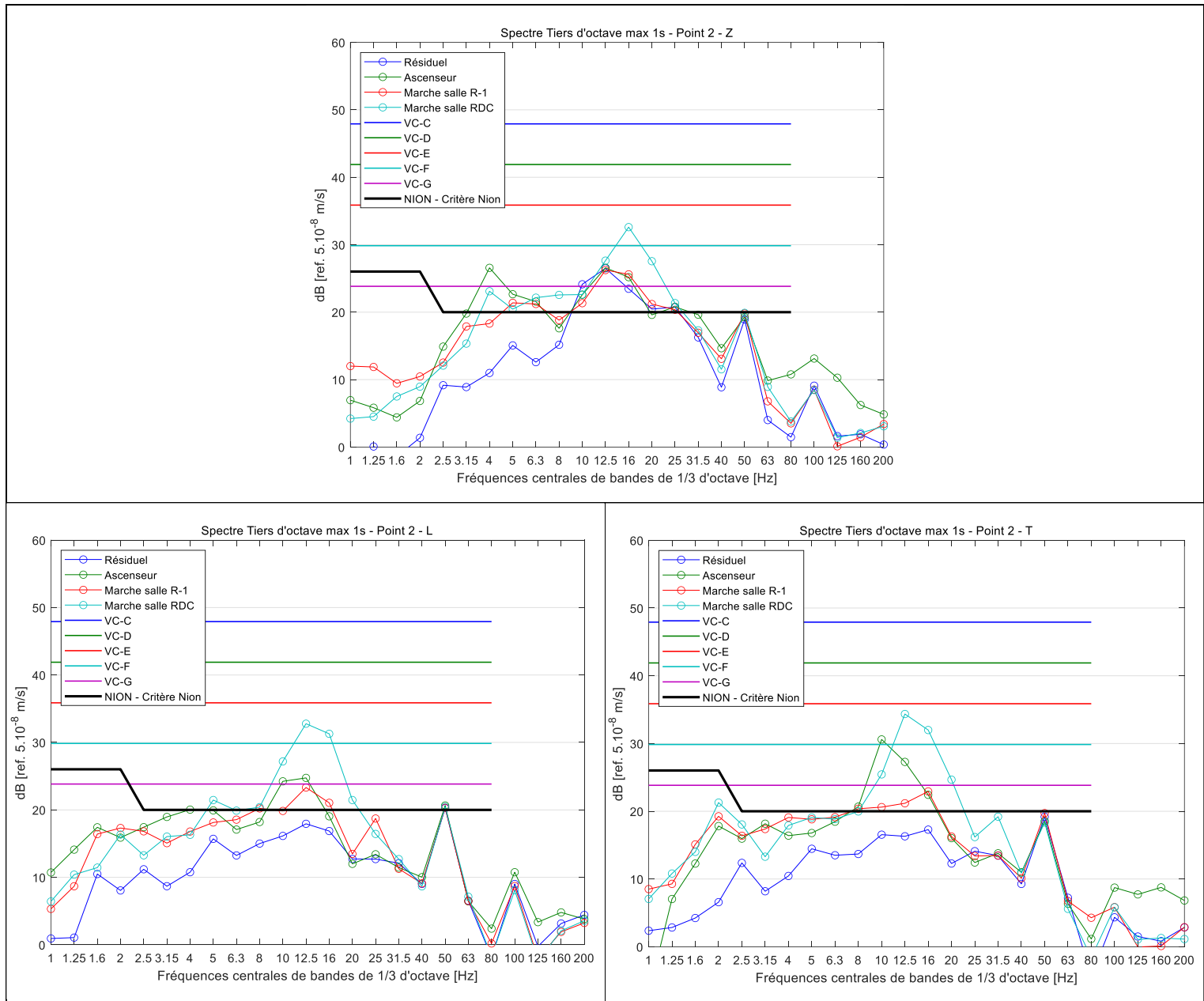


Figure 15 : Marche & Ascenseur - Spectres de vitesse vibratoire – Point 2

Observations :

- Le niveau résiduel correspond à un instant très calme de la mesure pris le dimanche à 3h du matin ; On y voit avec le pic d'amplitude à 50Hz l'impact de la CTA située dans le local adjacent ; Ce pic s'élève à environ 20 dB_v dans les trois directions et atteint le critère NION.
- Le fonctionnement de l'ascenseur est caractérisé par une émergence dans la direction T atteignant 30 dB_v à 10Hz ; On note un pic d'amplitude en Z à 4Hz atteignant environ 26 dB_v ;
- La marche d'un opérateur au R-1 ou RDC provoque des vibrations qui émergent du bruit résiduel jusqu'à environ 31.5Hz ; Le maximum est atteint lors d'une marche au RDC à 12.5Hz et 16Hz et atteint de 33 à 35 dB_v dans les trois directions.

- La marche au R-1 dans le local microscope peut provoquer le dépassement du critère NION à 12.5Hz et 16Hz mais les niveaux vibratoires autour des fréquences fondamentales de marche (1.5-2 Hz) restent faibles.

3.4.2. Local de liquéfaction

La figure suivante présente les niveaux de vitesse vibratoire (max 1s) atteints au point 2 dans les 3 directions pour les événements associés au local technique de liquéfaction situé au RDC à proximité du local de mesures. Les compresseurs ont été mis en fonctionnement séparément puis tous ensemble comme cela est le cas en phase nominale d'utilisation.

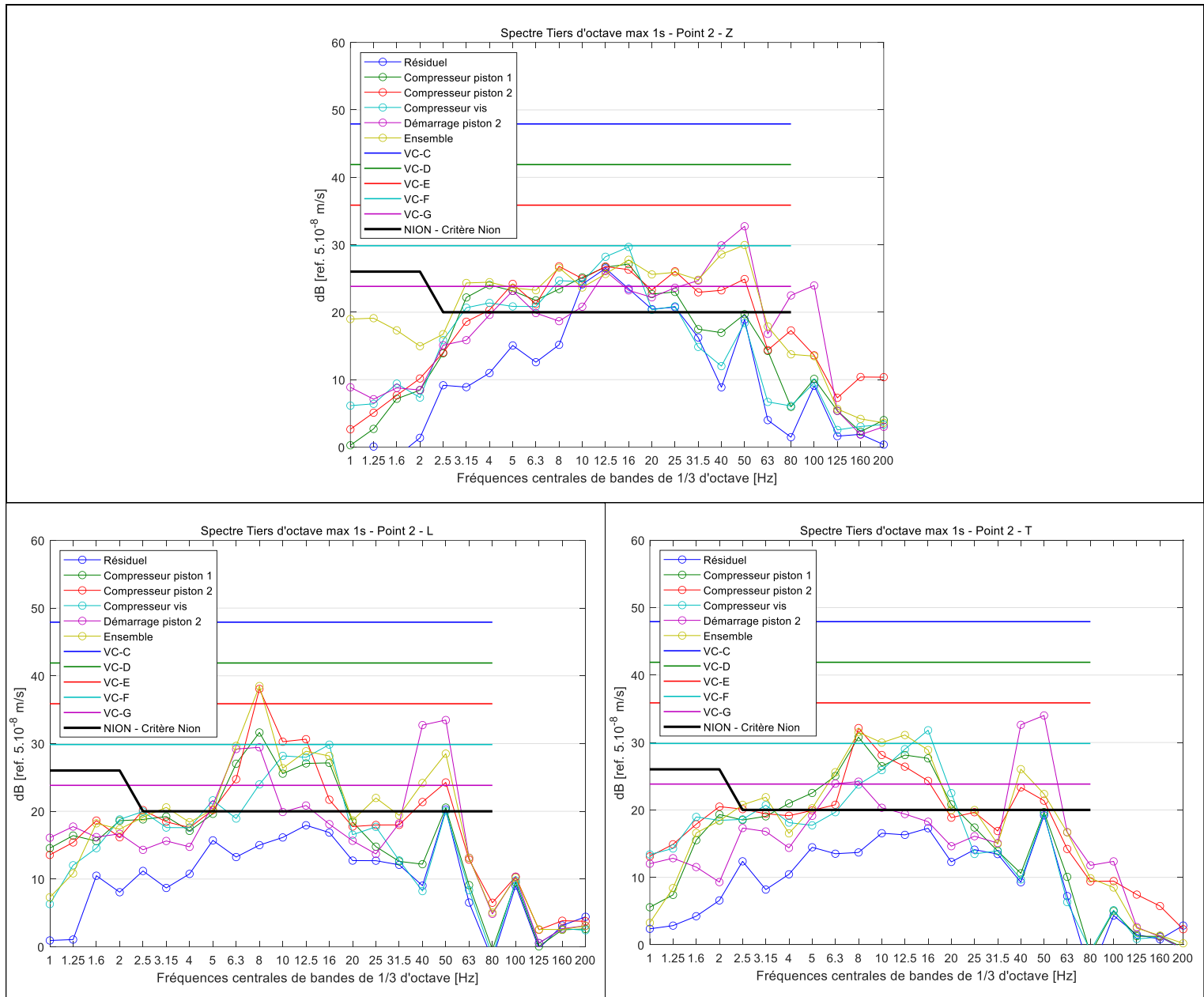


Figure 16 : Équipements du local technique de liquéfaction - Spectres de vitesse vibratoire – Point 2

Observations :

- Les niveaux maximaux sont atteints dans la direction L et sont dus au fonctionnement du compresseur à piston n°2 avec une raie marquée à 8Hz à 38 dB_v ;
- On note que le démarrage du compresseur n°2 provoque un choc qui se caractérise par des vibrations importantes en hautes fréquences, à 40Hz et 50Hz, atteignant environ 34 dB_v ;

- Le compresseur n°1 provoque également des niveaux vibratoires marqués à 8Hz dans les directions L et T ;
- Le compresseur à vis présente un maximum au tiers d'octave 16Hz dans les trois directions qui atteint 30 dB_v en Z et L et 32 dB_v en T ;

On note qu'il est envisagé de remplacer prochainement les compresseurs à pistons par un (des) compresseur(s) à vis. Cela est plus favorable pour les conditions vibratoires car, si cela est semblable au compresseur à vis actuel, les vibrations sont plus hautes en fréquence et donc plus aisées à atténuer par les solutions antivibratiles.

3.4.3. Passages de véhicules

La figure suivante présente les niveaux de vitesse vibratoire (max 1s) atteints au point 2 dans les 3 directions pour les événements associés au passage de voiture sur la desserte interne de Jussieu, de chariot élévateur sur la cour RDC associée au local de liquéfaction et de bus sur la rue des fossés Saint-Bernard.

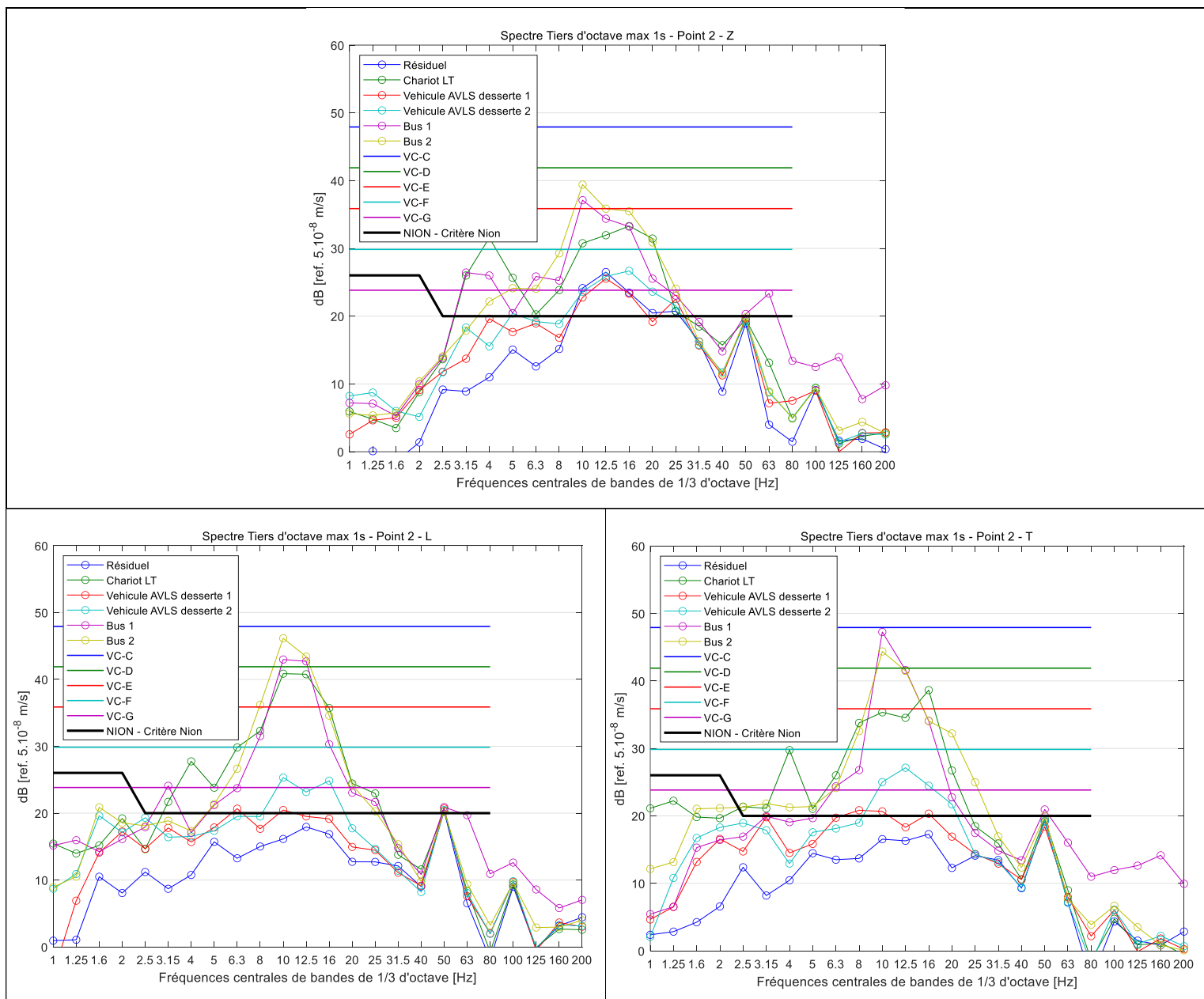


Figure 17 : Impact des véhicules - Spectres de vitesse vibratoire – Point 2

Observations :

- Les niveaux maximaux sont atteints au passage de bus sur la rue des fossés Saint-Bernard aux tiers d'octave 10Hz et 12.5Hz ; En Z le maximum atteint est de 39 dB_V, en L de 46 dB_V et en T de 47 dB_V ; Il y a donc un dépassement du critère NION proche de 30 dB à 10Hz dans les directions horizontales.
- Le passage de chariot élévateur au plus près de la façade du local microscope provoque des vibrations marquées à 4Hz et entre 8Hz et 20Hz ; A 4Hz le maximum atteint est de 32 dB_V en Z ; A 10Hz et 12.5Hz en direction L le maximum est de 41 dB_V ;
- Les passages de véhicules sur la desserte interne et notamment sur les ralentisseurs proches du local ont moins d'effet que les passages de bus, on note une émergence plus importante aux tiers d'octave 10Hz à 16Hz atteignant au maximum 27 dB_V dans les directions Z et T ; On note une émergence par rapport au niveau résiduel dans les très basses fréquences, de 1.25Hz à 5Hz pouvant être liée aux chocs au passage des ralentisseurs.

3.4.4. Claquement de portes

La figure suivante présente les niveaux de vitesse vibratoire (max 1s) atteints au point 2 dans les 3 directions pour les claquements de portes dans les locaux proches. Les fondations du futur massif de microscope sont situées dans le local SS33 et la partie au RDC est dénommée SB15.

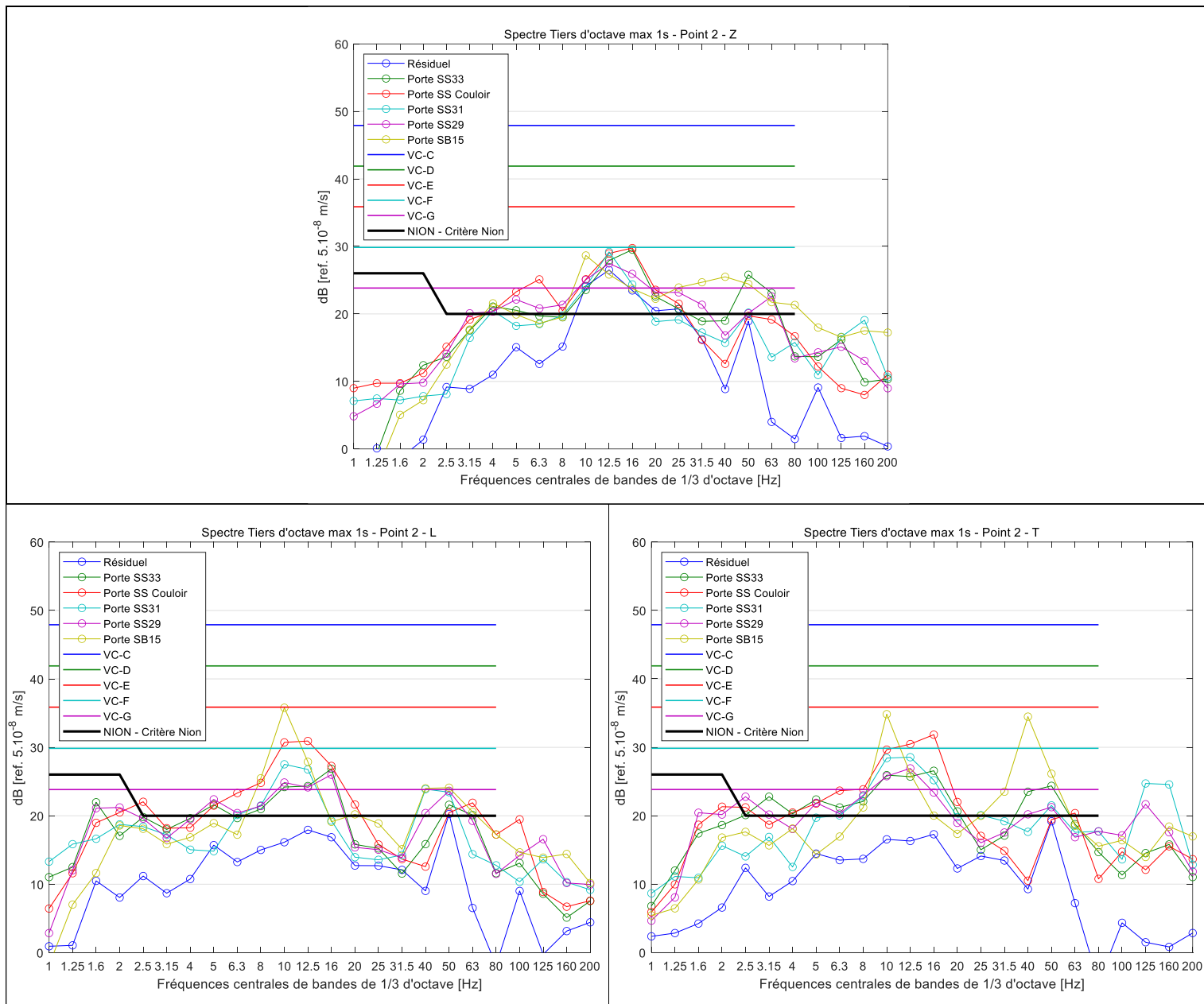


Figure 18 : Claquements de portes - Spectres de vitesse vibratoire - Point2

Observations :

- Les claquements de portes sont marqués par des émergences sur toute la plage de fréquence par rapport au niveau résiduel. Le critère NION est dépassé du tiers d'octave 2.5Hz à 80Hz ;
- Dans la direction Z le maximum atteint est de 30 dB_v à 16Hz lors du claquement des portes des locaux SS33 et celle du futur local microscope du niveau sous-sol.
- Dans la direction L le maximum atteint est de 36 dB_v à 10Hz lors du claquement de la porte du local SB15, donc à l'étage au-dessus du local mesuré ; On note pour tous les cas une émergence en basses fréquences aux tiers d'octave 1.6Hz à 2.5Hz ;

- Dans la direction T, le claquement de la porte SB15 provoque deux pics d'amplitude à 10Hz et 40Hz atteignant 35 dB_v. Les autres cas émergent également de 1.6Hz à 200Hz

4. MODELISATION DE LA STRUCTURE FUTURE

Dans l'aménagement futur le microscope sera installé sur un massif fondé sur pieux et désolidarisé du bâtiment courant. Une étude de modélisation par éléments finis a été menée afin de déterminer l'impact de cette modification structurelle sur les futurs niveaux vibratoires au niveau du microscope.

4.1. Méthodologie d'étude de la future structure

Le comportement dynamique structurel a été estimé à partir de modélisations par éléments-finis comprenant les ouvrages en béton et un volume important de sol avec ses strates géologiques.

La répartition des couches géologiques est basée sur l'étude de sol G2-PRO. Les paramètres mécaniques ont été ajustés grâce aux données mesurées lors du diagnostic sur site.

Deux modèles ont été réalisés à l'aide du code éléments finis ANSYS 24.0 Mechanical.

L'objectif de cette modélisation est d'obtenir :

- Les fonctions de réponse en fréquence (FRF en Vitesse/Force) entre la source et le massif futur ou le plancher actuel,
- Un gabarit de correction des spectres vibratoires entre la situation actuelle et la situation future.

Ainsi nous avons calculé un gabarit de correction des données mesurées en faisant la comparaison de deux modèles :

- Modèle « Structure existante » où le volume de sol est modélisé avec ses différentes couches géologiques et une version simplifiée du sous-sol actuel ;
Une excitation harmonique est appliquée en surface, à 30 mètres, et les réponses vibratoires sont relevées sur le plancher bas R-1 à la verticale de l'emplacement du futur microscope.
- Modèle « Structure future » reprenant les mêmes éléments et ajoutant le massif envisagé (bloc béton de dimensions 2.25m x 2.25m x 2.75m sur pieux) ;
De même, une excitation harmonique est appliquée en surface à 30 m de distance du massif et la réponse vibratoire est relevée en tête de massif.

Il est à noter qu'un modèle est toujours une idéalisation de la réalité (par exemple, le terrain est ici supposé homogène dans chaque couche de sol).

De ce fait, les niveaux vibratoires calculés en sortie du modèle restent des estimations des niveaux futurs.

Les hypothèses de modélisation ont néanmoins été choisies afin de fiabiliser le mieux possible les résultats des simulations.

Le modèle fait une taille de 58 x 40 m² et 15 m de profondeur. Le sous-sol du bâtiment est modélisé par un décaissé dans le modèle d'une hauteur de 3m.

La figure suivante illustre le modèle « Structure existante » en l'absence de massif.

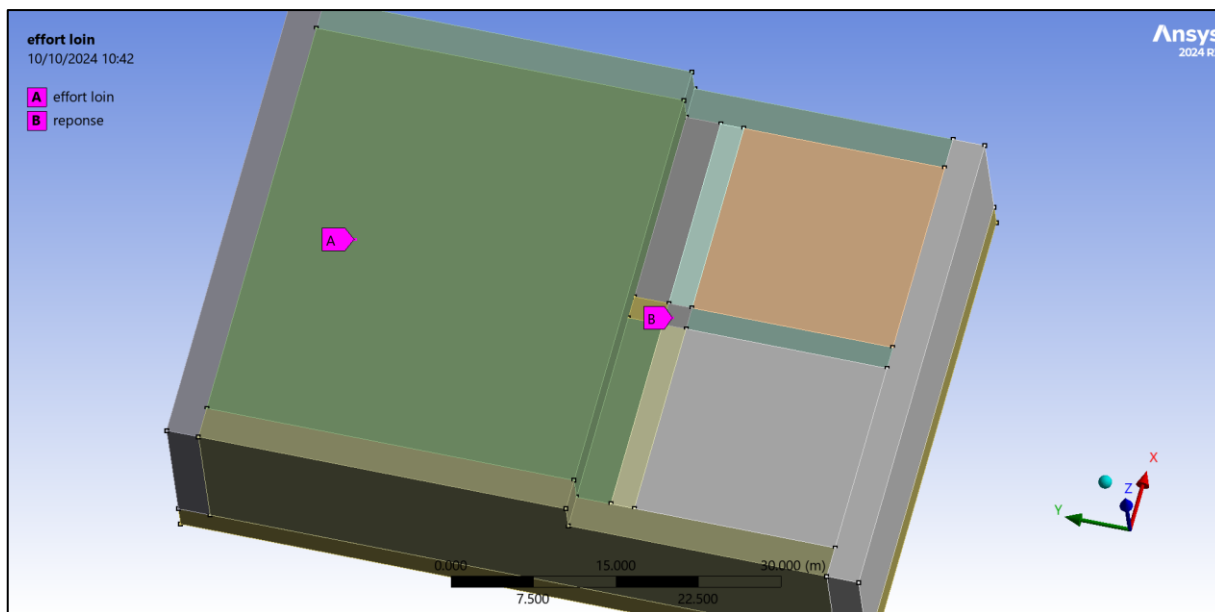


Figure 19 : Vue du modèle éléments finis ANSYS - Configuration Structure existante

Pour le cas « Structure future », le massif est modélisé par un bloc béton aux dimensions stipulées dans le DCE du projet. Il repose sur 4 pieux donc l'entraxe est de 1.5m.

La figure suivante illustre le modèle « Structure future » avec le massif accueillant le microscope.

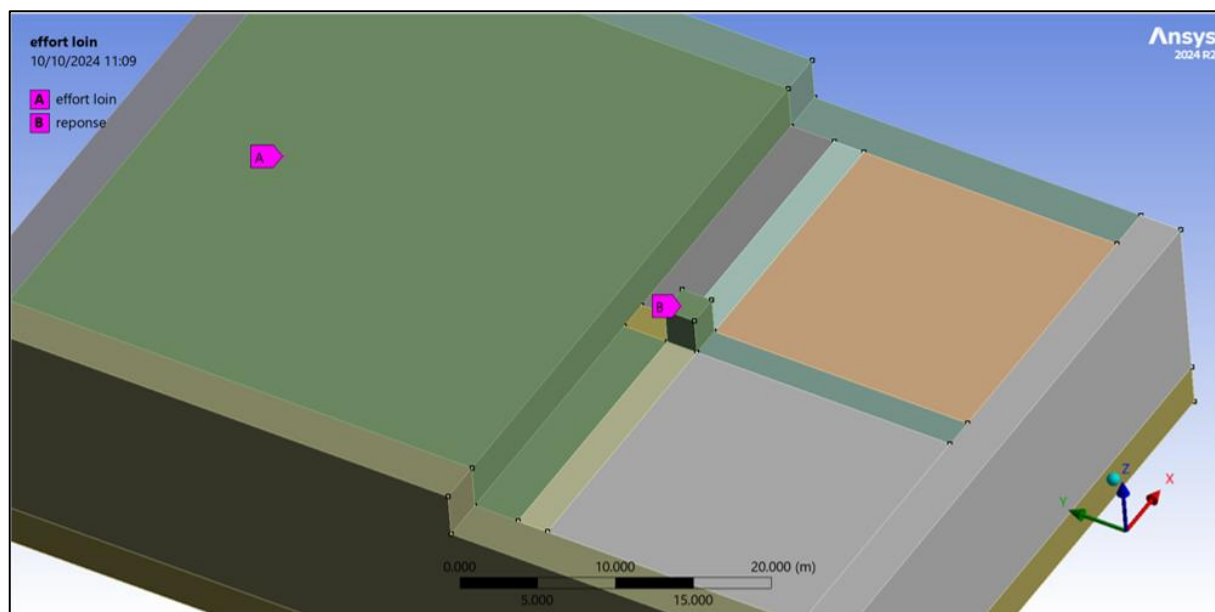


Figure 20 : Vue du modèle éléments finis ANSYS - Configuration Massif futur

La vue en coupe suivante montre la présence des pieux conformément aux plans de fondations futures du local.

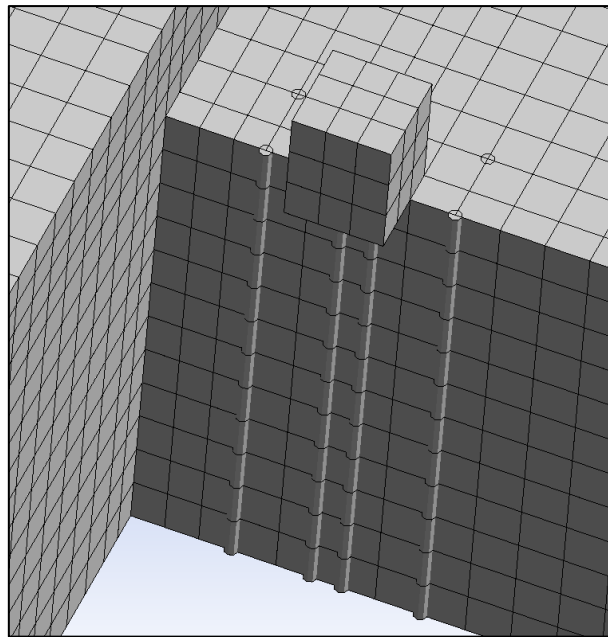


Figure 21 : Vue en coupe du modèle avec massif et pieux de fondation

On note qu'étant donné le fait que les niveaux vibratoires sur site sont faibles au-delà de 50Hz et que les solutions antivibratiles sont généralement efficaces à ces hautes fréquences, les calculs de gabarit de correction sont restreints à la plage de fréquence [1 – 50Hz].

Ainsi, le calcul des FRF est effectué par résolution harmonique entre 1Hz et 50Hz. Une force unitaire est appliquée en vertical et en horizontal (direction perpendiculaire à la façade du bâtiment) et les réponses sont calculées sous forme de vitesse vibratoire. Ces données permettent d'obtenir les fonctions de réponse en fréquence exprimées en m/s/N.

En comparant les faisceaux de FRF des 2 modèles, on caractérise les gabarits de correction liant les résultats des deux solutions.

La figure suivante représente un exemple de déformée opérationnelle du modèle pour une excitation verticale à 10Hz. On y aperçoit la forme d'onde parcourant le modèle.

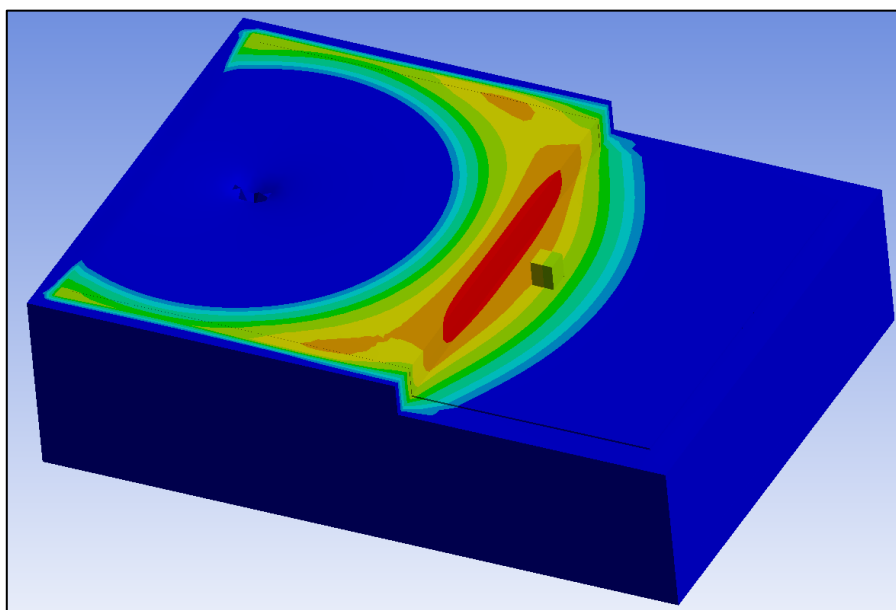


Figure 22 : Vue de la déformée harmonique du modèle pour une excitation verticale à 10Hz

4.2. Paramètres du modèle et recalage

Les paramètres mécaniques du terrain (2 premières strates géologiques de surface) sont recalés à partir de la mesure d'admittance du plancher bas du sous-sol et à partir d'une mesure de FRF entre le capteur au centre du local et un point d'excitation situé à 5 mètres.

Pour calculer l'admittance de la dalle béton du modèle, une impulsion de force est appliquée au centre de la dalle et le niveau de vitesse vibratoire au même point d'application de la force est calculé en fonction de la fréquence (résolution harmonique).

L'opération est répétée plusieurs fois en ajustant les paramètres mécaniques des couches de sol jusqu'à atteindre une adéquation satisfaisante entre les courbes calculées et les courbes mesurées.

La figure suivante présente la comparaison de ces résultats une fois le recalage finalisé.

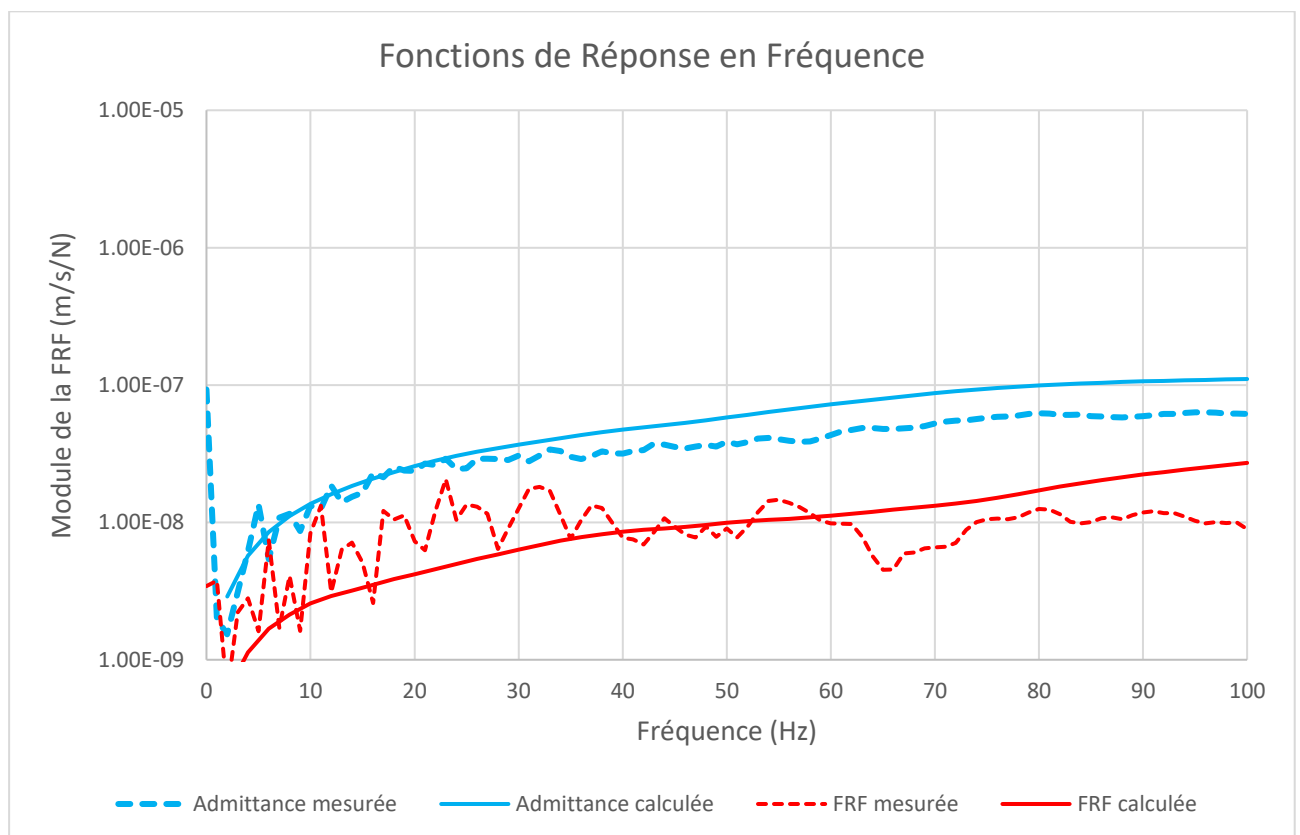


Figure 23 : Courbes d'admittance et FRF mesurées et calculées après recalage des paramètres géodynamiques

Les paramètres recalés sont donnés dans le tableau suivant.

Paramètres	Strate 01	Strate 02
Epaisseur [m]	5	8
Module de Young E [GPa]	2.0	1.0
Masse volumique ρ [kg/m ³]	2000	2000
Coefficient de Poisson ν	0.4	0.4
Coefficients de Rayleigh	$\alpha=11$ $\beta=1.5 \cdot 10^{-4}$ Soit environ 5% à 10Hz et 4% à 50Hz	

Tableau 1 : Paramètres géologiques recalés pris en compte dans la modélisation

Les structures en béton (massif et pieux) ont les caractéristiques suivantes :

Matériau	E [GPa]	ν [-]	ρ [kg/m ³]
Béton armé	35	0.20	2 500

Tableau 2 : Paramètres dynamiques du béton armé

4.3. Gabarit de correction

On présente ci-dessous les gabarits de correction existant/futur calculés pour le point de sortie en tête de massif ou à même distance sur le plancher bas dans le cas d'une excitation verticale et d'une excitation horizontale orientée vers le bâtiment, située à 30 mètres.

Par la suite, le même gabarit de correction sera appliqué dans les deux directions horizontales (L et T).

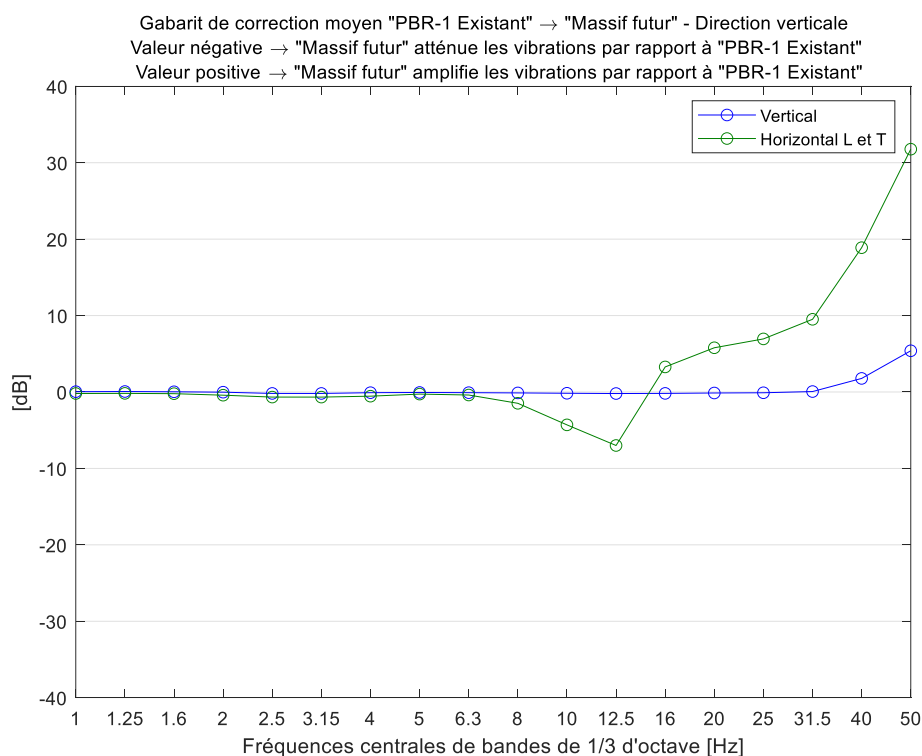


Figure 24 : Gabarit de correction vibratoire existant/futur pour des sollicitations verticale et horizontale à 30 mètres

On constate que pour la direction verticale, le gabarit est nul de 1Hz à 31.5Hz ce qui signifie que le massif sur pieux ni ne dégrade ni n'améliore la situation vibratoire par rapport à l'existant. Cela est classique pour des basses fréquences de vibration où une structure massive a tendance à « suivre » le comportement du terrain.

Pour les directions horizontales la présence d'un massif élancé comme ici tend à dégrader le comportement vibratoire par rapport à un radier. On constate en effet que le gabarit prend des valeurs positives à partir de 16Hz, ce qui signifie que le massif amplifie les vibrations à partir de cette fréquence.

Les gabarits de correction ont également été calculés pour une excitation en champ proche située à 10 mètres du massif. Les résultats sont présentés ci-dessous.

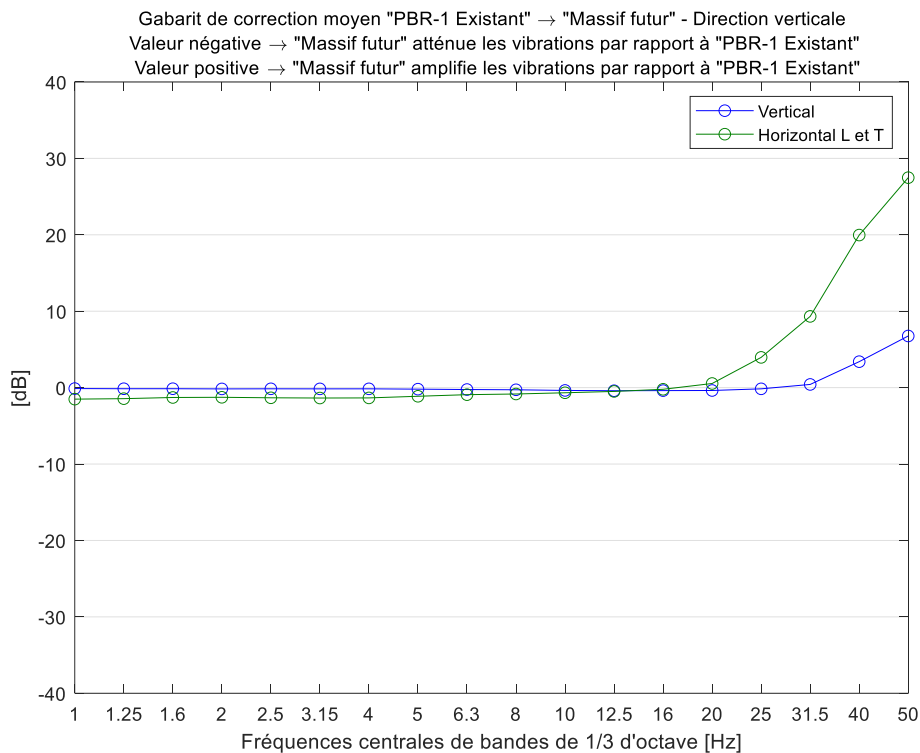


Figure 25 : Gabarit de correction vibratoire existant/futur pour des sollicitations verticale et horizontale à 10 mètres

On constate que l'extrema de la courbe horizontale de la Figure 24 à 12.5Hz pour une source à 30m n'est plus présent pour une source à 10m. Il apparaît plus conservateur de considérer les gabarits de correction à 10 mètres pour la suite de l'étude.

La valeur maximale à 50Hz est réduite de 31 dB à 28 dB.

4.4. Application aux données mesurées

On applique donc les gabarits de correction aux données mesurées. Pour cela, les indices fractiles de la partie §3.3 sont réexploités, en particulier l'indice L0.1 qui est représentatif des événements les plus forts tels que présentés en Figure 14.

La figure suivante présente les indices fractiles de la journée du 02/09 au point 2 après application des gabarits de correction (source à 10 mètres).

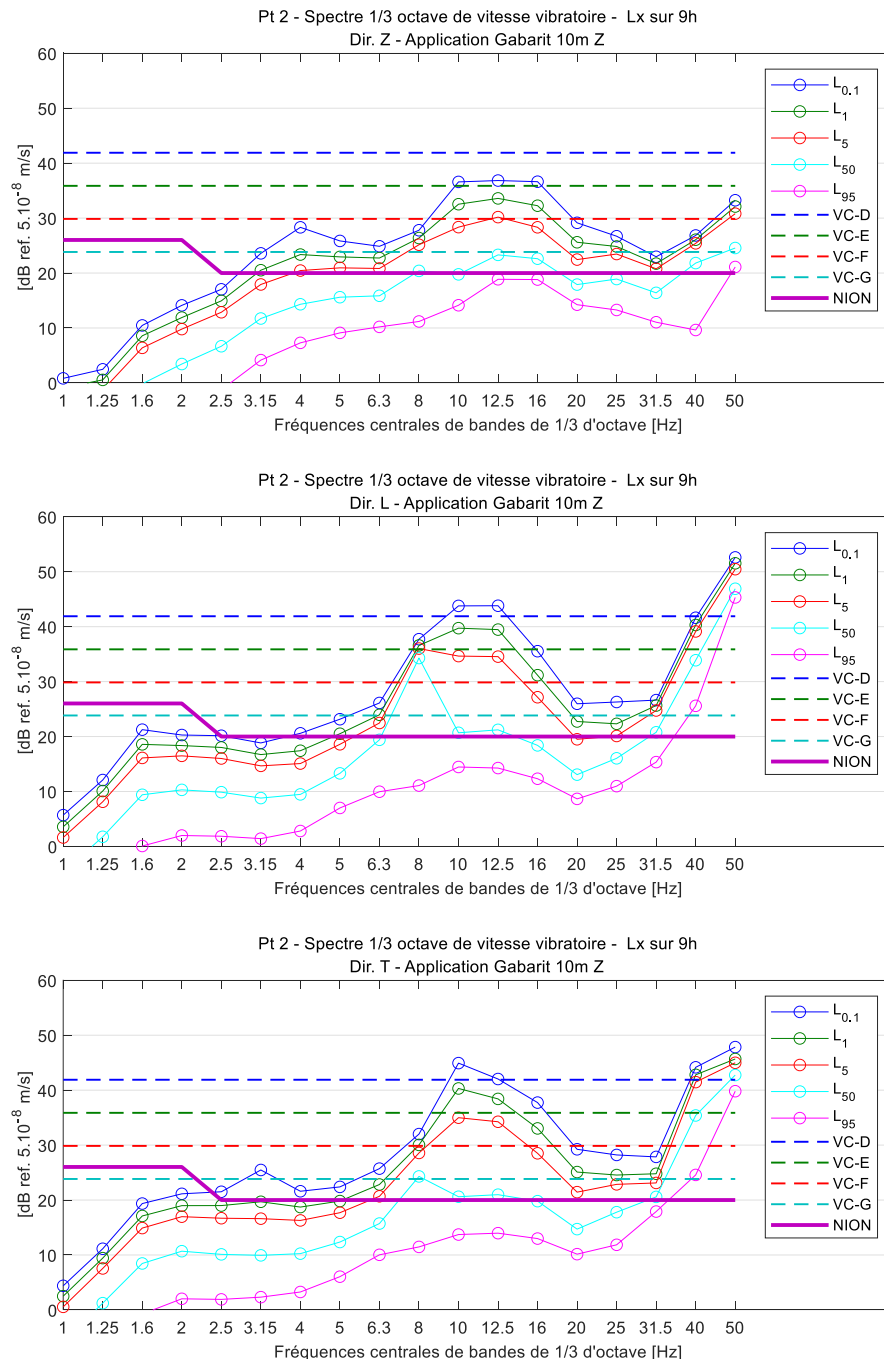


Figure 26 : Indices fractiles - 02/09/2024 9h à 18h - Point 2 - Application du gabarit de correction Existant/Futur

Comme évoqué à la lecture des gabarits de correction, dans la direction verticale les niveaux estimés quasiment identiques aux niveaux mesurés avec une légère amplification à 40Hz et 50Hz.

Dans les directions horizontales L et T, on constate que les courbes corrigées sont quasiment identiques aux courbes mesurées de 1Hz à 20Hz. Les niveaux vibratoires sont cependant nettement augmentés à la surface du massif entre 25Hz et 50Hz.

Il apparait indispensable de recourir à une solution antivibratile complémentaire pour approcher le critère NION.

4.5. Atténuation vibratoire requise

En prenant la différence de l'indice L0.1 corrigé présenté en Figure 26 par rapport au critère NION, on obtient la courbe d'atténuation (ou affaiblissement) vibratoire minimale attendue de la part de la solution antivibratile complémentaire. La courbe suivante présente ces courbes d'atténuation dans le même cas que précédemment : L0.1 du 02/09/2024 (9h-18h) au point 2 avec correction Existant/Futur.

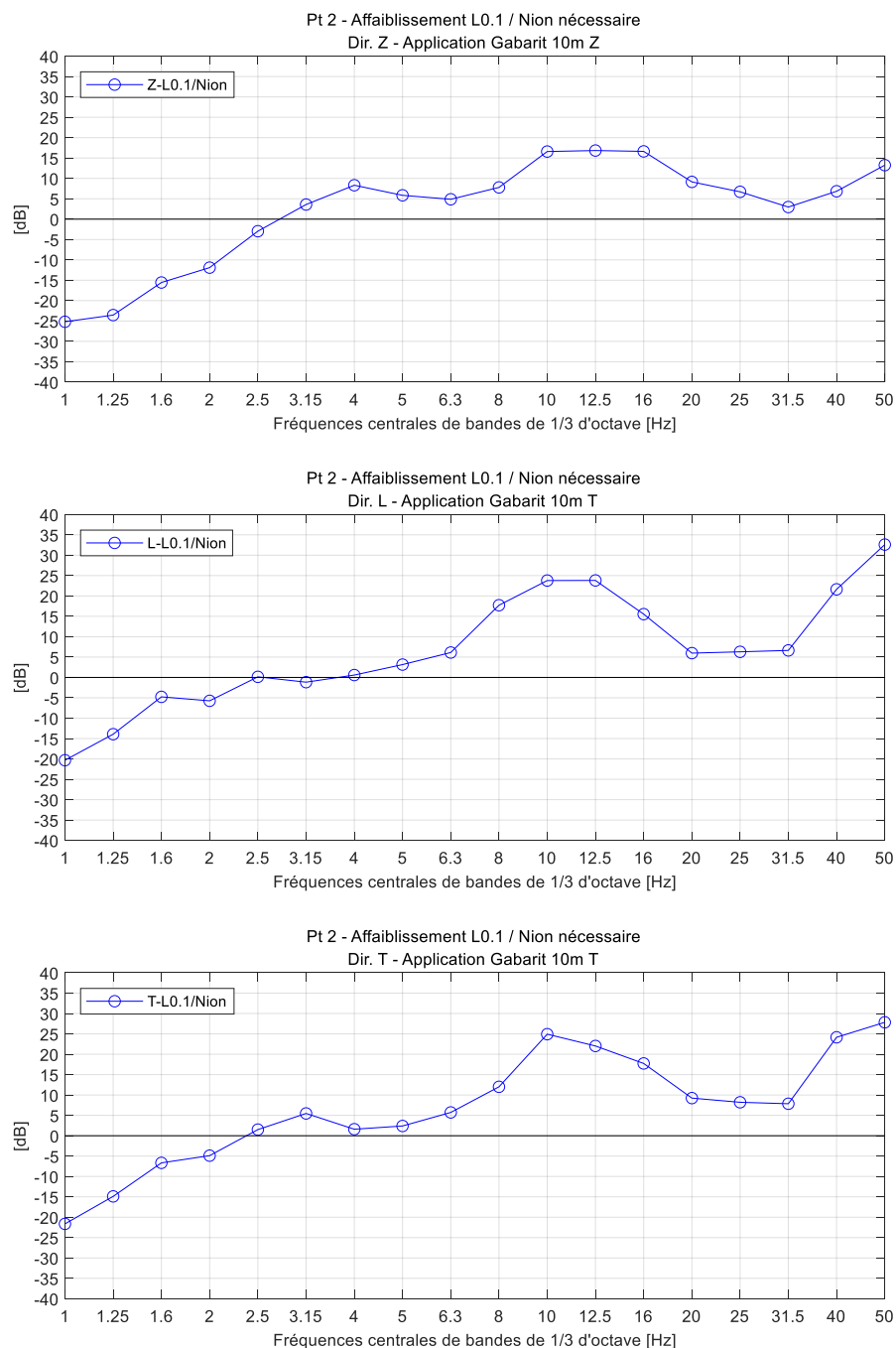


Figure 27 : Courbes d'atténuation nécessaires pour respecter le critère NION au point 2 (ref. L0.1 – 02/09/2024 9h-18h)

Les courbes d'atténuation présentent toutes trois un même profil avec des valeurs négatives de 1Hz à 2.5Hz ce qui signifie que le critère NION est déjà respecté avec une certaine marge. Ceci est favorable pour les solutions antivibratiles passives car elles impliquent une amplification en basses fréquences.

On liste ci-dessous les valeurs clefs (limitantes) à respecter pour les trois directions :

Direction	Fréquence	Valeur
Verticale Z	4 Hz	8.3 dB
	10 Hz	16.6 dB
Longitudinale L	8 Hz	17.7 dB
	50 Hz	32.6 dB
Transversale T	3.15 Hz	5.5 dB
	10 Hz	25 dB

Tableau 3 : Valeurs d'atténuation vibratoire limitantes pour la solution antivibratile complémentaire

On note que ces valeurs sont liées au seuil Nion sans la marge de sécurité de 0.5 suggérée dans les spécifications du microscope.

4.6. Variante élargie de massif

Le massif élancé de 2.2m x 2.2m x 2.75m présentant une amplification notable des vibrations dans les directions horizontales, une variante élargie a été étudiée. La variante comporte une base élargie afin de rigidifier la colonne et de diminuer la sensibilité de l'ensemble aux vibrations horizontales.

La figure suivante présente les dimensions du massif ainsi qu'un positionnement prévisionnel de pieux supplémentaires en fondations. Le massif est constitué de deux « banquettes » en béton de 1.75m de hauteur qui sont ajoutées solidairement à la colonne originale. La forme en « H » permet de contourner les pieux supports du plancher périphérique avec lesquels il est préférable d'éviter un contact direct pour limiter les transmissions vibratoires du plancher courant vers le massif de microscope.

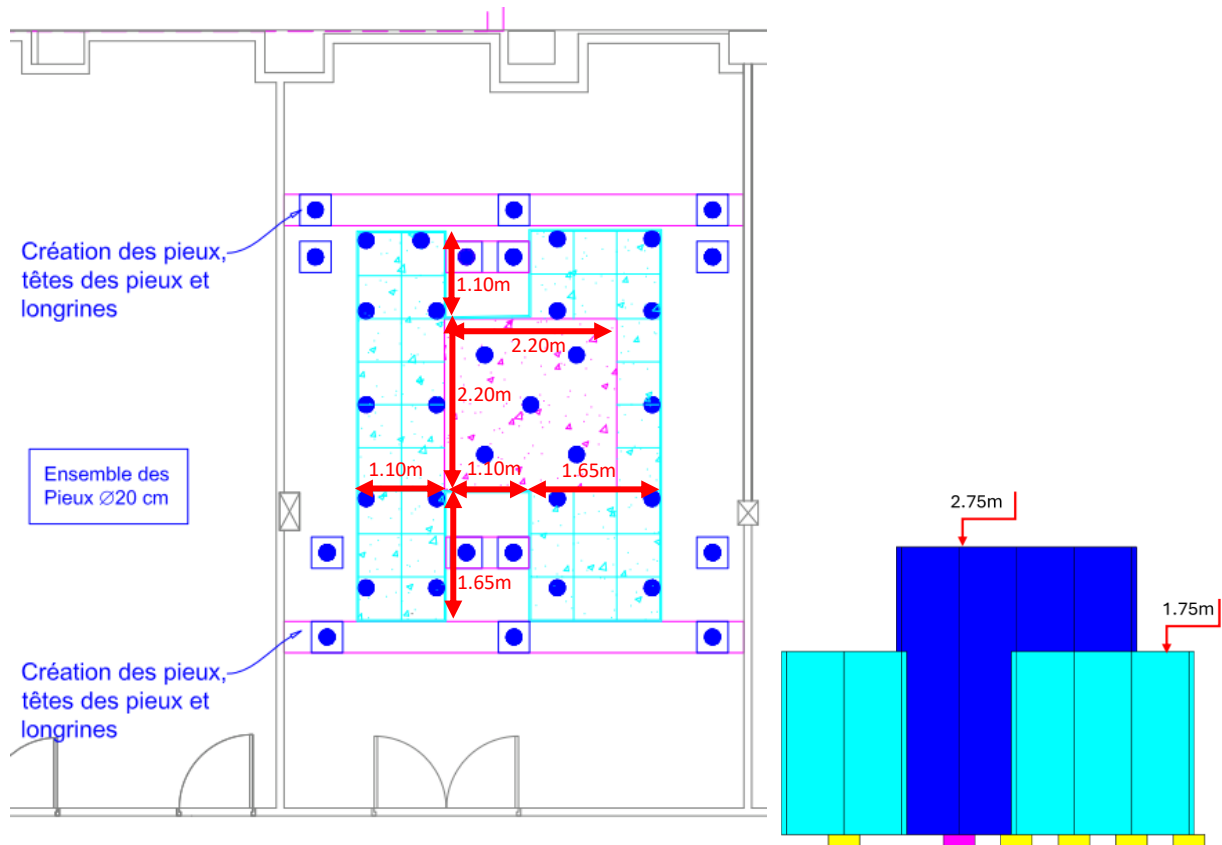


Figure 28 : Vue schématique du massif élargi et positionnement des pieux (cf. plan BIM 21/11/2024)

Cette variante a été modélisée par éléments finis selon la procédure précédente. Le volume maillé est représenté ci-dessous.

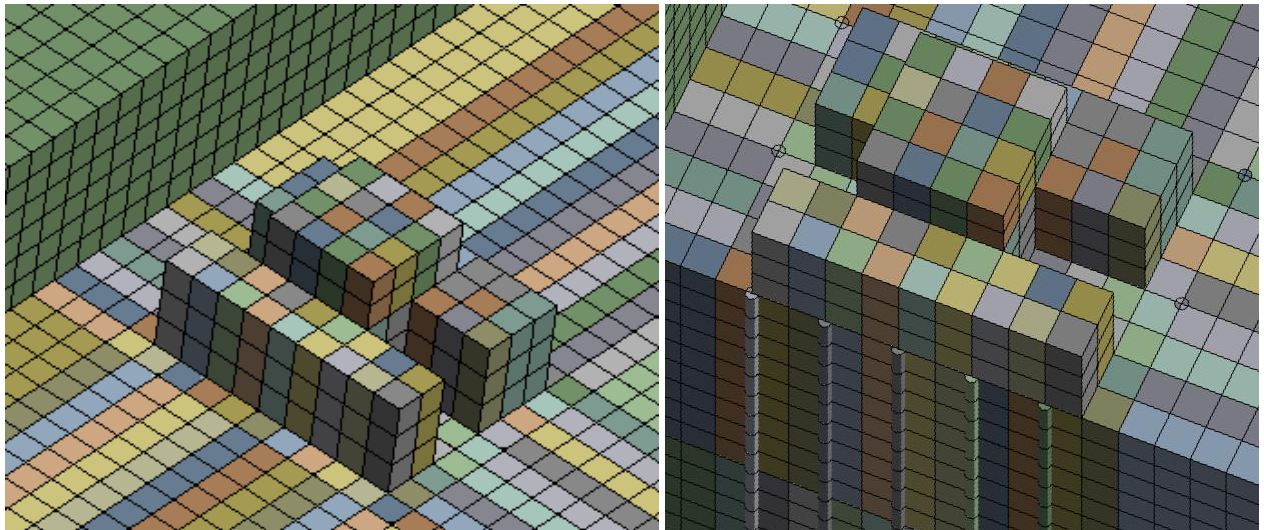


Figure 29 : Vues du modèle par éléments finis du massif élargi sur pieux

Le modèle comprend les mêmes paramètres de sol et d'amortissement que les modèles précédents. Deux gabarits de correction existant/massif élargi sont calculés pour des excitations verticales et horizontales. Ils sont représentés ci-dessous (cas d'une source à 10m du massif).

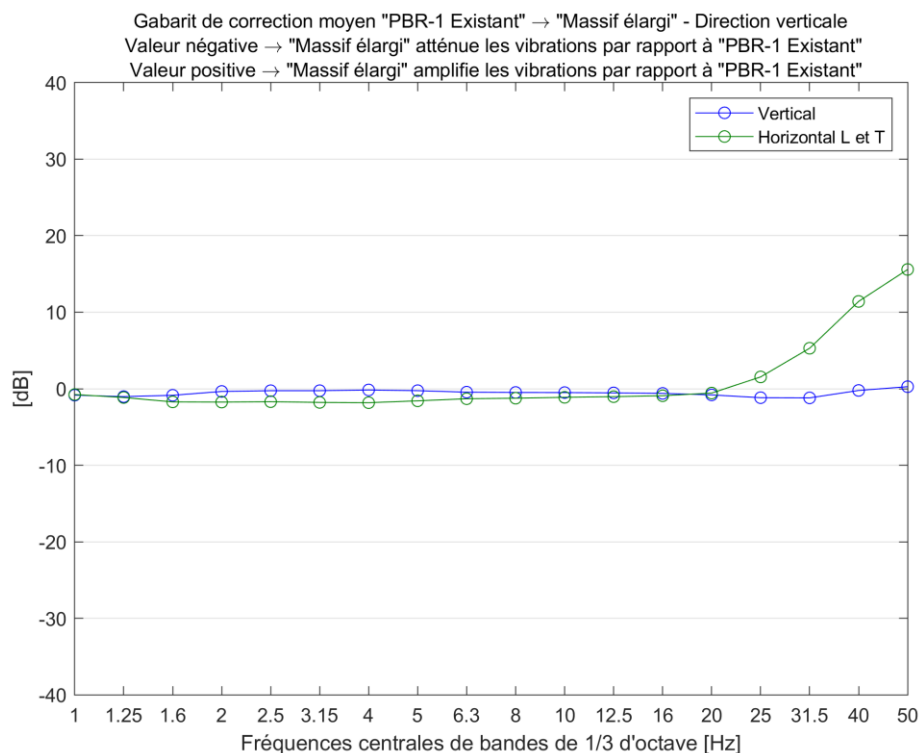


Figure 30 : Gabarits de correction existant/massif élargi - Directions verticale et horizontale – Source à 10m

Par comparaison avec les résultats de la colonne seule en Figure 25, on note un effet favorable de la version élargie car l'amplification horizontale à 50Hz est de 16dB contre 28 dB dans la conception originale. De même dans la direction verticale, on note une amélioration du gabarit à 50Hz (de 8dB d'amplification à 0 dB).

En appliquant ces gabarits aux mesures, les niveaux vibratoires prévisionnels représentés ci-dessous sont atteints sur le massif élargi (hypothèse Point 2).

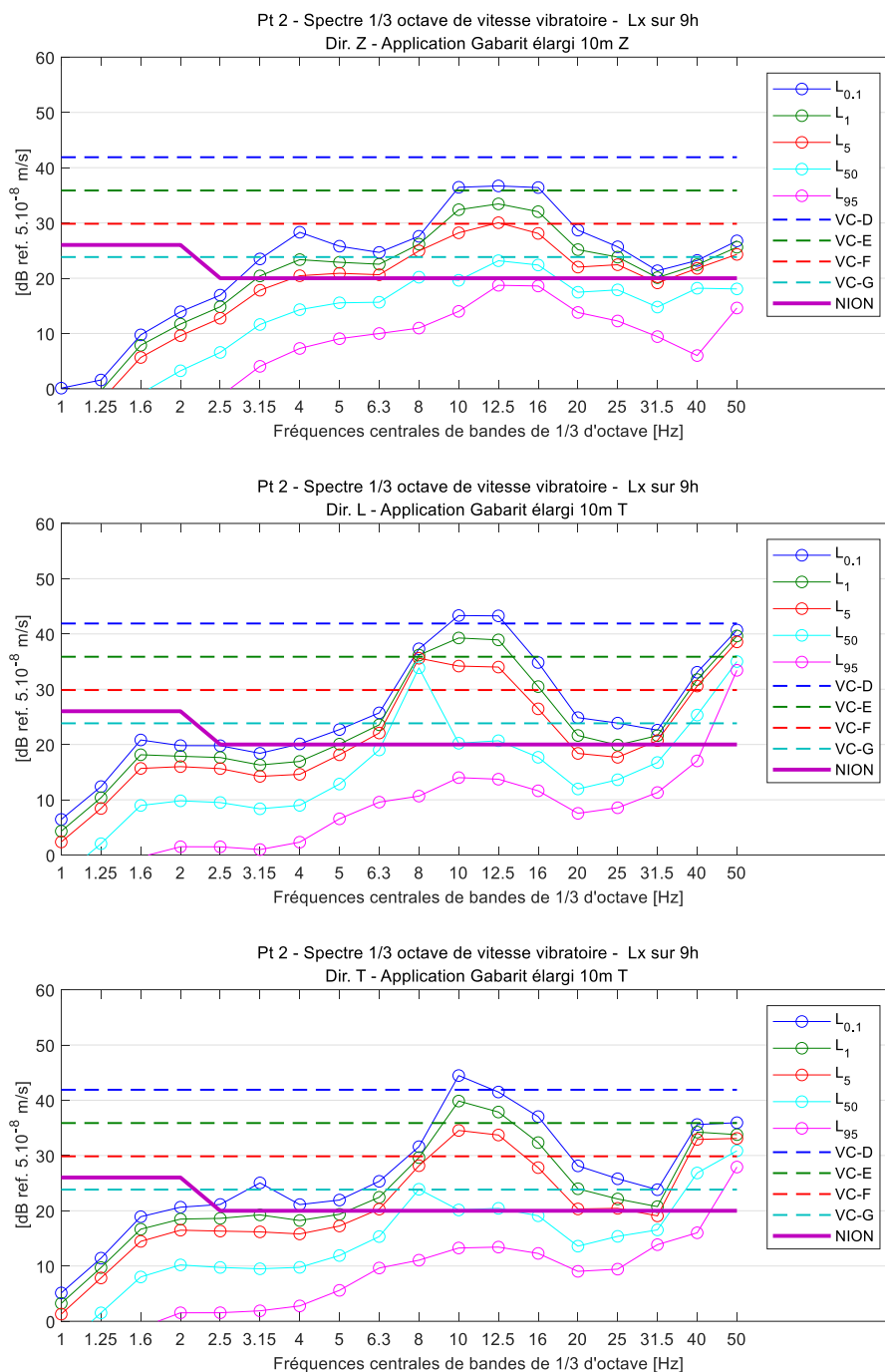


Figure 31 : Indices fractiles - 02/09/2024 9h à 18h - Point 2 - Application du gabarit de correction Existant/Massif élargi

Comme précédemment, le besoin d'atténuation pour que la courbe L0.1 respecte le critère NION est calculé en soustrayant les deux courbes. Les résultats sont donnés dans la figure suivante.

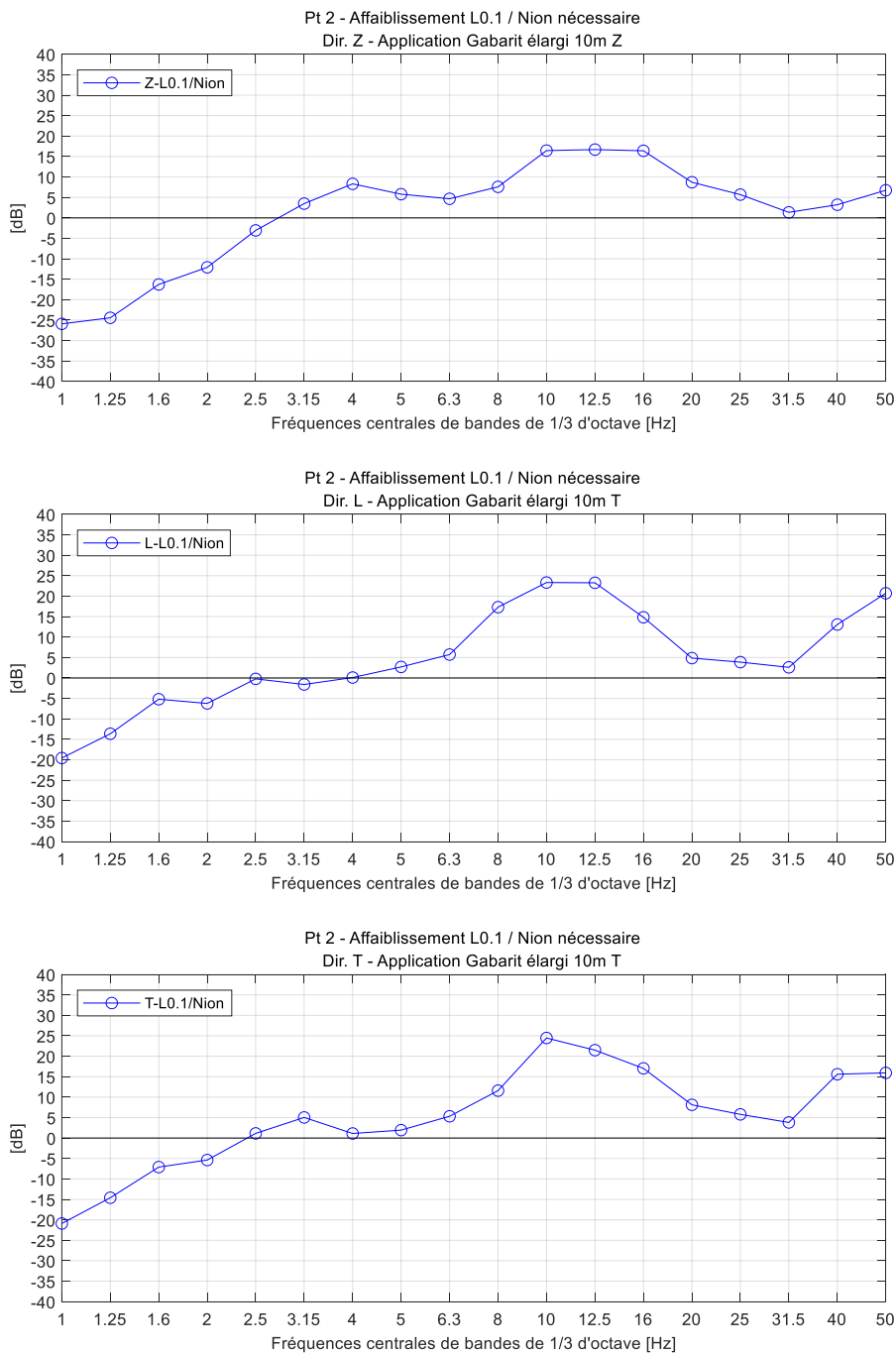


Figure 32 : Courbes d'atténuation nécessaires pour respecter le critère NION au point 2 (ref. L0.1) – Cas massif élargi

Par comparaison aux résultats précédents en Figure 27, et conformément aux constatations relatives aux gabarits de correction de la Figure 30, on constate que le besoin d'atténuation est diminué en hautes fréquences.

Dans la direction L, le besoin d'atténuation est de 20.7 dB, ce qui est notablement diminué par rapports aux 32.6 dB de la conception précédente.

Les valeurs limitantes suivantes à respecter dans le cas du massif élargi sont obtenues :

Direction	Fréquence	Valeur
Verticale Z	4 Hz	8.3 dB
	10 Hz	16.5 dB
Longitudinale L	8 Hz	17.3 dB
	50 Hz	20.7 dB
Transversale T	3.15 Hz	5.0 dB
	10 Hz	24.5 dB

Tableau 4 : Valeurs d'atténuation vibratoire limitantes pour la solution antivibratile complémentaire

5. SOLUTIONS D'ISOLATION VIBRATOIRE

Les dispositifs antivibratiles peuvent être passifs ou actifs.

Un système passif est constitué d'isolateurs (pneumatiques, ressorts, élastomères ou raideur négative) supportant l'équipement sensible par l'intermédiaire d'un massif d'inertie ou une plateforme légère. Ce type de dispositif amplifie les vibrations provenant du sol autour de ses fréquences de résonance qui dépendent de la raideur des appuis et la masse supportée. Les vibrations dont la fréquence est supérieure à la fréquence de résonance (fréquence de coupure plus précisément) sont atténuées.

Les systèmes actifs se distinguent par l'ajout d'actuateurs sur un système passif. Leur intérêt est, selon la stratégie de contrôle employée, de pouvoir limiter l'amplification des vibrations autour de la fréquence de résonance, voire d'ajuster la fréquence de résonance pour améliorer l'atténuation des vibrations dans les basses fréquences. De plus le court temps de réponse d'un système actif permet de réduire rapidement les effets d'un événement vibratoire.

On note que NION stipule dans ses exigences environnementales (cf Figure 5) que la plateforme ou massif d'inertie positionnée entre les isolateurs antivibratiles et le microscope devrait être dimensionnée de façon à obtenir une surface disponible de 2 x 2.2 m² et :

- Une masse supérieure ou égale à 4000 kg pour une solution passive,
- Une masse supérieure ou égale à 2000 kg pour une solution active.

En outre, la masse du microscope et de son enceinte reposant sur la plateforme est de 3 225 kg. La colonne du microscope est elle-même désolidarisée sur des appuis pneumatiques donc une attention particulière doit être portée à la conception de la plateforme antivibratile pour limiter les effets de couplages entre oscillateurs.

On présente ci-après des solutions passives et actives qui pourraient apporter l'atténuation nécessaire pour respecter le critère NION.

5.1. Solutions passives

5.1.1. MinusK – Appuis à raideur négative

Les plots à « raideur négative » incluent une désolidarisation classique sur ressort ainsi qu'un mécanisme intrinsèquement instable permettant de diminuer la raideur globale du système et d'atteindre de faibles fréquences de suspension tout en pouvant supporter de fortes charges. Le principe de fonctionnement, en vertical, est illustré ci-dessous.

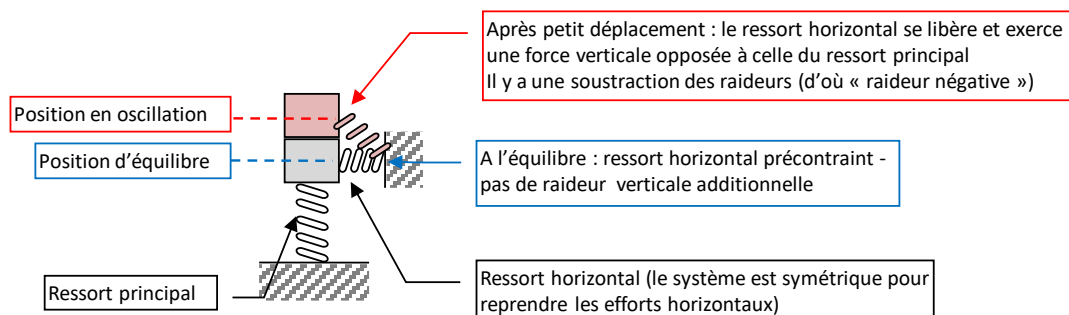


Figure 33 : Schéma de principe de fonctionnement d'appuis à raideur négative

Nous prenons comme référence les plots SM-1 de chez MINUS K dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Fréquence de suspension verticale : 0.5Hz,
- Fréquence de suspension horizontale (selon expérience d'AVLS) : 0.7Hz,
- Coefficient d'amortissement (selon expérience d'AVLS) : 6%,
- L'atténuation horizontale annoncée à 50Hz est d'environ 60 dB.

Les plots SM-1 permettent au maximum de reprendre une charge de 1905kg.

L'ajustement des plots est très sensible du fait de la position d'équilibre très précise à assurer. Pour faciliter cela, le fournisseur préfère limiter le nombre d'appuis à 4 au maximum pour porter un massif.

Ainsi dans le cas de ces appuis, nous devons limiter la masse de l'ensemble désolidarisé à 7620kg (4x1905). Cela reste compatible avec la condition de Nion vue précédemment (4000+3225 = 7225 kg).

La désolidarisation dans le plan horizontal n'inclut pas de mécanisme ajustable.

AVLS a pu mesurer une telle solution mise en œuvre sur un microscope électronique pour l'université de Rouen tel que présenté ci-dessous. La notion de différence de niveaux entre le sol et la plateforme n'est pas équivalente à la notion d'atténuation à atteindre présentée précédemment mais elle en donne une approximation à considérer avec précautions.

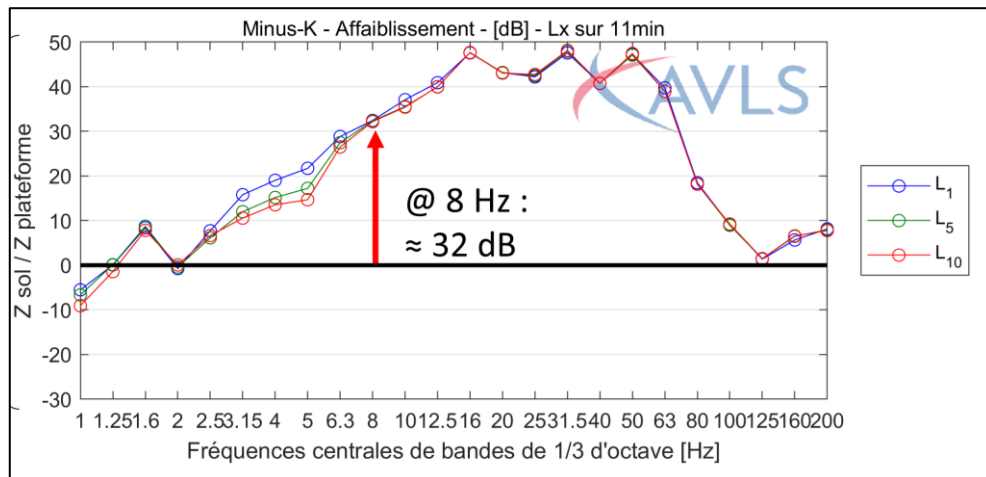
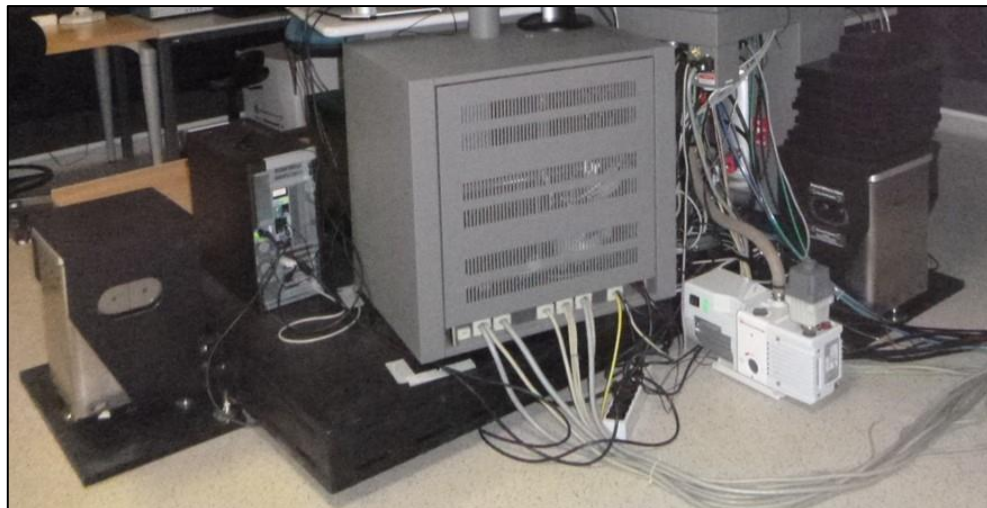


Figure 34 : Plateforme de microscopie sur isolateurs MinusK - Photographie & Courbe d'affaiblissement en Z

La forme des courbes indique qu'il y a vraisemblablement plusieurs modes en basses fréquences ne permettant une atténuation franche des vibrations qu'à partir de 2.5 Hz. Avec une différence de niveaux de 12dB à 4 Hz et 32 dB à 8 Hz on peut tout de même considérer que cette solution serait adéquate pour le projet.

5.1.2. Bilz – BiAir Horizontal + Vertical

Les isolateurs BiAir de BILZ sont pneumatiques et c'est la pression de l'air comprimé dans le volume qui permet de supporter la charge et de garantir une raideur dynamique plus faible que pour des isolateurs à ressorts ou élastomères par exemple.

En superposant un isolateur horizontal et un isolateur vertical, on peut ainsi atténuer les vibrations dans les trois directions de l'espace.

Un exemple de mise en œuvre est représenté ci-dessous.



Figure 35 : Photographie d'un ensemble d'isolateurs horizontal & vertical Bilz BiAir (issue de vib-et-tec.fr)

D'après les spécifications techniques de Bilz et son fournisseur en France Vib&Tec, les caractéristiques atteignables sont les suivantes :

- Fréquence propre de suspension verticale : 1.2Hz,
- Fréquence propre de suspension horizontale : 1.2Hz,
- Capacité portante : jusqu'à 15 tonnes par isolateur,
- Coefficient d'amortissement (selon expérience d'AVLS) : 6% de l'amortissement critique,
- L'atténuation horizontale annoncée à 50Hz est d'environ 45 dB.

La figure suivante présente un exemple de différence en vertical entre sol et plateforme désolidarisée sur isolateurs pneumatiques BiAir verticaux dimensionnés pour atteindre une fréquence propre de 1.2Hz.

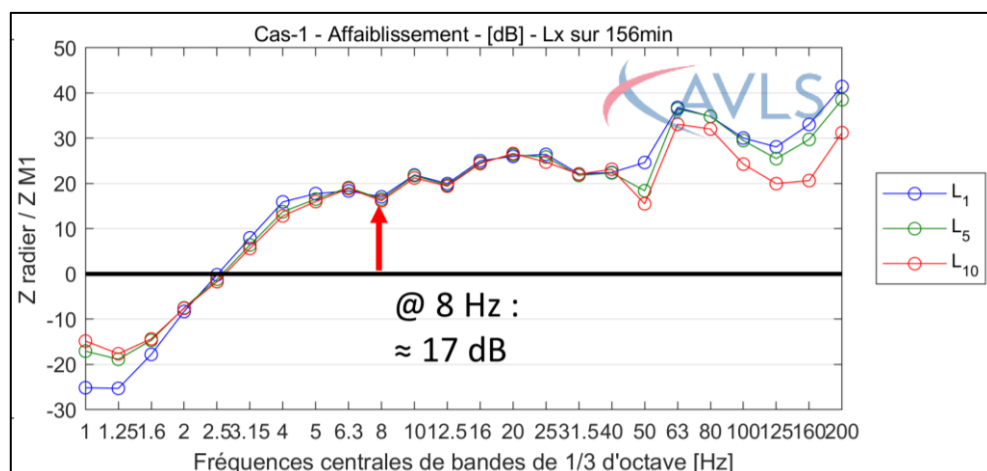


Figure 36 : Exemple mesuré de différence sol/massif sur isolateurs pneumatiques BiAir verticaux

On note dans cet exemple une atténuation effective à partir de 3.15Hz atteignant plus de 10 dB dès 4Hz.

La différence ici mesurée n'est pas aussi favorable que les courbes théoriques de filtrage associées à un système oscillateur théorique. Dans ce cas réel, il est possible que des points de contacts parasites ait subsisté dans l'installation (câbles, couvre-joint...).

Enfin, cette solution passive peut être modifiée à l'aide d'actuateurs complémentaires pour qu'elle devienne active (vendue par Bilz sous la dénomination AIS). Dans ce cas l'amplification des vibrations associée à la résonance est fortement réduite. Cela permet d'améliorer le comportement en basses fréquences mais pas en hautes fréquences.

5.2. Solutions actives

5.2.1. TMC Stacis

Les systèmes Stacis de TMC sont des isolateurs actifs piézoélectriques. Contrairement aux solutions passives, le système est rigide aux basses fréquences ce qui permet d'éviter une amplification vibratoire. De plus, en l'absence d'étage élastique, le risque de couplage entre étages de suspension (plateforme et colonne de microscope) est diminué.

Il existe actuellement plusieurs versions de la solution Stacis listée ci-après par ordre de performance

- Stacis 3,
- Stacis 4,
- Stacis 4 avec « FloorSense ».

Les isolateurs peuvent supporter jusqu'à 2045 kg chacun.

Les performances annoncées par TMC dans les directions verticales et horizontales sont les suivantes :

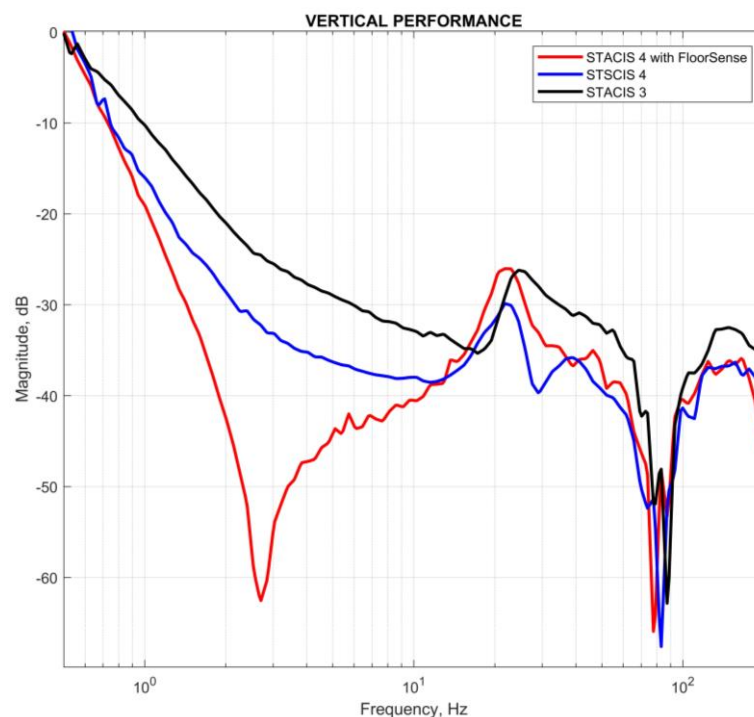


Figure 37 : Performance antivibratile des isolateurs Stacis de TMC – Direction verticale (source : Photonlines)

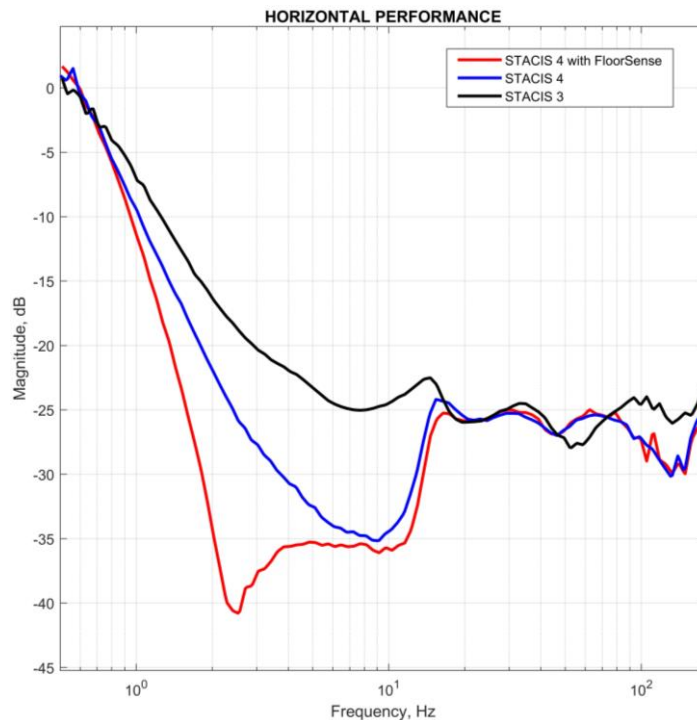


Figure 38 : Performance antivibratile des isolateurs Stacis de TMC – Direction horizontale (source : Photonlines)

Les trois solutions permettraient théoriquement d'atteindre l'atténuation basse fréquence escomptée au §4.5 donc même la version Stacis 3 serait suffisante. Toutefois on note qu'entre 20Hz et 100Hz, l'atténuation horizontale maximale est de 25dB alors qu'il serait nécessaire d'atteindre 32.6 dB d'après le Tableau 3 pour la conception initiale de massif colonne. Toutefois, pour le cas de la variante de massif élargi, l'atténuation recherchée à 50 Hz est de 20.7 dB donc l'efficacité théorique présentée deviendrait suffisante.

AVLS n'a pas de données expérimentales pour attester de l'efficacité de ces solutions.

5.2.2. Table Stable - AVI

La solution AVI de Table Stable est également constituée d'isolateurs piézoélectriques « rigides ». La capacité portante maximale est de 600 kg par unité, ce qui induirait d'utiliser 9 à 10 unités dans le cas présent (3225 kg pour le microscope + 2000 kg de plateforme).

Une option supplémentaire dénommée LFS est disponible pour améliorer la performance du système grâce à une boucle de rétroaction basée sur un capteur au sol.

Les performances annoncées par Table Stable sont les suivantes :

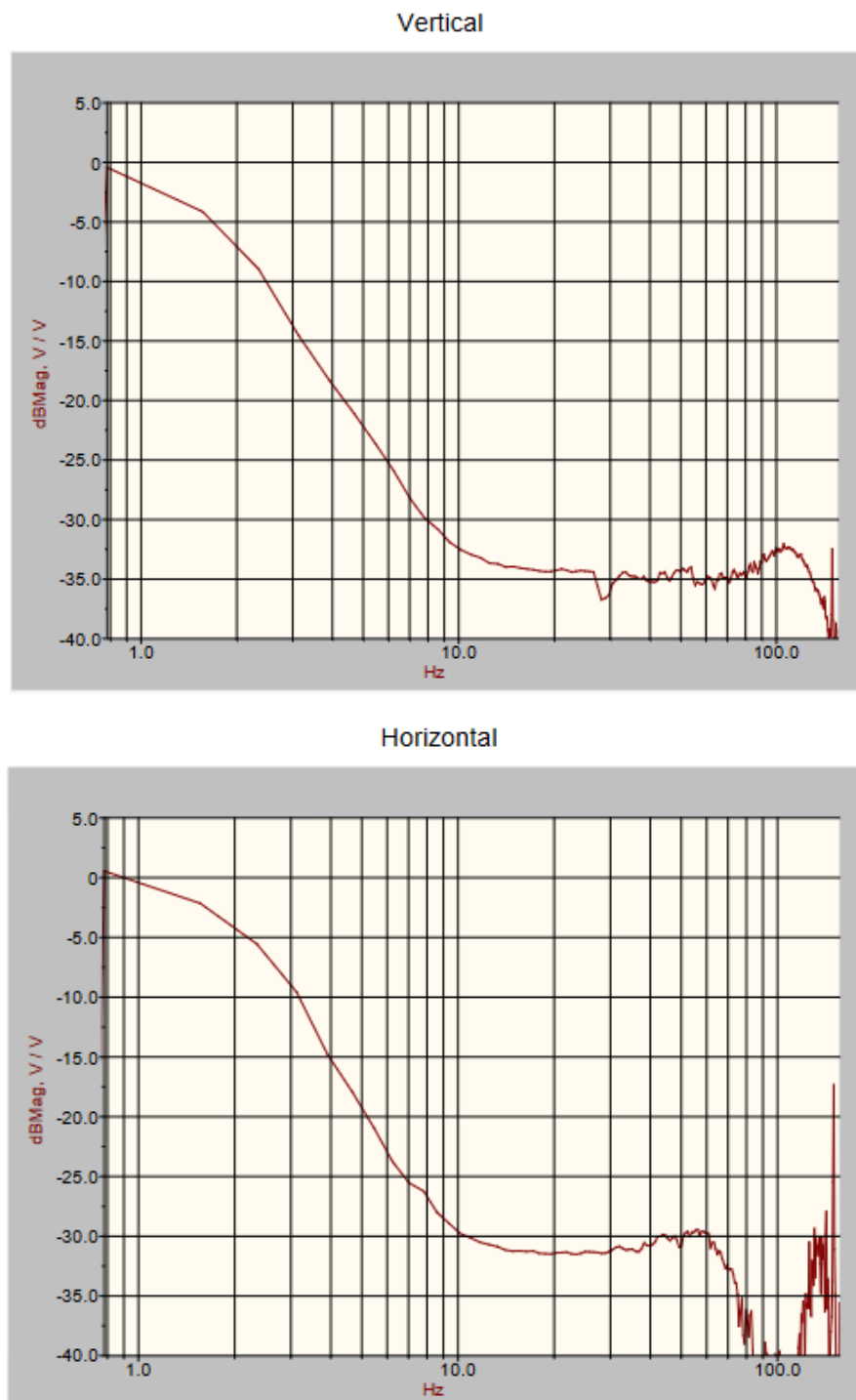


Figure 39 : Transmissibilités en vertical (haut) et horizontal (bas) pour le système AVI 600 (source : Table Stable)

La solution AVI 600 permet d'atteindre l'atténuation nécessaire pour le projet avec une incertitude pour la valeur à 50Hz où une atténuation horizontale de 32.6 dB serait nécessaire (cas d'un massif en colonne) alors qu'elle est annoncée ici à 30dB. Pour le cas d'un massif élargi, la performance présentée ici est suffisante à 50Hz (20.7 dB nécessaires).

La figure suivante présente l'effet de l'option LFS pour l'amélioration de la performance. L'exemple concerne les isolateurs AVI 200 donc la performance de base est légèrement différente.

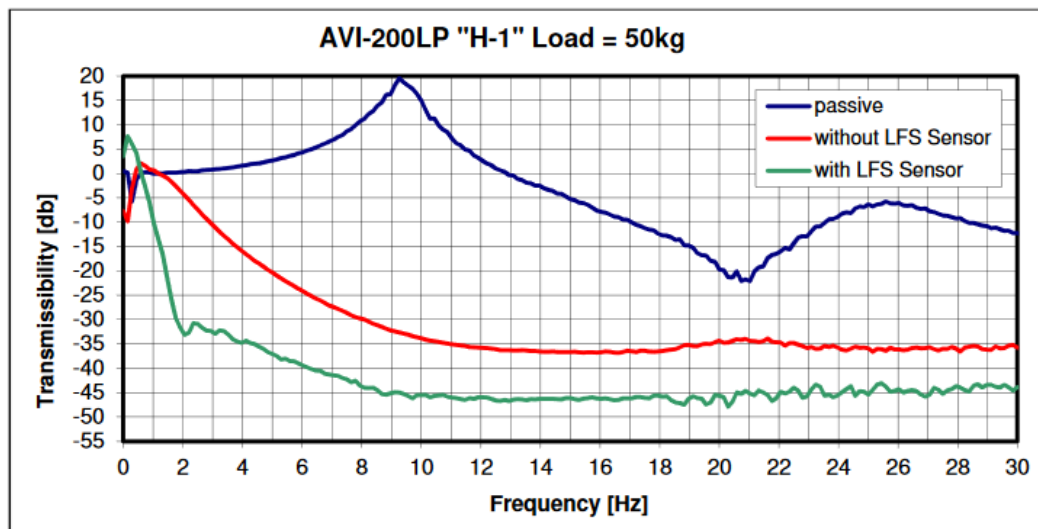


Figure 40 : Effet de l'option Table Stable LFS sur un système AVI 200 – direction horizontale (source : Table Stable)

On constate une nette amélioration de la performance antivibratile de 1Hz à 30Hz avec, à 8Hz par exemple, une amélioration de l'ordre de 14dB supplémentaires.

AVLS n'a pas de données expérimentales pour attester de l'efficacité de ces systèmes.

5.3. Synthèse des solutions antivibratiles envisageables

	Minus K	Bilz BIAIR ED HE MAX	TMC Stacis III-IV	Table Stable AVI
Type	Passif	Passif	Actif	Actif
Capacité portante par appui	1905 kg (SM-1)	15.8 tonnes (Type 5)	2045 kg (Hi capacity)	600 kg (AVI 600 S)
Fréquence propre Verticale	0.5 Hz	1.2 Hz	18 Hz (passif)	NC
Fréquence propre Horizontale	0.5 Hz	1.2 Hz	18 Hz (passif)	NC
Atténuation théorique à 8Hz Vertical	45 dB	25 dB	31 dB – 42 dB	30 dB
Atténuation théorique à 8Hz Horizontal	45 dB	25 dB	25 dB – 36 dB	27 dB
Amplification à la résonance	10 dB	12-14 dB	-	-
Prix estimatif * <i>Ces prix sont issus d'autres projet ou informations du fournisseur et ne sont pas personnalisés au projet</i>	Fourniture : 55k€ Avec plateforme : 200 k€	150-200 k€ (Hors plateforme)	80 k€ - 200 k€ (Hors plateforme ?)	105 -155 k€ (20/30€ par kg supporté – hypothèse 5300kg) (Hors plateforme)
Option possible		Option contrôle actif 200-250 k€	Stacis IV et Stacis IV FloorSense	Option LFS jusqu'à 45 dB @8Hz
Commentaire	Difficulté de réglage et masse limitée.	Nécessité d'un réseau d'air comprimé.	L'efficacité horizontale à 50Hz pourrait ne pas être suffisante sauf dans le cas d'un massif élargi.	Nécessité de beaucoup d'unités (faible capacité portante) L'efficacité horizontale à 50Hz pourrait ne pas être suffisante (hors LFS) sauf dans le cas d'un massif élargi

Tableau 5 : Tableau de synthèse des solutions antivibratiles envisagées

Il convient de noter que la performance des isolateurs est potentiellement dépendante des niveaux vibratoires à atténuer (non-linéarité en fonction de l'amplitude). Par exemple, les solutions actives de TMC

et Table Stable sont annoncées pour un niveau vibratoire d'entrée de l'ordre du gabarit VC-C. Il sera attendu du/des fournisseur(s) d'isolateur de confirmer l'efficacité de leur solution pour ce projet.

5.4. Exemples de dimensionnement de plateforme désolidarisée

Le dimensionnement de la plateforme entre les isolateurs antivibratiles et le microscope doit être menée attentivement afin de pouvoir bénéficier de la performance maximale des isolateurs.

En effet, l'atténuation vibratoire annoncée par un fournisseur est parfois considérée dans une configuration avantageuse proche d'un oscillateur simple mais le fait de poser une plateforme sur 4 appuis ou plus dégrade cette atténuation théorique du fait de modes propres de corps rigide en basculements et rotations.

De plus, comme dans le cas présent, le microscope comprend lui-même une partie désolidarisée en basses fréquences (colonne du microscope de 1500kg), ce qui peut créer un couplage avec la plateforme et ainsi dégrader son efficacité.

Enfin, les modes propres élastiques de la plateforme elle-même peuvent dégrader l'atténuation comme dans le cas d'une plateforme trop souple par exemple.

Dans le cas des systèmes actifs proposés, la nature rigide des isolateurs (par rapport à la souplesse des solutions passives) permet de limiter les couplages plateforme/microscope et couplages entre modes de translation et rotation. Le comportement élastique de la plateforme reste toutefois un sujet à étudier.

- **Effet de la masse**

Mettre en œuvre un support d'équipement désolidarisé de grande masse présente un intérêt dans le cas où :

- La raideur des isolateurs est faible (appuis pneumatiques typiquement),
- On cherche un découplage des modes de suspension de massif et modes de suspension internes au microscope,
- L'équipement à protéger des vibrations comporte lui-même des parties mobiles,
- L'équipement doit être manipulé régulièrement ou est sensible aux mouvements d'air dans le local,

Ainsi la grande inertie permet de limiter les déplacements du massif désolidarisé sous l'effet de ces actions appliquées « par le dessus ».

Si les efforts appliqués « par le dessus » sont faibles, le massif d'inertie a peu d'intérêt. Cela peut être le cas par exemple si l'utilisateur ne marche pas sur le système désolidarisé.

En revanche, hors effet de couplage avec le microscope et hors flexion propre du massif, la masse n'intervient pas dans l'atténuation des vibrations issues du sol (« par le dessous »).

- **Paramètres additionnels**

On peut de plus distinguer plusieurs paramètres importants dans la conception :

- Les premiers modes de résonance élastiques du massif doivent être à des fréquences supérieures aux vibrations usuelles (supérieurs à 150 Hz idéalement),
- Suspension basse fréquence : Le centre de gravité de l'ensemble {massif d'inertie + équipements scientifiques} doit être positionné dans le plan des appuis pour découpler les modes de résonance en translation et en rotation,
- Suspension basse fréquence : Il est avantageux de limiter le nombre d'isolateurs et de les positionner à proximité du centre de gravité du massif pour obtenir des raideurs les plus faibles possibles en translations horizontales et en rotation.

• Exemple de dimensionnement : cas d'un massif sur appuis pneumatiques

Un calcul de prédimensionnement de massif, applicable au cas avec appuis pneumatiques (Bilz BiAir), a été mené en considérant les hypothèses suivantes :

- Microscope de masse 3225 kg avec un centre de gravité situé à 1.13 m de hauteur dont 1500 kg désolidarisés à 2Hz,
- Massif béton en forme de « T » de 4 tonnes offrant une emprise en surface supérieure de 2.2 x 2 m². On considère que le massif est en granit (propriétés : E=95 GPa et $\rho=2500\text{kg/m}^3$).

Les dimensions ont été sélectionnées pour abaisser le centre de gravité de l'ensemble, obtenir un premier mode propre élastique suffisamment haut en fréquence et conserver des proportions plausibles structurellement bien que cela doive être vérifié par un spécialiste (Hors domaine AVLS).

Le massif est schématisé ci-dessous avec deux coupes perpendiculaires et en 3D. La déformée modale associée au 1^{er} mode élastique est également fournie.

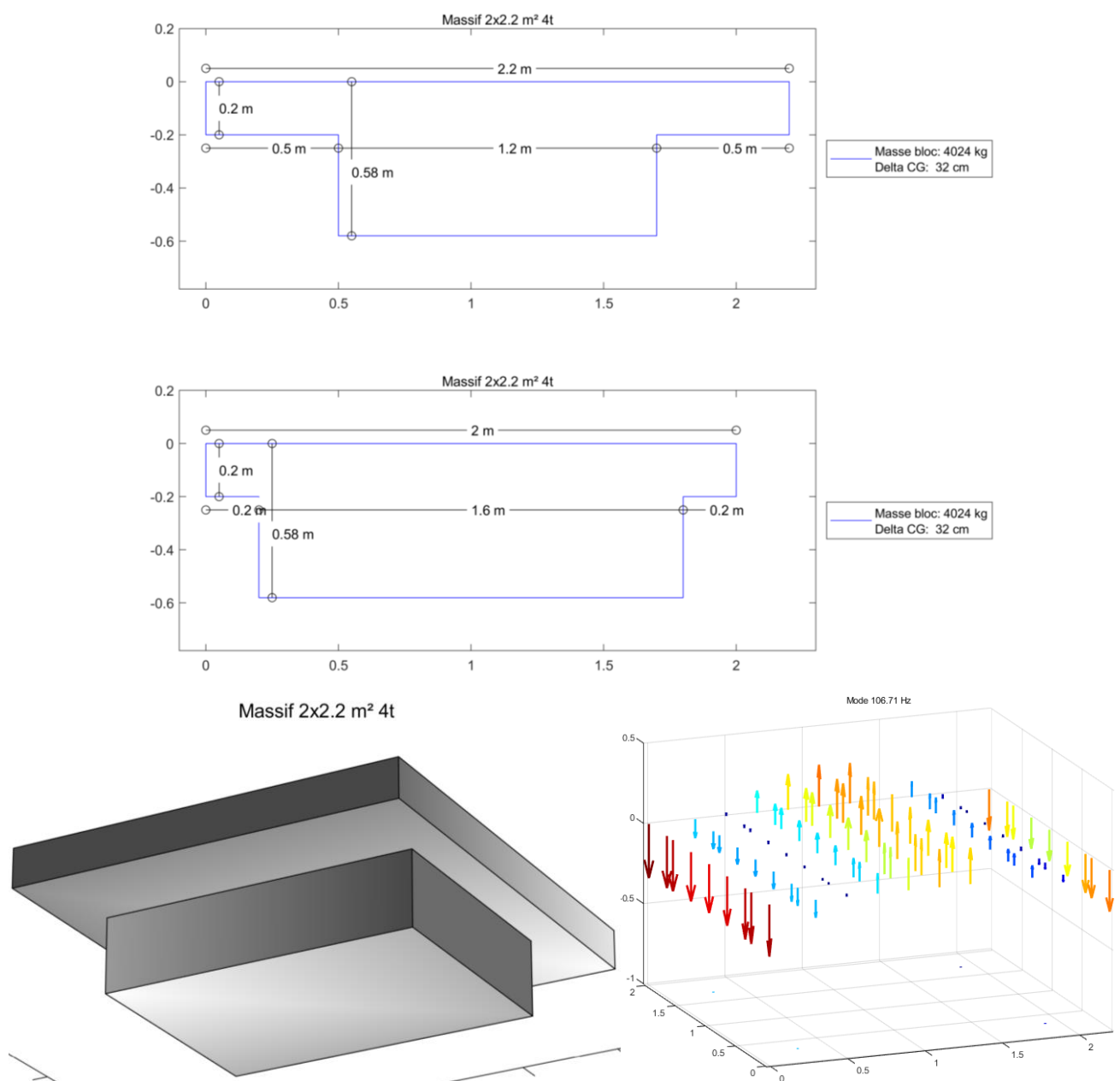


Figure 41 : Exemple de massif de 4t & Déformée modale du 1^{er} mode

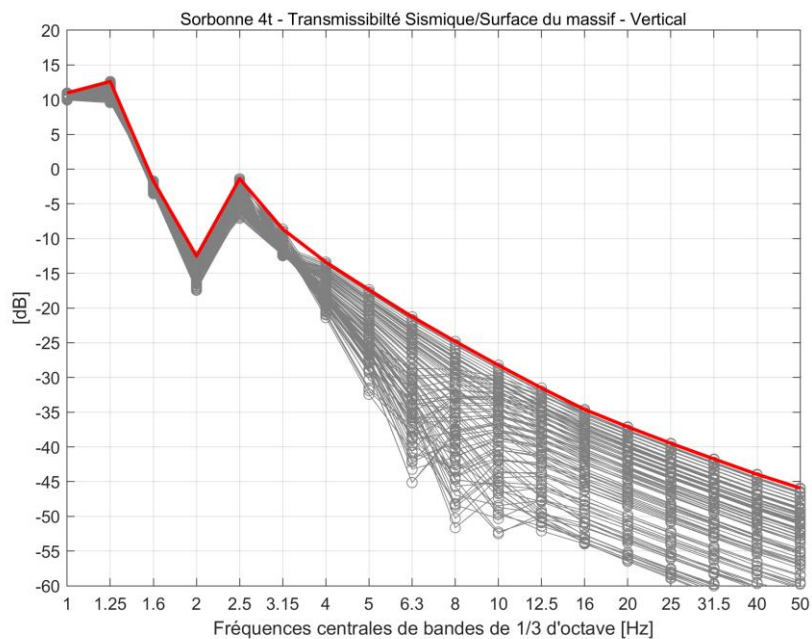
Avec ces dimensions nous obtenons les paramètres suivants :

- *Premier mode élastique (conditions libre-libre) : 107 Hz,*
- *Différence d'altitude entre plan des appuis et plan du centre de gravité {massif + microscope} : 32cm*
- *Masse : 4024kg*

On peut estimer par calcul l'atténuation vibratoire de ce massif en considérant les caractéristiques suivantes :

- *Massif posé sur 4 éléments raideurs dimensionnés pour une fréquence propre verticale de 1.2Hz et horizontale de 1.2Hz,*
- *Amortisseurs visqueux en parallèle dimensionnés pour obtenir un amortissement de 6%,*
- *Le microscope est modélisé par une masse ajoutée inerte (enceinte) et une masse posée sur 4 raideurs/amortisseurs (colonne du microscope). Les appuis sont dimensionnés pour des fréquences de 2Hz et amortissement de 6%. L'inertie du microscope est également prise en compte,*
- *Une excitation sismique (déplacement imposé à la base) est appliquée indépendamment à chaque pied puis la réponse en chaque point de la surface du massif est obtenue en considérant un déphasage aléatoire entre les excitations,*
- *L'enveloppe du faisceau renseigne sur les niveaux d'atténuation attendus dans cette configuration sans jonctions parasites.*

Les transmissibilités calculées sont présentées ci-dessous :



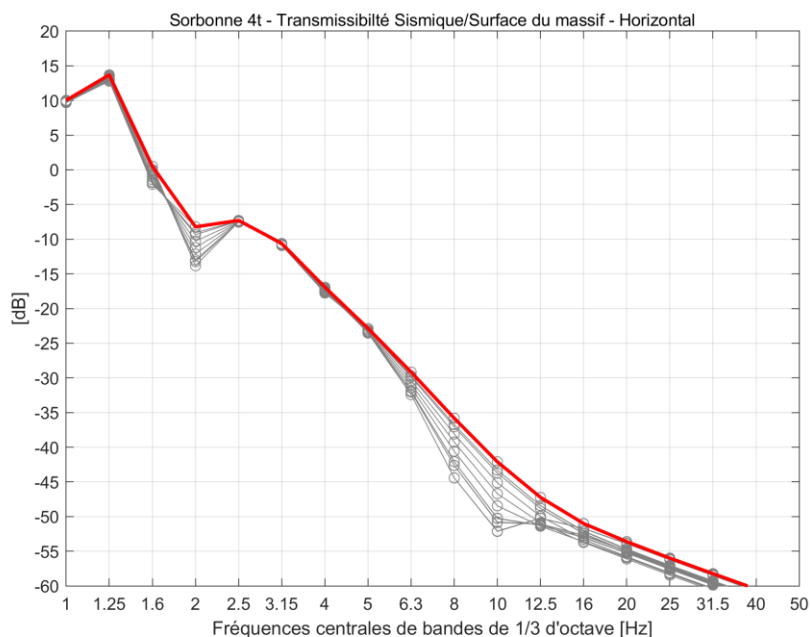


Figure 42 : Transmissibilités calculées pour un massif de 4t sur appuis pneumatiques – Vertical (haut) – Horizontal (bas)

On constate l'effet du couplage entre oscillateurs avec le pic d'amplitude à 2.5Hz dans la direction verticale. L'oscillateur à 2Hz représentant le microscope dégrade le filtrage du massif support jusqu'à quasiment l'annuler (0 dB).

Toutefois, les valeurs d'atténuation obtenues sont compatibles avec les attentes issues des mesures.

On note que cette situation est « idéale », c'est-à-dire sans jonction parasite et sans non-linéarité de comportement des différents éléments. Les performances obtenues dans les plus hautes fréquences notamment, de 20Hz à 50Hz typiquement, sont probablement surestimées.

• Exemple de dimensionnement : Cas d'un massif sur système actif

Un exemple de dimensionnement pour un massif d'au moins 2 tonnes destinés aux solutions actives est fourni ci-dessous. Ce massif est supposé en granit.

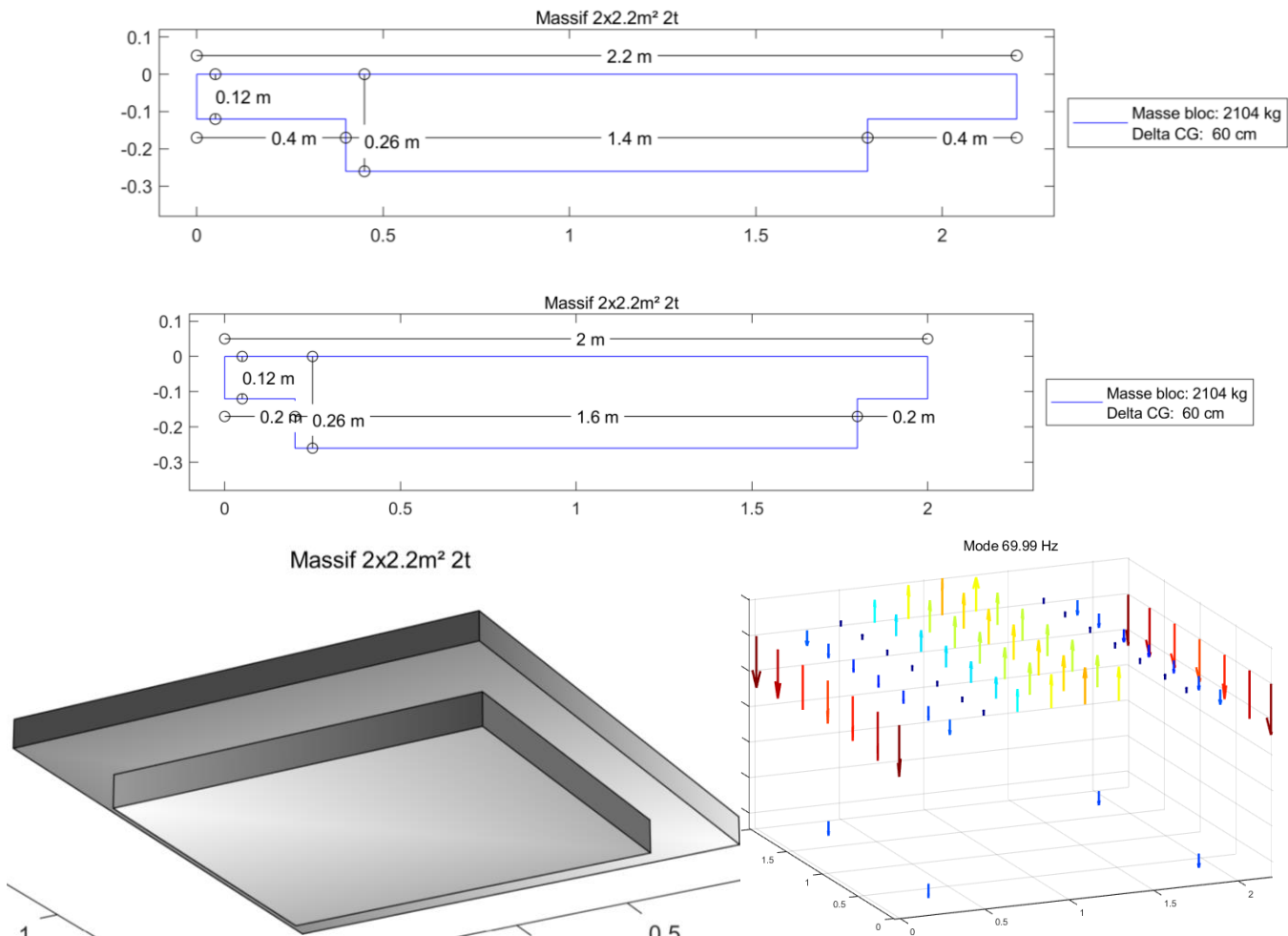


Figure 43 : Exemple de massif de 2t & Déformée modale du 1er mode

Avec ces dimensions nous obtenons les paramètres suivants :

- Premier mode élastique (conditions libre-libre) : 70 Hz,
- Différence d'altitude entre plan des appuis et plan du centre de gravité {massif + microscope} : 60cm
- Masse : 2104kg

Avec un premier mode élastique à 70Hz, ce massif permet d'éviter une coïncidence en fréquence avec des sources vibratoires typiques d'équipements techniques à 25Hz, 50Hz, 75Hz, 100Hz etc. En l'occurrence les niveaux vibratoires mesurés sur site à 70Hz sont faibles donc le système sur isolateurs devrait assurer de faibles niveaux également.

L'effet des isolateurs actifs n'étant pas modélisable aisément, les transmissibilités ne sont pas fournies pour cette configuration.

• Fourniture de massif en granit :

Un exemple de fournisseur de granit technique de cette nature est Microplan. AVLS a pu estimer les propriétés mécaniques d'un tel massif dans le cadre d'un autre projet.

L'ordre de grandeur de prix d'un tel massif était de 15 à 25 k€ en 2021.

6. SYNTHÈSE ET CONCLUSION

6.1. Synthèse

Dans le cadre du projet PANAM d'aménagement d'un local de microscopie sur le site de Jussieu, la présente étude vibratoire est composée de :

- Une campagne de mesures vibratoire longue durée sur site visant à caractériser les vibrations ambiantes sur site, l'impact d'événements contrôlés et les occurrences d'événements plus nuisibles. Ces résultats sont comparés aux exigences du fournisseur de microscope NION.
- Une étude par modélisation par éléments finis de la structure future pour déterminer son impact vibratoire et l'appliquer aux données mesurées pour estimer les niveaux vibratoires futurs au pied du microscope.
- L'étude de solutions antivibratiles adaptées à ce projet et des exemples de dimensionnement de plateformes désolidarisées.

6.1.1. Campagne de mesures

La campagne de mesures s'est déroulée en continu du 29/08 au 03/09/2024 et comprenait deux capteurs vibratoires (vélocimètres) positionnés au niveau R-1 du local du futur microscope : Le point 1 au pied d'un poteau en façade du bâtiment, le point 2 au centre du local.

Des essais vibratoires contrôlés ont été menés : mise en fonctionnement des équipements du local technique de liquéfaction voisin, passage de véhicules à proximité, claquements de portes, marche dans le local...

Les analyses au long cours ont permis d'évaluer la répartition statistique des niveaux vibratoires.

Les résultats ont été comparés au seuil vibratoire énoncé par le fournisseur Nion dans son guide de pré-installation.

Les résultats montrent que le seuil Nion est dépassé la majorité du temps et principalement dans la bande de fréquence 10Hz – 20Hz.

La principale source de nuisance est le passage de véhicules (bus notamment) dans la rue des fossés Saint-Bernard, bien qu'elle soit distante de 70m. Ces événements surviennent toutes les 2 à 3 minutes en journée. Les dépassements du critère peuvent couramment dépasser 20dB dans les trois directions de mesures.

Ainsi une réfection de la voirie de la rue des fossés Saint-Bernard permettrait d'améliorer significativement l'environnement vibratoire du site.

De même la circulation d'un chariot élévateur dans la cour du local de liquéfaction produit d'importants niveaux vibratoires. Il conviendrait de limiter la circulation à proximité immédiate du local ou de corriger la planéité du bitume qui est endommagé.

Le fonctionnement des compresseurs à pistons dans le local de liquéfaction produit des vibrations basses fréquences à 8Hz qui peuvent être une source de nuisance car le seuil Nion est dépassé nettement dans ce cas. On note qu'il est apparemment prévu de remplacer ces compresseurs à pistons par des compresseurs à vis moins nuisibles.

L'activité interne et notamment les claquements de portes provoquent des émergences nettes par rapport au niveau vibratoire résiduel mais les niveaux atteints restent inférieurs à ceux liés aux passages de véhicules dans les basses fréquences.

La suite des études a été menée sur la base de l'indice fractile L0.1 qui représente les niveaux vibratoires dépassés 99.9% du temps. Le spectre vibratoire L0.1 est représentatif des événements vibratoires les plus forts.

6.1.2. Etude numérique de la structure future

Une étude par modélisation aux éléments finis a été menée pour évaluer le comportement dynamique du futur massif de fondation sur pieux qui accueillera le microscope.

Pour cela, deux modèles ont été créés, un représentant la situation actuelle mesurée et un représentant la situation future avec un massif de 2.2m x 2.2m x 2.75m sur pieux. Les modèles comprennent un volume de terrain avec ses strates géologiques pour prendre en compte la propagation de vibrations lointaines par le sol et les interactions sol-structure. Les paramètres mécaniques du sol ont été ajustés grâce aux grandeurs dynamiques caractéristiques mesurées sur place (Admittance et FRF).

Pour chaque modèle on simule une source vibratoire sollicitant le terrain et on calcule la réponse vibratoire sur la surface de référence (radier ou massif sur pieux) afin d'obtenir une fonction de réponse en fréquence (FRF).

Le rapport des courbes des deux modèles constitue un gabarit de correction permettant d'extrapoler les niveaux vibratoires futurs sur le massif sur pieux à partir des niveaux mesurés sur le radier.

Le gabarit obtenu en direction verticale montre que le massif futur ne modifierait pas outre mesure les niveaux vibratoires mesurés.

Le gabarit obtenu en direction horizontale montre cependant une dégradation importante des niveaux vibratoires horizontaux par l'ajout du massif. En effet, l'élancement du massif (près de 3m de hauteur) amplifie les vibrations malgré la présence de pieux. L'amplification à ajouter aux niveaux mesurés atteint 10 à 30 dB de 31,5Hz à 50Hz.

Ainsi à la lumière de cette extrapolation, le besoin d'atténuation vibratoire par une solution d'isolation complémentaire a pu être quantifié dans les 3 directions.

Les valeurs obtenues sont réalistes et des solutions existantes apparaissent adaptées. On note que la solution choisie devra permettre d'atténuer les vibrations dès 3.15Hz (de 5.5 dB en direction T) et être effective à 50Hz et au-delà (de 33 dB en direction L).

Une étude complémentaire de variante de massif a été menée (indice 2 de ce rapport) afin d'estimer l'effet d'un élargissement de la base du massif.

Le comportement vibratoire du massif élargi est nettement amélioré pour les hautes fréquences, notamment dans les directions horizontales où le besoin d'atténuation passe de 33 dB (dir. L) pour la conception initiale à 21 dB pour la variante élargie.

6.1.3. Etude de solutions antivibratiles

4 solutions du commerce ont été présentées, deux solutions passives et deux solutions actives : Isolateurs à raideur négative (MinusK), isolateurs pneumatiques (Bilz), plots actifs TMC et plots actifs Table Stable. Leurs performances permettent, selon les fournisseurs, d'atteindre en grande partie les atténuations requises.

Des résultats expérimentaux d'AVLS sur les solutions passives ont été présentés et montrent que des performances proches ont pu être mesurées mais qu'elles peuvent aussi être dégradées par des défauts de réalisation ou des raideurs parasites inévitables (câbles, couvre-joints...).

Les solutions actives présentées sont prometteuses mais AVLS n'a pas pu constater expérimentalement leurs performances.

Un tableau de synthèse résume les caractéristiques des 4 solutions (Tableau 5).

Enfin des exemples de dimensionnement de plateforme intermédiaire entre les isolateurs et le microscope ont été donnés. Ils sont basés d'une part sur les indications de Nion (dimensions et masses minimales) et d'autre part sur les paramètres permettant de maîtriser leur comportement dynamique (modes de résonance élastique, modes de corps rigide couplés...). Une estimation théorique d'atténuation dans le cas d'appuis pneumatiques est présentée.

6.2. Conclusion

Bien que hors marché, une première piste de solution pour améliorer les conditions vibratoires serait de réaliser une réfection de la voirie sur la rue des fossés Saint Bernard.

Cette étude a montré qu'une plateforme désolidarisée était nécessaire pour atteindre les exigences environnementales du fournisseur de microscope Nion.

Quatre variantes de solutions antivibratiles ont été présentées, elles présentent chacune des avantages et inconvénients qu'il convient de discuter avec l'équipe projet afin d'en sélectionner une.

En outre, la variante élargie de massif de fondation étudiée permet d'améliorer nettement le comportement vibratoire de la structure support du microscope. Adopter cette conception permettrait de diminuer le besoin d'atténuation vibratoire en hautes fréquences vis-à-vis du critère constructeur et ainsi fournir une meilleure marge de sécurité au regard des performances annoncées des dispositifs antivibratiles.

On note que certaines contraintes supplémentaires n'ont pas été prises en compte dans la présente étude telles que :

- Les contraintes liées aux exigences électromagnétiques (compatibilité des isolateurs, interface avec le revêtement μ -métal...),
- L'encombrement vertical de la plateforme antivibratile (nécessité d'ajuster l'arase supérieur du massif de fondation par exemple),
- La disponibilité de réseaux nécessaires aux isolateurs (air comprimé pour les isolateurs pneumatiques, réseau électrique pour les solutions actives).

On rappelle également que toute modélisation numérique constitue une simplification et une idéalisation de la réalité. Des différences peuvent donc apparaître entre les résultats calculés et les résultats mesurés dans le futur. Néanmoins ces écarts sont minimisés par la maîtrise des hypothèses et des données d'entrée.

Enfin, le coût prévisionnel de ces solutions a été estimé à l'appui d'expériences précédentes d'AVLS et d'échanges sommaires avec les fournisseurs. Ces coûts peuvent varier nettement selon la spécificité des besoins, les contraintes d'accès et les éventuelles adaptations à réaliser.

Annexe 1. Terminologie

• Signal temporel

Le signal temporel est le signal brut issu des capteurs de vibrations. Il représente l'évolution de la grandeur physique mesurée, en fonction du temps.

Dans le cas de la gêne vibratoire et des phénomènes de type sismique en général, la grandeur physique mesurée est couramment la vitesse vibratoire, en mètres par seconde.

• Niveau de vitesse vibratoire

Le niveau de vitesse vibratoire L_v est défini en dB par la relation : $L_v = 20 \log (v/v_0)$

- v est la vitesse vibratoire en m/s,
- v_0 est la vitesse vibratoire de référence ($v_0 = 5.10^{-8}$ m/s).

• Niveau (vibratoire ou acoustique) équivalent

Le niveau $L_{eq,T}$ est défini comme étant le niveau équivalent, mesuré sur des tranches consécutives de T secondes. T est généralement de 1 s.

• Bande de tiers d'octave

Une bande de tiers d'octave est une bande de fréquence vérifiant la relation : $f_{max} = f_{min} \cdot \sqrt[3]{2}$. Les fréquences centrales de bande de tiers d'octave sont normalisées. Dans la bande de fréquence d'intérêt de la présente étude, il s'agit des fréquences suivantes : 5 6.3 8 10 12.5 16 20 25 31.5 40 50 63 80 100 125 160 200 Hz

• Indices fractiles

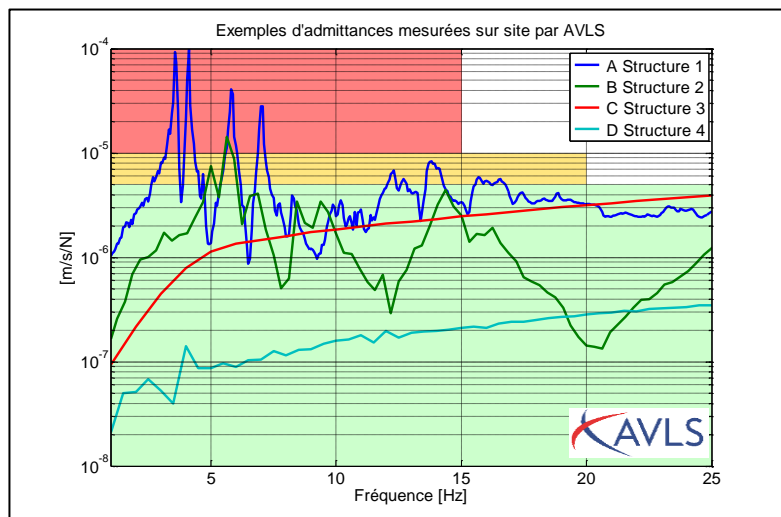
Par analyse statistique du $L_{eq,1s}$, on peut déterminer le niveau de vitesse vibratoire qui est dépassé pendant N % de l'intervalle de temps considéré, dénommé "vibratoire fractile". Son symbole est L_N .

Par exemple, $L_{90,1s}$ est le niveau de vibration équivalent dépassé pendant 90 % de l'intervalle de mesure, avec une durée d'intégration égale à 1 s.

• Admittances mécaniques

Une mesure d'admittance permet de tracer le rapport de la réponse en vitesse vibratoire par rapport à une force unitaire injectée (Unité = (m/s)/N) : elle caractérise la rigidité et l'inertie du support, et constitue un bon moyen de contrôle de la qualité mécanique des surfaces recevant les capteurs, mais aussi d'investigation des fréquences propres des structures.

A l'aide d'un marteau instrumenté, une force connue est donc injectée à proximité du capteur ; le signal de vitesse vibratoire résultant est relevé permettant ainsi le calcul de l'admittance (quotient du spectre de vitesse par le spectre de force).



A : Plancher mixte bac acier non collaborant ; B : Plancher dalle alvéolée ;
C : Plancher béton armé de logement ; D : Dallage béton armé

• Cohérence

La cohérence permet d'estimer la causalité / linéarité de la sortie (réponse vibratoire) par rapport à l'entrée (excitation vibratoire). La fonction de cohérence vaut 1 lorsque le signal de sortie est entièrement causé (via une relation de linéarité) par le signal d'excitation ; 0 dans le cas contraire.

• Gabarits vibratoires ASHRAE

L'association américaine de réalisateurs d'équipements techniques destinés aux laboratoires de recherche - l'ASHRAE - a défini des seuils de « qualité vibratoire » permettant de qualifier les planchers, afin de déterminer leur compatibilité vibratoire avec divers équipements de recherche, cf. Colin Gordon : « Generic Vibration criteria for vibration sensitive equipment », 1999 révisé en 2005.

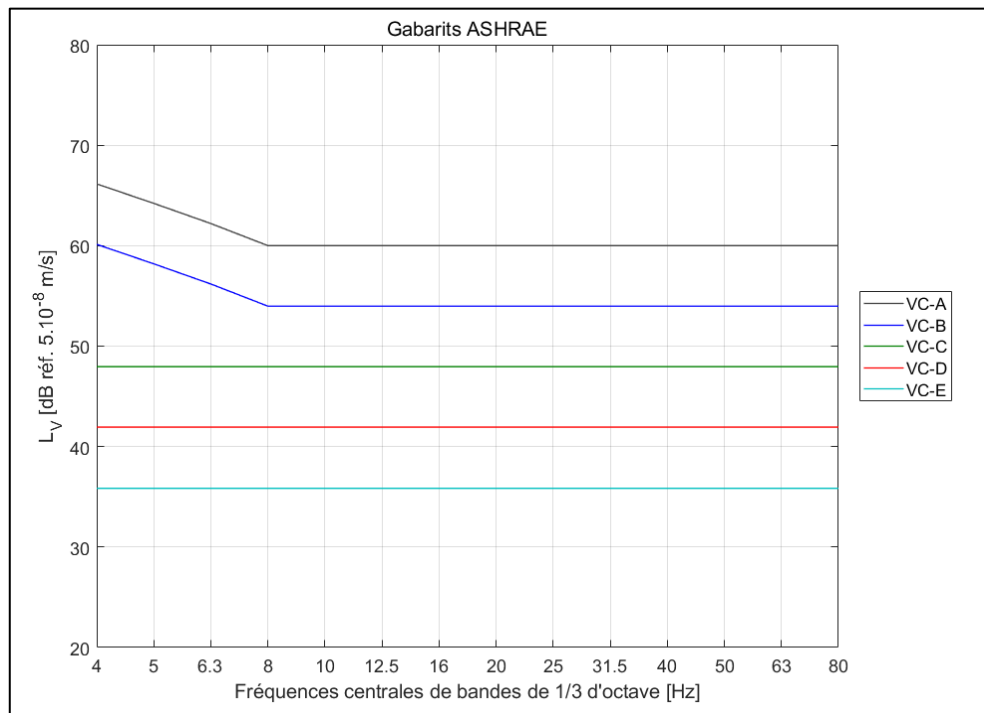
Ces seuils ou gabarits sont utilisés couramment pour caractériser les vibrations dans les bâtiments scientifiques.

Ces seuils sont exprimés en vitesse vibratoire en m/s (cf. ci-dessous).

De plus, le critère, plutôt que d'être exprimé dans le domaine temporel (niveau crête par exemple), est exprimé sous forme de spectre de tiers d'octave, ce qui simplifie considérablement la représentation. Les gabarits ont initialement été définis entre 4 Hz et 80 Hz, puis étendus à 1 Hz.

Par exemple le niveau VC-E correspond à 3 $\mu\text{m/s}$ RMS dans chaque bande de tiers d'octave de 1 Hz à 80 Hz.

Ces gabarits peuvent être représentés de manière compacte en exprimant les niveaux en décibels, comme ci-dessous.



Annexe 2. Photographies des capteurs



Point 1



Point 2