



Tunnel du Soulat à Marseille

Vibrations

Évaluation de l'impact vibratoire

Réf. : E23006 _Tunnel du Soulat_v4

Date : 04/07/2023

Version : 4

Rédaction : M. JABIER

Validation : R. WALTHER



SA au capital de 192 440 €
RC Grenoble : B 401 502 661
Siret : 401 502 661 00010
Code APE : 7112B
N° TVA : FR 19 401 502 661
www.egis-acoustb.fr

SIÈGE SOCIAL
24 rue Joseph Fourier
38400 Saint Martin d'Hères
+33 (0)4 76 03 72 20
acoustb.egis-se@egis.fr

AGENCE ÎLE-DE-FRANCE
4 rue Dolorès Ibaruri
93100 Montreuil



Table des révisions

Indice	Date	Rédacteur	Vérificateur	Modification
01	20/04/2023	MJAB	RWAL	Première diffusion
02	01/06/2023	MJAB	RWAL	Prise en compte des remarques
03	06/06/2023	MJAB	RWAL	Prise en compte des remarques
04	04/07/2023	MJAB	RWAL	Prise en compte des remarques

Sommaire

1. Objet de l'étude.....	5
2. Généralités et cadre normatif	6
2.1. Grandeurs acoustiques et vibratoires.....	6
2.2. Propagation des ondes vibratoires dans le sol	8
2.3. Contexte normatif et réglementaire	9
2.4. Échelle de niveaux vibratoires	10
2.5. Seuil vibratoire de dommages aux structures.....	11
2.6. Seuils vibratoires de perception tactile	11
2.7. Perception auditive des vibrations (bruit solidien).....	12
3. Méthodologie de l'étude	13
3.1. Principe général	13
3.2. Estimation du niveau vibratoire et rayonné	14
3.2.1. Calculs des fonctions de transferts $FT_{\text{Tunnel-R+N}}$	14
3.2.2. Calculs des niveaux vibratoires au plancher	14
3.2.3. Calculs des niveaux de bruit rayonné par le plancher.....	14
4. Mesures de vibrations	15
4.1. Protocole de mesure	15
4.2. Matériel de mesure utilisé	15
4.2.1. Capteur Sequoia.....	15
4.2.2. Accéléromètres ICP et Wilcoxon	15
4.2.3. Source vibratoire artificielle	16
4.3. Présentation des mesures et hypothèses retenues.....	17
4.3.1. Caractérisation de la source vibratoire	17
4.3.2. Localisation des mesures	20
4.3.3. MASW	21
4.3.4. Fonction de transfert	22
4.4. Résultats des calculs.....	29
4.4.1. Coupes modélisées	29
4.4.2. Fonction de transfert calculée et calage du modèle	32
4.4.3. Évaluation du niveau vibratoire et du niveau de bruit rayonné.....	33
4.4.4. Évaluation du niveau vibratoire vis-à-vis du risque de dommages aux structures.....	35
5. Conclusion	36

Table des figures

Figure 1 : Élévation du site d'étude	5
Figure 2 : Phénomènes vibro-acoustiques au passage d'un train (<i>SOURCE : ACOUSTB</i>)	8
Figure 3 : Échelle de niveaux vibratoires (© Egis/ACOUSTB)	10
Figure 4 : Graphique présentant les valeurs seuils à ne pas dépasser pour le cas des risques de dommage aux structures	11
Figure 5 : Proposition de courbes de niveau de bruit à l'intérieur des bâtiments.....	12
Figure 6 : Illustration du principe méthodologique : le logiciel est utilisé pour calculer la propagation des vibrations dans le sol et les fondations, la mesure pour estimer la propagation des vibrations dans la structure	13
Figure 7 : Photos du matériel de mesure	15
Figure 8 : Pilonneuse.....	16
Figure 9 Butt kicker et exemple de signaux contrôlés envoyés dans le sol.....	16
Figure 10 Spectres de caractérisation de la source (mesure sur site à 8m)	18
Figure 11 Spectres de caractérisation de la source retenu après correctif lié à la correction de la vitesse et de la masse des trains.....	19
Figure 12 Plan d'implantation des mesures	20
Figure 13 Localisation de la mesure MASW	21
Figure 14 : Signaux envoyés dans le tunnel et récupérés en surface	24
Figure 15 : Niveaux vibratoires mesurés dans l'école	24
Figure 16 : Fonction de transfert Tunnel Ecole Maternelle	25
Figure 17 : Niveaux vibratoires pilonneuse mesurés dans le lycée.....	26
Figure 18: coupe en travers du tunnel.....	29
Figure 19: élévation et localisation des coupes	29

Liste des tableaux

Tableau 1 : Valeurs de niveaux vibratoires admissibles d'après la norme ISO 2631-2 de 1989	11
Tableau 2 : Appareillage de mesure MASW	15

1. Objet de l'étude

Cette étude concerne l'évaluation des niveaux vibratoire associées au projet de réouverture de la circulation ferroviaire dans le tunnel du Soulat dans le cadre de l'aménagement du nouveau terminal à conteneurs du port de Marseille pour la reconstitution des fonctionnalités du Canet.

Des circulations de trafic FRET sont attendues à des vitesses jusqu'à 50 km/h selon le sens de circulation et le tonnage des trains.

Trois secteurs ont été sélectionnés lors de la concertation publique pour étudier le niveau de sensibilité aux vibrations : l'école maternelle du fait de sa proximité avec la route du tunnel, le lycée St Exupéry, les habitations au sud de par leur proximité avec la route du tunnel.

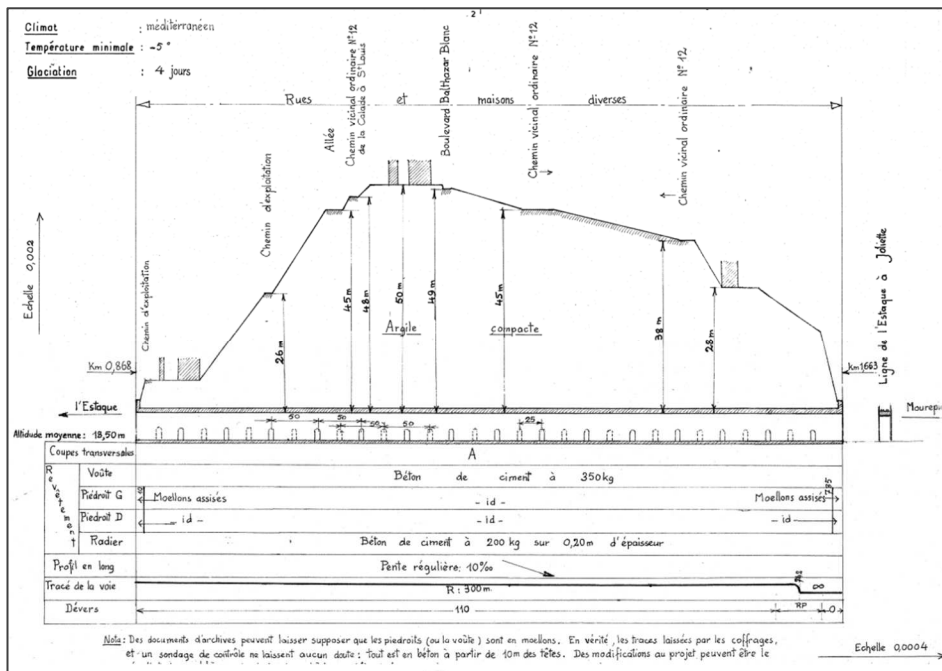


Figure 1: Élévation du site d'étude

Un trafic d'une dizaine de circulations journalière est projeté à l'horizon 2046, essentiellement concentré sur la période du matin (6h-9h) et sur la période de soirée (17h-20h).

Dans ce cadre, une campagne de mesures de vibration a été réalisée du 13 au 15 février 2023.

Les mesures réalisées sont les suivantes :

- Caractérisation vibratoire d'un train fret dans des conditions de circulation proche de celles rencontrées sur site,
- MASW
- Fonction de transfert « tunnel – fondation école maternelle » et « fondation école maternelle – plancher école maternelle »
- Fonction de transfert « sol lycée– plancher lycée »

Elles ont pour objectif la caractérisation des sources vibratoires et des fonctions de transfert du tunnel aux bâtiments, qui permettra la modélisation vibratoire sur 3 secteurs (repérer sur les pages suivantes). L'objectif de l'étude est d'évaluer le niveau vibratoire et le bruit rayonné attendu sur chacun des 3 secteurs et de comparer ces derniers aux valeurs usuellement rencontrées (dommage aux structures, gêne tactile et audible...).

Ce rapport présente les résultats de cette campagne de mesures et de la modélisation.

2. Généralités et cadre normatif

2.1. Grandeurs acoustiques et vibratoires

Bandes de tiers d'octave et Niveau Global :

Les bandes de tiers d'octave sont, en acoustique ou en vibrations, des bandes de l'échelle des fréquences permettant une analyse simplifiée d'un bruit ou d'un phénomène vibratoire. Les bandes de tiers d'octave sont centrées sur les fréquences suivantes : 8 / 10 / 12,5 / 16 / 20 / 25 / 31,5 / 40 / 50 / 63 / 80 / 125 / 160 Hz

Le niveau global correspond à la somme d'énergie de toutes les bandes d'octaves.

Bruit solidien :

Le bruit solidien est le niveau sonore induit par le rayonnement acoustique des différentes parois du bâtiment (murs, cloisons, sols, plafonds) soumises à une vibration mécanique.

Courbes de Noise Rating (NR)

Les courbes d'évaluation du bruit, ou courbes NR (Noise Rating) sont des courbes basées sur l'allure générale des courbes de niveau d'isotonie de l'oreille et permettent de déterminer au moyen d'un seul chiffre, le niveau de pression acoustique maximum autorisé dans chaque bande d'octave.

En effet, la sensibilité de l'oreille humaine est variable suivant la fréquence : pour notre oreille, 60dB à 1000Hz est plus dérangeant que 60dB à 250Hz (la sensibilité est optimale entre 2 et 5kHz).

Décibel

Le décibel est une échelle de mesure logarithmique en acoustique, c'est un terme sans dimension. Il est noté dB. Le décibel étant une échelle logarithmique, il est à remarquer que :

$$80\text{dB} + 80\text{dB} = 83\text{dB} \text{ et } 80\text{dB} + 90\text{dB} = 90\text{dB}$$

Décibel A

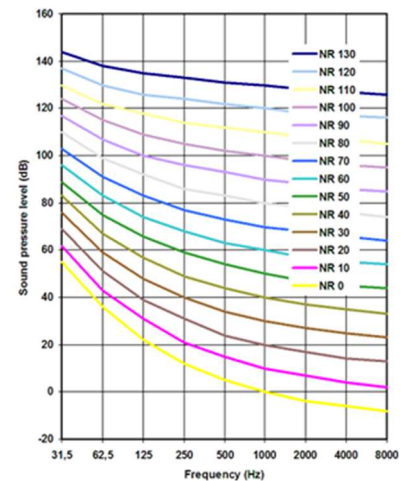
La lettre A signifie que le décibel est pondéré pour tenir compte de la différence de sensibilité de l'oreille humaine à chaque fréquence, exprimée par le sigle dB(A). Elle atténue les basses fréquences.

Fonctions de transfert/Facteur de transmission (au sens du projet européen RIVAS)

La fonction de transfert est une représentation mathématique de la relation entre l'entrée et la sortie d'un système linéaire invariable dans le temps.

Le facteur de transmission est un rapport complexe sans dimension de la réponse d'un système en régime de vibration forcée à l'excitation. Ce peut être un rapport de forces, de déplacements, de vitesses ou d'accélération.

Dans ce rapport, par analogie avec le projet européen RIVAS les termes « fonction de transfert » et « facteur de transmission » sont employés indifféremment pour désigner un rapport de vitesses entre deux points de mesure.





Mobilité mécanique (au sens de l'ISO 2041 : 2018)

La mobilité mécanique est le rapport complexe entre la vitesse, relevée en un point d'un système mécanique, et la force relevée au même point ou en un autre point dans le même système

Dans le cadre de cette campagne, la mobilité est le rapport de la réponse en vitesse complexe au point i à la force d'excitation complexe au point j , tous les autres points de mesure de la structure pouvant répondre librement sans aucune autre contrainte que celles qui représentent le support normal de la structure dans l'application prévue pour cette structure.

Si la réponse en vitesse mesurée est une réponse en translation et si la force d'excitation appliquée est une force rectiligne, les unités du terme de mobilité seront [m/s/N]. Cette situation est le cas général de ce rapport, la force étant appliquée en tunnel dans la direction verticale et la réponse des planchers étant mesurée dans la direction verticale.

Niveau vibratoire résiduel

Le niveau vibratoire résiduel correspond au niveau vibratoire enregistré lorsqu'un ou plusieurs phénomènes vibratoires particuliers sont supprimés. Dans le cadre de cette étude, le niveau vibratoire résiduel correspond au niveau vibratoire mesuré en l'absence de source vibratoire contrôlée.

Vitesse particulière

La vitesse particulière caractérise la vitesse des déplacements des particules d'un élément constructif (un plancher par exemple) autour de sa position d'équilibre. Elle constitue une grandeur pertinente pour décrire les phénomènes vibratoires, notamment son expression sous forme de moyenne RMS, notée V_{rms} , mesurée en un point et exprimée en mm/s ou en dBv. Le seuil de perception humaine tactile est de l'ordre de 0,1 mm/s, soit 66 dBv par bande de tiers d'octave.

Le niveau de vitesse vibratoire est aussi exprimé en dBv par la relation suivante :

$$Lv = 10 \log \frac{V_{rms}^2}{V_{ref}^2}$$

L_v , niveau de vitesse vibratoire en dB par rapport à la référence 5×10^{-8} m/s,
 V_{rms} , niveau de vitesse vibratoire RMS en m/s, et
 V_{ref} , niveau de vitesse vibratoire de référence fixé à 5×10^{-8} m/s.

2.2. Propagation des ondes vibratoires dans le sol

Les ondes vibratoires se transmettent à travers le sol jusqu'à l'intérieur des bâtiments, ce qui peut générer un bruit de grondement appelé bruit solidien (bruit généré par la vibration des structures du bâtiment, par opposition au bruit aérien qui se transmet par les ouvertures du bâtiment).

Le chemin suivi par les ondes générées au passage du métro depuis le rail jusqu'à l'intérieur des bâtiments est illustré dans le schéma suivant :

- A → B** : Transmission des ondes générées au passage du train à la paroi du tunnel via les éléments de la voie (attaches de rails, traverses) ;
- B → C** : Transmission des ondes dans le sol aux fondations des bâtiments ;
- C → D** : Transmission des ondes aux murs et aux planchers du bâtiment.
- D** : Bruit de grondement dans une pièce du bâtiment.

La figure suivante reprend ces diverses étapes de manière schématique.

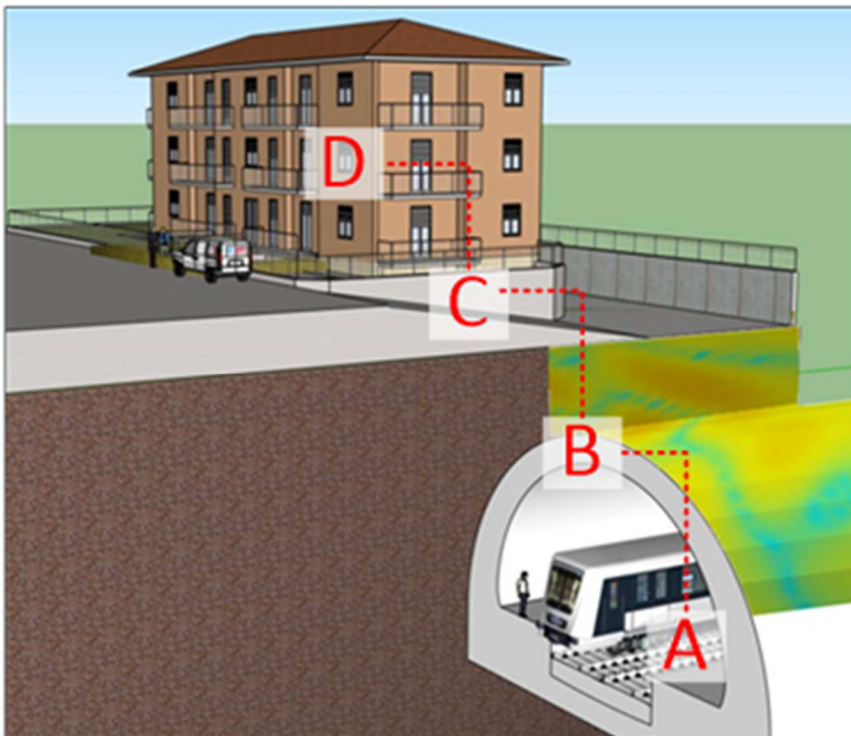


Figure 2 : Phénomènes vibro-acoustiques au passage d'un train (SOURCE : ACOUSTB)



2.3. Contexte normatif et réglementaire

Les textes suivants ont servi de cadre réglementaire pour établir le protocole de mesure des vibrations :

- Circulaire du 23/07/86 relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement ;
- LOI n° 2019-1428 du 24 décembre 2019 d'orientation des mobilités (LOM), Article 90, 91 et 93 ;
- Code de l'environnement. Article 28 quater A, article L. 571-10-3 : Nuisances générées par les vibrations liées au transport ferroviaire ;
- NF E90-020-1 de 2015 « Vibrations et chocs mécaniques – Méthode de mesurage et d'évaluation – Partie 1 : mesurage et évaluation des réponses des structures aux vibrations générées par les activités humaines. » ;
- NF E90-020-3 de Décembre 2018, « Vibrations et chocs mécaniques – Méthodes de mesurage et d'évaluation – Partie 3 : Mesurage et évaluation de l'exposition aux vibrations des individus habitant ou séjournant d'une manière temporaire à l'intérieur d'une construction » ;
- ISO 14837-1 de 2006 « Vibrations et bruits initiés au sol dus à des lignes ferroviaires – Partie 1 : directives générales. » ;
- ISO 14837-31 de 2017 relative aux vibrations et bruits initiés au sol dus à des lignes ferroviaires qui définit les conditions de mesurage in-situ ;
- ISO/TS 14837-32 de 2015, « Vibrations et bruits initiés au sol dus à des lignes ferroviaires — Partie 32 : Mesurage des propriétés dynamiques du sol » ;
- ISO 5348 :2021 de Janvier 2021, « Fixation mécanique des accéléromètres » ;
- ISO 4866 de 2010 « Mechanical vibration and shock – Vibration of fixed structures – Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their structures. » ;
- ISO 2631-1 de 1997 « Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements. » ;
- ISO 2631-2 de 2003 « Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Continuous and shock induced vibration in buildings (1 to 80 Hz). » ;
- ISO 2041 de 2018, « Vibrations et chocs mécaniques, et leur surveillance – Vocabulaire » ;
- Directives de l'OMS 1999 relatives au bruit dans l'environnement et dans les logements ;
- Guide américain FTA-VA-90-1003 – mai 2006 Transit Noise & Vibration Impact Assessment relatif aux critères de perception et exposition des individus riverains d'infrastructures ferroviaires et les risques de perturbations aux équipements sensibles ;
- Projet européen RIVAS (Railway Induced Vibration Abatement Solutions) dont l'objectif est de réduire l'impact environnemental des vibrations induites par les lignes de chemins de fer en proposant un ensemble de mesures d'atténuation des vibrations. En particulier, le livrable « Del. 1.6- Definition of appropriate procedures to predict exposure in buildings and estimate annoyance » dans lequel un modèle statistique de propagation des vibrations dans les structures des bâtiments depuis la source jusqu'aux planchers est détaillé.

2.4.Échelle de niveaux vibratoires

La figure suivante propose une échelle des niveaux vibratoires et leur impact potentiel sur les structures et sur les activités humaines.

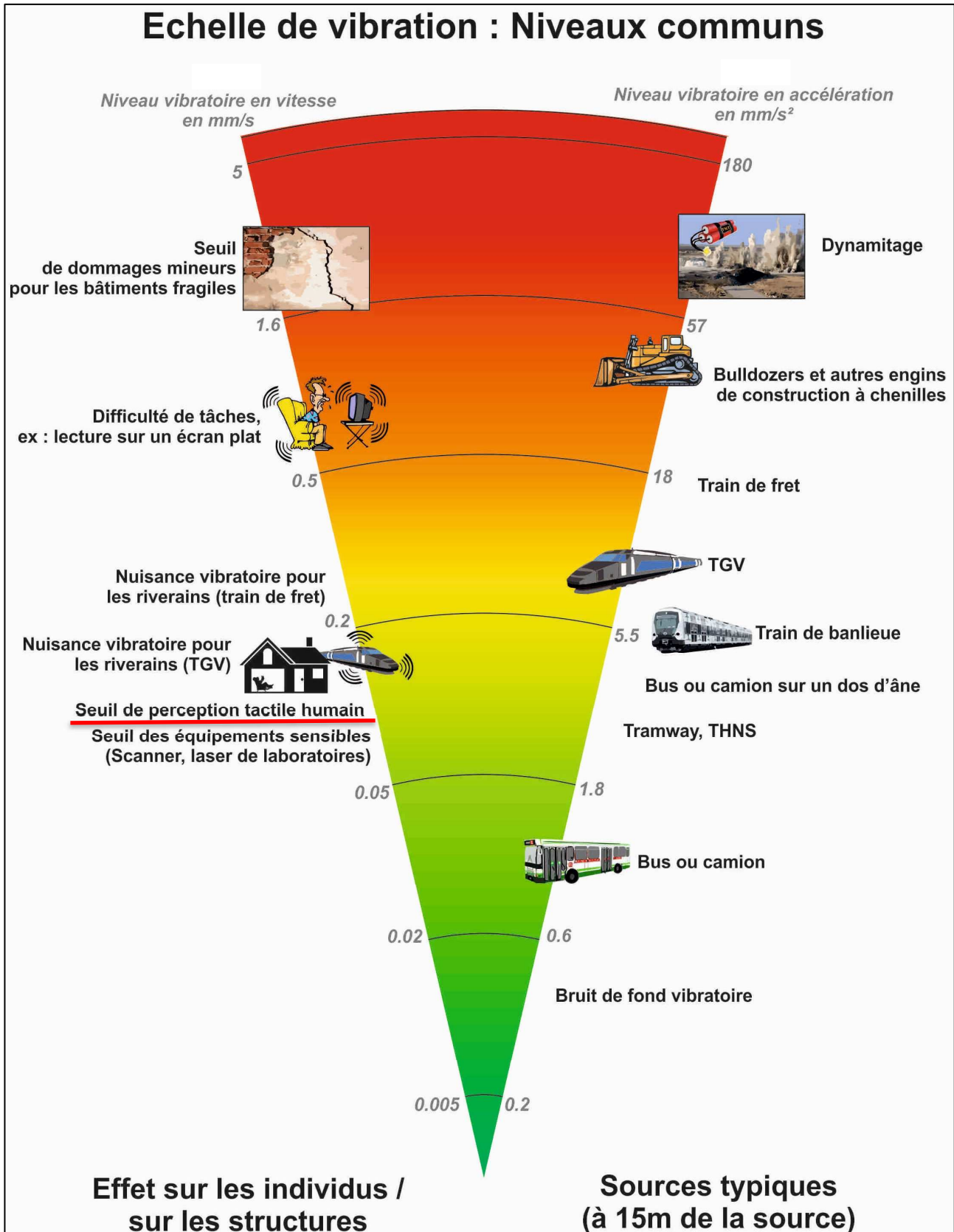


Figure 3 : Échelle de niveaux vibratoires (© Egis/ACOUSTB)

2.5. Seuil vibratoire de dommages aux structures

Ce paragraphe rappelle les valeurs des niveaux vibratoires admissibles issues de la réglementation applicable aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE). La Circulaire du 23 Juillet 1986 définit les seuils vibratoires (en valeurs crêtes de la vitesse vibratoire) garantissant la tenue mécanique d'un bâtiment en fonction de la fréquence d'excitation et du type de construction.

Les valeurs des niveaux vibratoires admissibles pour garantir l'absence de dommage aux structures sont indiquées ci-dessous pour les différents types de construction (vibrations continues ou assimilées).

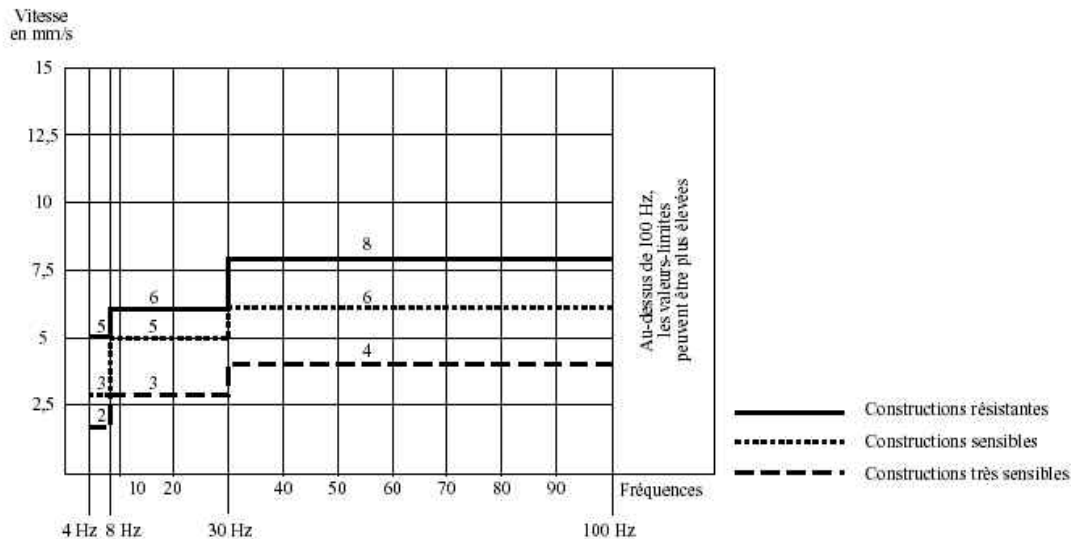


Figure 4 : Graphique présentant les valeurs seuils à ne pas dépasser pour le cas des risques de dommage aux structures

2.6. Seuils vibratoires de perception tactile

Concernant le risque d'apparition d'une gêne liée à la perception tactile des vibrations, il n'existe pas en France de texte réglementaire fixant des seuils de gêne. Il est proposé de prendre comme valeur limite applicable les seuils définis dans la norme ISO 10137 de 2007 relative aux vibrations dans les bâtiments, qui reprend les seuils définis dans la norme ISO 2631-2 de 1989 (valeurs RMS de vitesse vibratoire moyennées sur le passage d'une circulation) :

	Périodes	Niveau vibratoire	
		En mm/s	En dBv réf $5 \cdot 10^{-8}$ m/s
Équipements sensibles	Jour	0.10	66
	Nuit	0.10	66
Bâtiments résidentiels	Jour	0.20	72
	Nuit	0.14	69
Bureaux calmes	Jour	0.20	72
	Nuit	0.20	72
Bureaux standards	Jour	0.40	78
	Nuit	0.40	78
Ateliers	Jour	0.80	84
	Nuit	0.80	84

Tableau 1 : Valeurs de niveaux vibratoires admissibles d'après la norme ISO 2631-2 de 1989

Dans le cadre de cette étude, la valeur limite de vitesse vibratoire admissible sur le plancher à l'intérieur des bâtiments riverains est fixée à 69 dBv par tiers d'octave de 10 Hz à 160 Hz (réf. $5 \cdot 10^{-8}$ m/s). Cette valeur concerne uniquement le risque de gêne liée à la perception tactile des vibrations.

2.7. Perception auditive des vibrations (bruit solidien)

Pour évaluer le risque de plaintes et la possibilité de percevoir le bruit au passage du train, il est proposé de comparer les résultats aux trois courbes suivantes représentant :

- le seuil de l'audition selon la norme ISO 389-7 (seuil de perception pour des sons purs), lorsque les valeurs de bruit au passage du train sont inférieures au seuil de l'audition le bruit au passage n'est pas perçu par les personnes exposées et ne présente pas de risque de gêne. En niveau global, le seuil de l'audition correspond à 30 dB(A) ;
- un seuil de plaintes fixé d'après une recommandation¹ du Ministère du Japon basée sur des mesures chez des plaignants et correspondant à environ 32 dB(A). Une étude² de l'Institut Norvégien de la Santé Publique, montre qu'environ 15 % des personnes exposées se déclarent gênées par un niveau de 32 dB(A) de bruit ferroviaire. Lorsque ce seuil de plaintes est dépassé, plus de 15 % des personnes exposées à ce niveau de bruit se déclarent gênées ;
- un seuil de gêne dans les bureaux, fixé à partir du seuil de l'audition majoré de +7 dB.

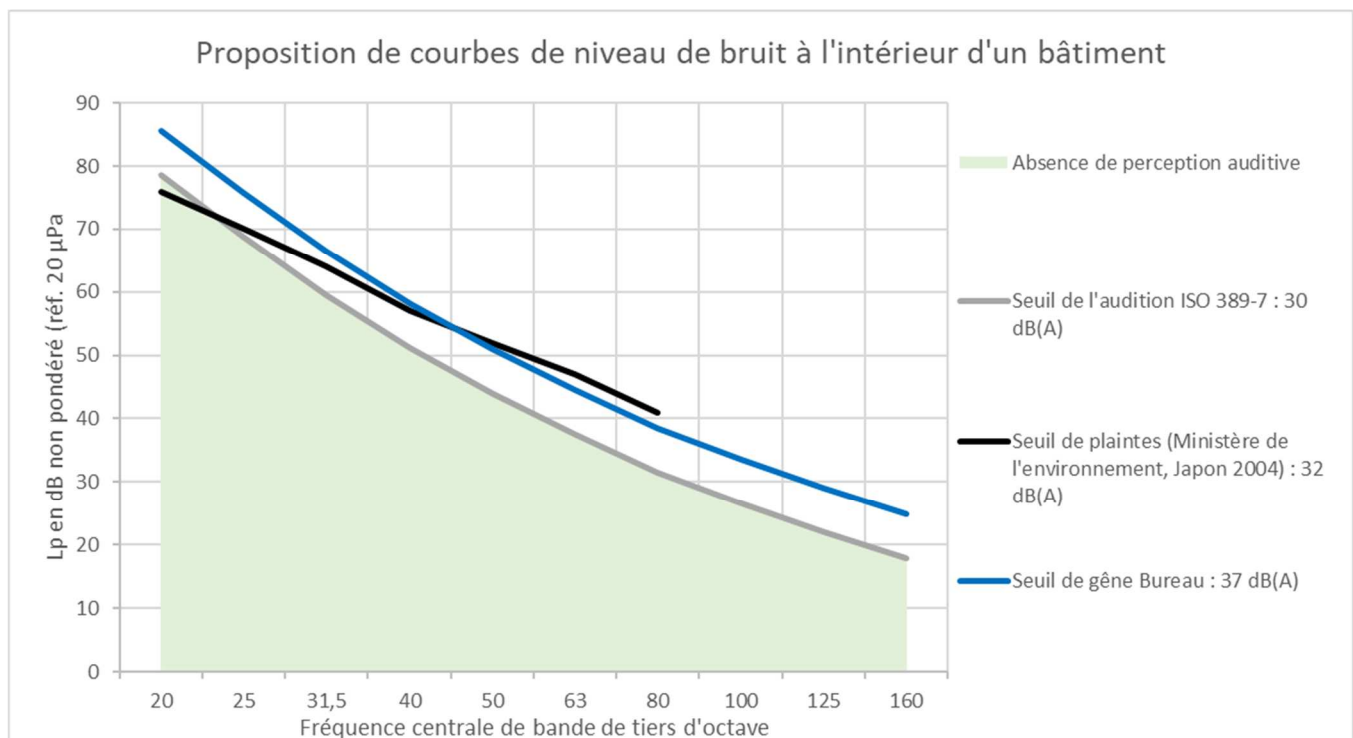


Figure 5 : Proposition de courbes de niveau de bruit à l'intérieur des bâtiments

Compte tenu du type d'occupation des locaux (logement de fonction et pavillon), nous recommandons de retenir le seuil de 30 dB(A) au passage comme valeur seuil.

C'est un seuil conservatoire.

¹ cf. "Handbook to Deal with Low Frequency Noise (2004)", Ministère du Japon.

² "Annoyance and self-reported sleep disturbances due to structurally radiated noise from railway tunnels" - Gunn Marit Aasvang, Bo Engdahl, Karin Rothschild - Applied Acoustics 68 (2007) 970-981).

3. Méthodologie de l'étude

3.1. Principe général

La modélisation de la propagation des vibrations présentée comporte une forte incertitude en raison de la nature hétérogène du sous-sol, de l'émission vibratoire conditionnée par l'état de rugosité des roues et des rails, et des phénomènes de transmission des vibrations dans les structures en béton complexes. Pour cette raison les résultats de modélisation sont destinés à être employés de façon qualitative pour guider les choix de conception de la voie ferrée, et non à considérer comme des valeurs absolues.

Dans ce contexte, afin de se rapprocher le plus possible de la réalité, une série de mesure permettant de caractériser le matériel roulant, les fonctions de transfert du sol et des bâtiments ont été réalisées.

Ces mesures servent à alimenter le modèle, à le valider et à le compléter.

Le modèle numérique MEFISSTO³ est utilisé pour étendre les évaluations de niveaux vibratoires quand les mesures de fonction de transfert dans le sol n'ont pas pu être effectuées ou bien que le rapport signal sur bruit fût trop faible pour rendre la mesure exploitable.

La méthodologie suivie pour évaluer l'impact vibratoire et sonore de l'infrastructure est la suivante :

- Définitions des valeurs cibles de niveau de vitesse vibratoire et de pression acoustiques admissibles dans les bâtiments :
 - Valeur cible concernant le niveau vibratoire (cf. paragraphe 2.6) ;
 - Valeur cible concernant le bruit solide (cf. paragraphe 2.7) ;
- Evaluation par la mesure du terme source d'émission vibratoire au passage du train ;
- Evaluation des fonctions de transferts du tunnel vers les fondations du bâtiment via la campagne de mesures ;
- Evaluation des fonctions de transferts des fondations vers le plancher du bâtiment via la campagne de mesures ;
- Evaluation de la « conductivité » du sol via la mesure de caractérisation MASW ;
- Modélisation numérique des couches de sol, du tunnel fini et des fondations du bâtiment sur MEFISSTO ;
- Evaluation des niveaux sonores et vibratoires à l'intérieur du bâtiment en combinant le niveau de vibration calculé sur les fondations du bâtiment avec MEFISSTO et la fonction de transfert fondation – plancher mesurée sur site.

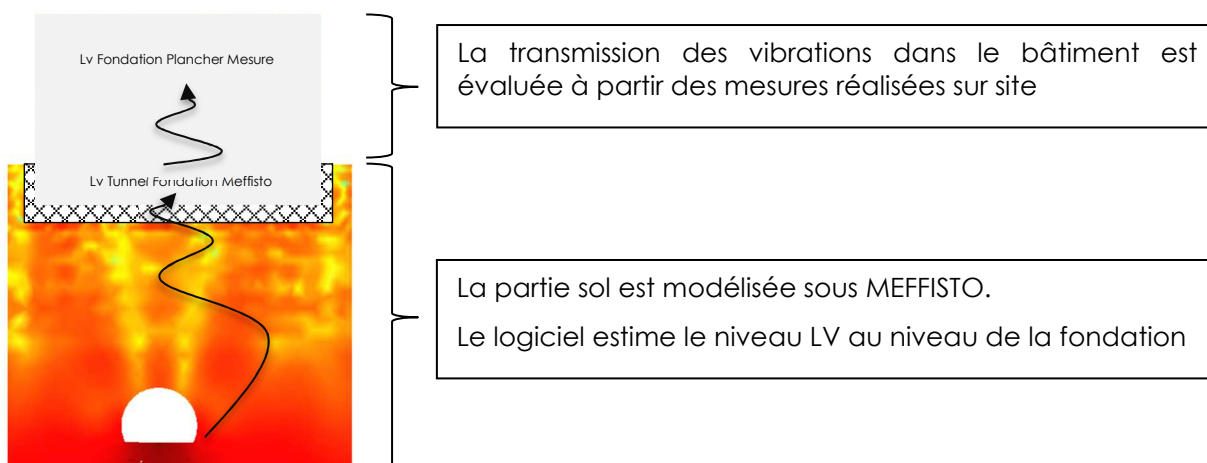


Figure 6 : Illustration du principe méthodologique : le logiciel est utilisé pour calculer la propagation des vibrations dans le sol et les fondations, la mesure pour estimer la propagation des vibrations dans la structure

³ Le logiciel de calcul MEFISSTO est un logiciel de calcul numérique qui permet d'estimer la propagation des vibrations dans les sols et la structure des bâtiments. Il est basé sur les techniques des éléments finis (FEM) pour modéliser les domaines bornés (fondations de bâtiments, structures, ...) et d'éléments finis de frontière (BEM) pour la propagation dans le sol. Il permet de prévoir les vibrations en surfaces dues au passage du trains sur les rails.



3.2. Estimation du niveau vibratoire et rayonné

Le calcul du niveau vibratoire et rayonné dans les étages de l'immeuble sont réalisés sur la base de la méthodologie proposée par le projet Européen RIVAS⁴.

3.2.1. Calculs des fonctions de transferts $FT_{\text{Tunnel} - R+N}$

La propagation vibratoire depuis le tunnel vers les planchers des habitations peut être décomposée en 2 étapes :

- La propagation tunnel vers fondation, représentée par la différence de niveaux $FT_{\text{Tunnel} - \text{Fondations}}$;
- La propagation fondations vers le plancher R+N, notée $FT_{\text{Fondations-plancher R+N}}$.

Dans le cadre de cette étude, les FT sont obtenues de deux façons.

- Soit, elles sont mesurées, c'est le cas notamment de la $FT_{\text{Tunnel} - \text{Fondations}}$ et de $FT_{\text{Fondations} - \text{plancher R+N}}$ pour l'école ;
- Soit, elles sont calculées à l'aide du logiciel MEFISSTO, c'est le cas du lycée et des maisons au sud :
-

$$FT_{\text{Fondations-plancher R+N+1}} = FT_{\text{Fondations-plancher R+N}} + \Delta FT_{R+N+1/R+N}$$

Enfin pour obtenir la fonction de transfert entre le tunnel et l'étage, il suffit d'additionner ces deux fonctions de transferts, logiquement la $FT_{\text{Tunnel} - R+N}$ s'obtient comme suit :

$$FT_{\text{Tunnel-R+N}} = FT_{\text{Tunnel-Fondations}} + FT_{\text{Fondations-plancher R+N}}$$

3.2.2. Calculs des niveaux vibratoires au plancher

Le niveau vibratoire $L_{V,\text{plancher}}$ est calculé en ajoutant à la $FT_{\text{Tunnel-R+N}}$ le spectre de l'excitation vibratoire mesuré :

$$L_{V,\text{plancher R+N}} = FT_{\text{Tunnel-R+N}} + L_{V,\text{source}}$$

3.2.3. Calculs des niveaux de bruit rayonné par le plancher

Le niveau de bruits rayonné par le plancher est estimé à l'aide de l'équation décrite dans le projet RIVAS :

$$L_{p,\text{plancher R+N}} = L_{V,\text{plancher R+N}} + 7$$

⁴ RIVAS (Railway Induced Vibration Abatement Solutions) Un ensemble de résultats de mesures in-situ compilé afin de définir des lois statistiques permettant de décrire la transmission des vibrations dans les bâtiments : <http://www.rivas-project.eu>

4. Mesures de vibrations

4.1. Protocole de mesure

Les mesures ont été réalisées du 13 février au 15 février 2023, avec des accéléromètres mono et tri-axes.

4.2. Matériel de mesure utilisé

4.2.1. Capteur Sequoia

Quatre accéléromètres tri-axe SEQUOIA GEA, positionnés avec l'axe Y perpendiculaire aux voies de circulation. La sensibilité des capteurs est de 1V/g et l'échantillonnage est paramétré à 1024 Hz. La gamme de fréquence de mesure des capteurs est [5.7 Hz ; 440 Hz], ce qui correspond aux bandes de tiers d'octave centrées sur 6.3 Hz et 400 Hz.



Carte d'acquisition Sequoia



Capteur SEQUOIA GEA

Figure 7 : Photos du matériel de mesure

4.2.2. Accéléromètres ICP et Wilcoxon

Le matériel de mesure employé pour les mesures de MASW comporte 6 accéléromètres et un marteau d'impact. La dynamique et le bruit de fond des capteurs sont compatibles avec les signaux à mesurer. Les modèles des composants de la chaîne de mesure sont donnés dans le tableau suivant.




Chaîne de mesure d'accélération		
Boitier Pulse B&K, 8 voies échantillonnage 51.2 kHz		
Marteau d'impact 5kg : PCB 086D50 0.23mV/N 	Accéléromètre ICP 10V/g 	Accéléromètre wilcoxon : 799M 1V/g 

Tableau 2 : Appareillage de mesure MASW

4.2.3. Source vibratoire artificielle

Une source excitatrice vibratoire de type pilonneuse a été utilisée afin de mesurer la réponse vibratoire de la structure du bâtiment.



Figure 8 : Pilonneuse

Le matériel émet un niveau vibratoire d'environ 107 dBv à 2 m, et de 94 dBv à 15 m (axe vertical Z, dBv réf. $5 \cdot 10^{-8}$ m/s).

La seconde source utilisée est le Butt kicker qui est une source maison et qui nous permet d'envoyer dans le sol un signal contrôlé de manière à pouvoir calculer les fonctions de transfert même avec un faible rapport signal sur bruit.

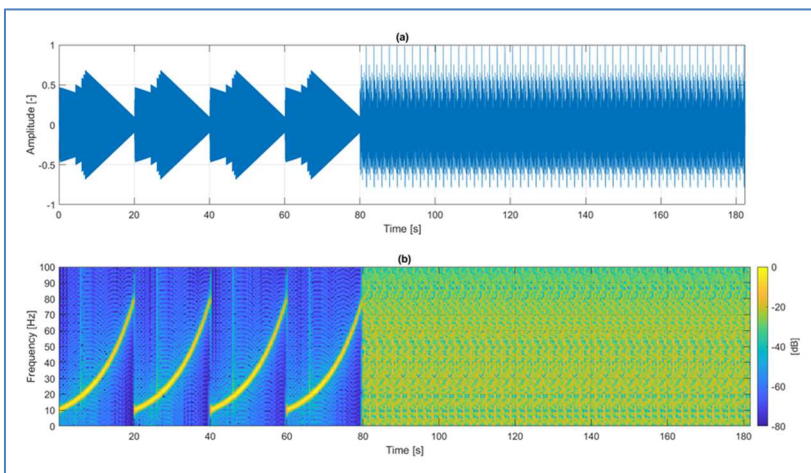
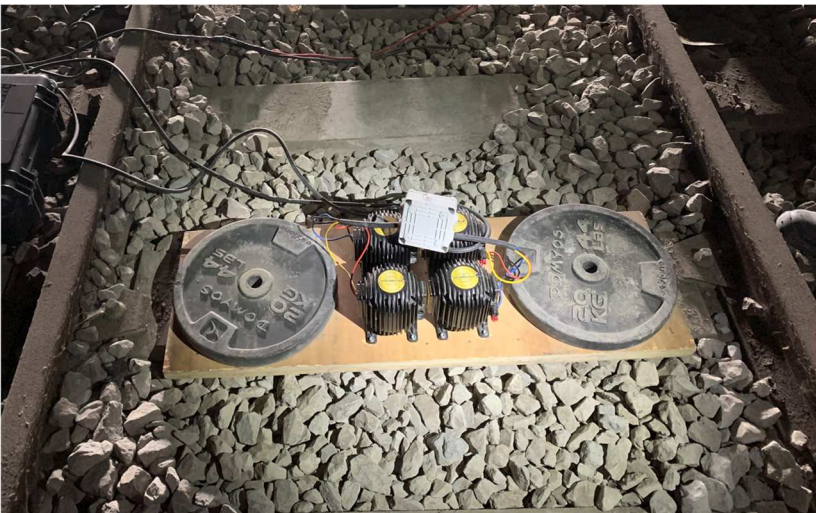


Figure 9 Butt kicker et exemple de signaux contrôlés envoyés dans le sol

4.3. Présentation des mesures et hypothèses retenues

Trois types de mesure ont été réalisées :

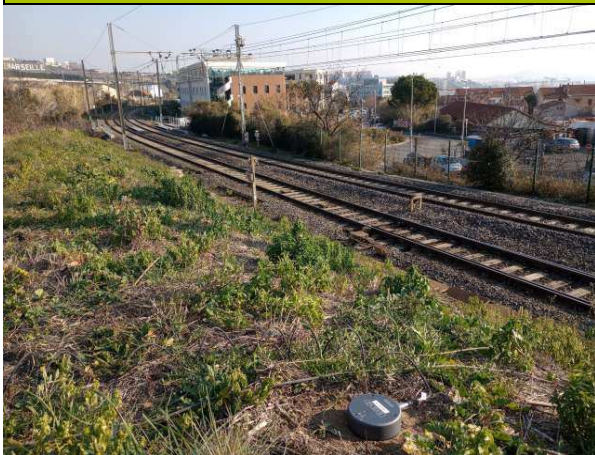
- Mesure de caractérisation du spectre vibratoire au passage d'un train FRET,
- Mesures de caractérisation de la vitesse de propagation des vibrations dans le sol (MASW)
- Mesures de caractérisation des facteurs de perte dans le sol (fonction de transfert) et Fondation-Plancher.

4.3.1. Caractérisation de la source vibratoire

Les mesures pour caractériser la source vibratoire ont été effectuées sur la ligne 939001 (L'Estaque-Marseille), sur un segment légèrement incurvé, similaire à la situation du tunnel du Soulat. Les emplacements des points de mesure sont indiqués sur le schéma ci-dessous.



Mesure au passage



Prise de vue d'un capteur



Prise de vue du passage d'un fret

Quatre accéléromètres GEA ont été installés, un à 7,5m de la voie pour le PV1 et trois autres PV2, PV3 et PV5 ont été installé 4m, 8m et 13m.

Deux passages de trains ont été mesurés et présentent deux pics à 25 et 50 Hertz. La vitesse de circulation des trains lors de la mesure était d'environ 40 km/h.

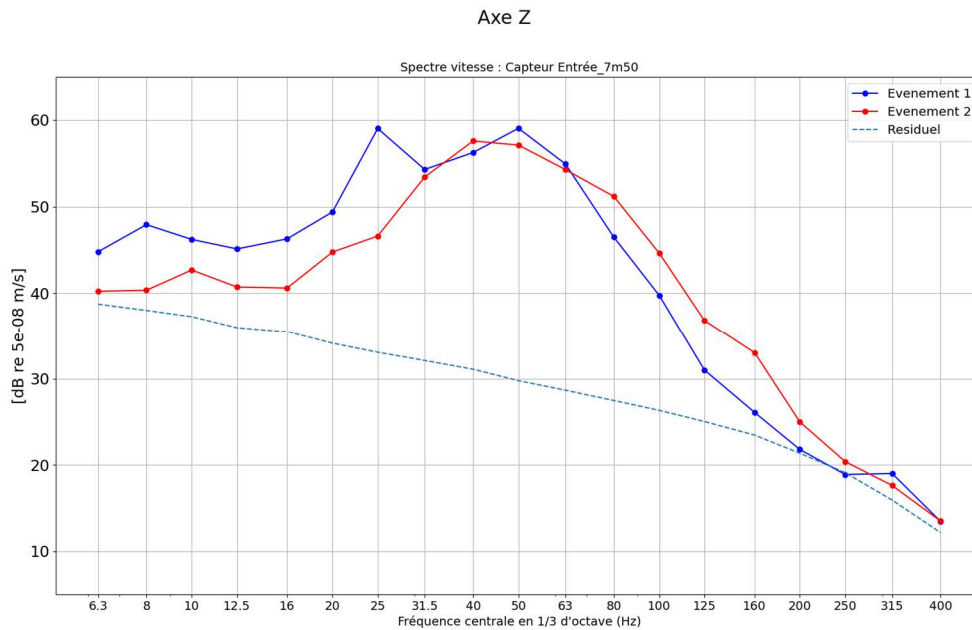


Figure 10 Spectres de caractérisation de la source (mesure sur site à 8m)

Le niveau de vibrations généré au passage des trains augmente avec la vitesse de passage des trains. Ne connaissant pas exactement la vitesse de circulation future des trains nous retenons une vitesse de circulation maximale de 50 km/h, ce qui est une hypothèse conservatoire.

L'enveloppe des deux trains est retenus pour la suite de l'étude. La vitesse maximale des trains circulant dans le tunnel du Soulat est fixée à 50 km/h. Un facteur correctif est appliqué pour prendre en compte l'augmentation de la vitesse, en utilisant la formule $30 \cdot \log(50/40) = +3$ dB.

De plus, le niveau de vibrations généré au passage des trains augmente avec la charge des trains. Ne connaissant pas exactement la charge des trains mesurés, nous considérons que la charge des trains mesurés est de l'ordre de 50% de la capacité de charge. Nous considérons que la charge future des trains sera au plus doublée par rapport à la situation mesurée. Nous retenons donc une hypothèse de doublement de la charge à l'essieu du futur train par rapport à la mesure pour évaluer l'impact du projet de façon conservatoire. L'augmentation associée à ce doublement de charge est de $20 \cdot \log(2) = +6$ dB.

Le spectre finalement choisi est représenté par la courbe orange dans le graphique suivant :

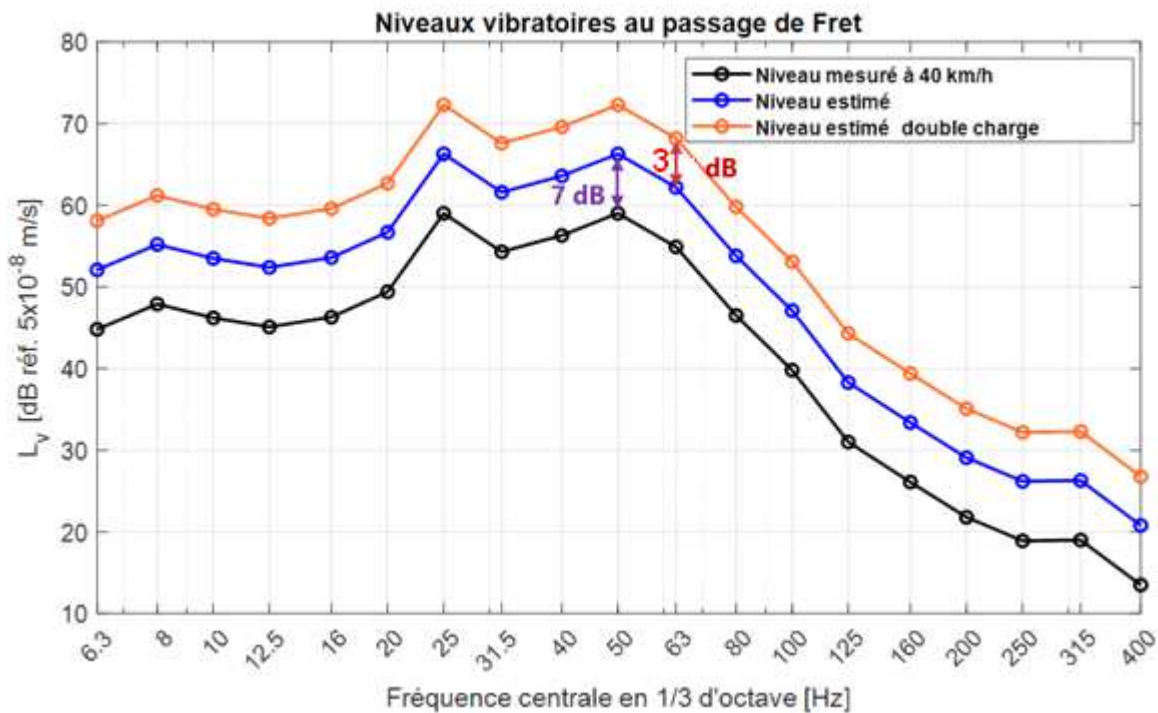


Figure 11 Spectres de caractérisation de la source retenus après correctif lié à la correction de la vitesse et de la masse des trains

4.3.2. Localisation des mesures

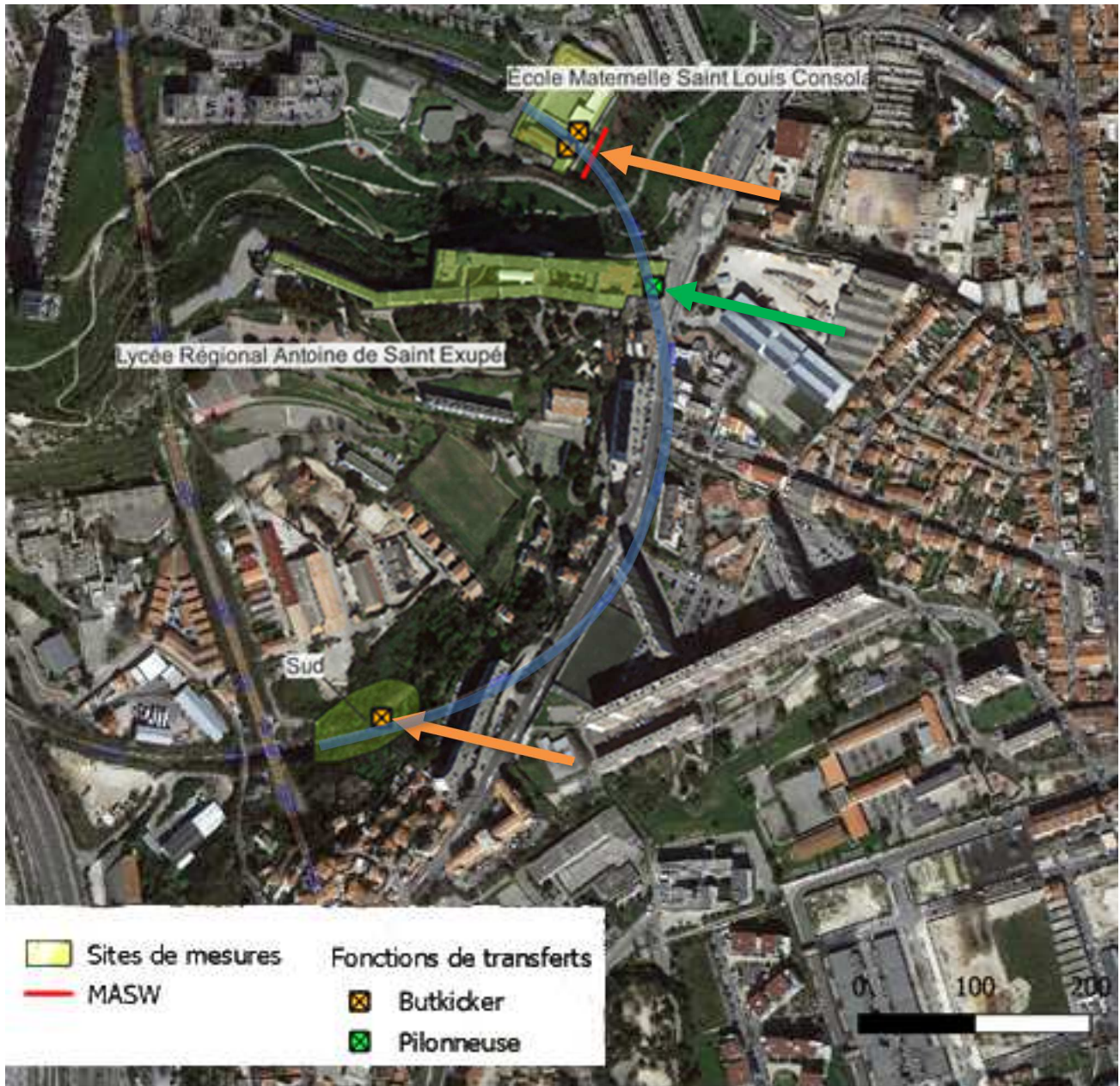


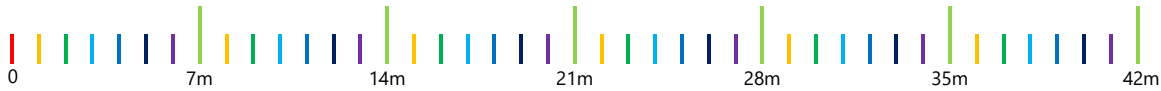
Figure 12 Plan d'implantation des mesures

4.3.3.MASW

La méthode MASW (Multichannel Analysis Surface Waves) de traitement du signal est employée afin de caractériser la célérité des ondes dans le sol. Les mesures de caractérisation de sol ont été réalisées conformément à la norme de mesurage NF ISO 14837-32.

Les mesures ont été réalisées sur le site de l'école maternelle.

La mesure a été réalisée sur une distance de 42m avec 6 accéléromètres (2 Wicoxon 1V/G et 4 PCB 10V/G) placé sur des embases métalliques encre dans le sol et une masse d'impact instrumentée relié par une station d'acquisition.



Les accéléromètres ont été placés aux distances suivantes 7m, 14m, 21m, 28m, 35m et 42m, puis des impacts ont été réalisés avec la masse sur une planche en bois tous les mètres en 0 et 6m.



Figure 13 Localisation de la mesure MASW

Les mesures sont réalisées derrière l'école le long de la ligne représentée en rouge.

Mesures MASW

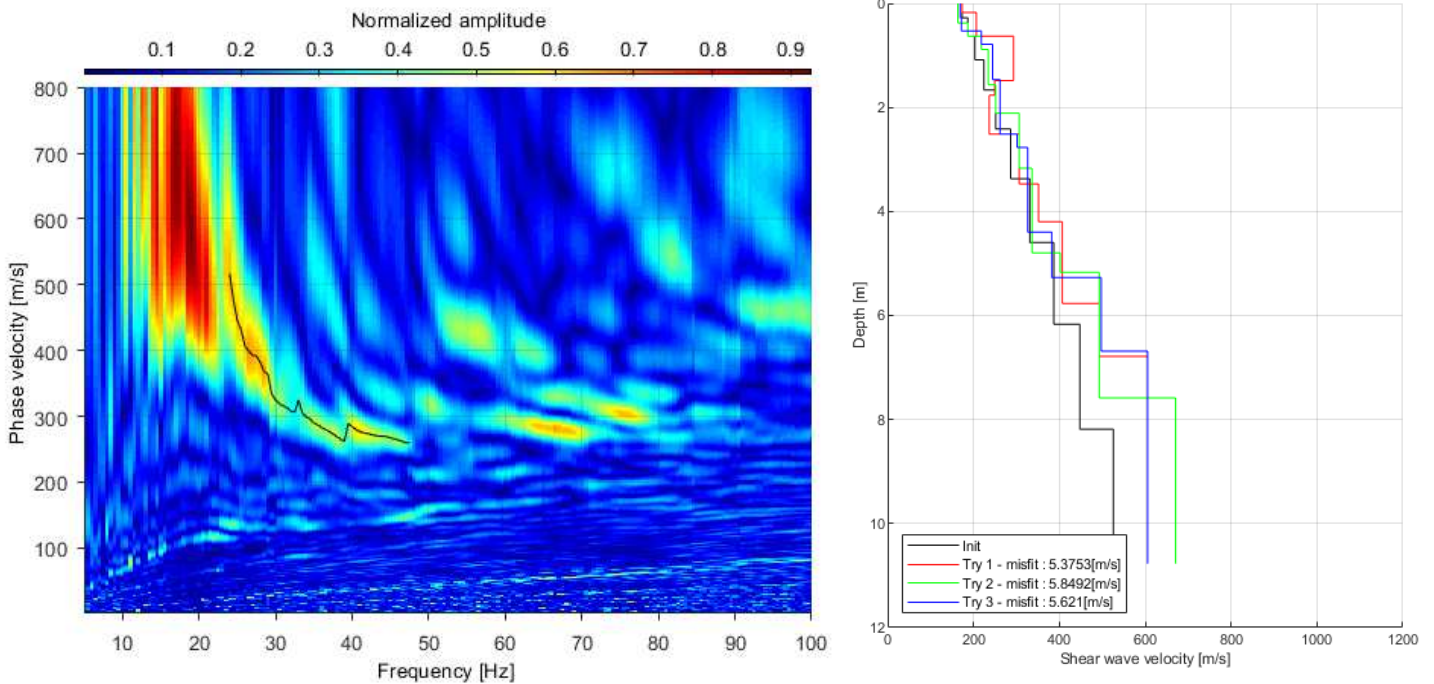


Prise de vue d'un capteur



Prise de vue Masse d'impact

Le résultat de la mesure de caractérisation de sol est présenté dans la figure suivante.



Cette mesure a permis d'identifier trois couches de sol différentes :

- la première entre 0 et 5m avec une vitesse de cisaillement de 350m/s,
- la seconde entre 5 et 7m avec 450m/s
- la troisième au-delà de 7m avec une vitesse des ondes de cisaillement de 600m/s.

4.3.4.Fonction de transfert

Les mesures de fonction de transfert ont été réalisées sur deux sites, un avec une pilonneuse pour le lycée et un avec le buttkicker sur l'école maternelle dans le but de caractériser la fonction de transfert entre le sol et un bâtiment.

Les textes de référence relatifs aux mesures sont les suivants.

- NF E 90-020-1, (2015-09-26), intitulée « 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 ».
- NF E90-020-2, (2015-09-26), intitulée « Vibrations et chocs mécaniques - Méthode de mesurage et d'évaluation - Partie 2 : vibrations induites dans les équipements sensibles qui se trouvent sur ou à l'intérieur des structures ».

4.3.4.1. Fonction de transfert tunnel – fondations - école maternelle

Des mesures de caractérisation des fonctions de transfert entre le tunnel et les fondations de l'école maternelle sont réalisées. L'école est située à environ 7 mètres de la route du tunnel.

La source contrôlée « Buttkicker » est mise en place au fond du tunnel avec des capteurs placés sur la route du tunnel et des capteurs sont placés en surface sur les fondations de l'école et sur les planchers de l'école.

PV1	
	
Capteur en pied de bati	Capteur salle de classe
	
Capteur en Rdc pied d'escaliers	Capteur salle polyvalente
	
Capteur dans le tunnel	Source Buttkicker

Les signaux d'émission sont en colonne gauche et les signaux réception sont en colonne droite.

L'énergie émise est nette et forte dans la gamme 20 Hz à 125 Hz sur la paroi du tunnel, elle passe à travers la voûte et le sol et est à nouveau mesurée sur les capteurs positionnés au droit de l'école. Le rapport des deux donne la fonction de transfert tunnel – fondation.

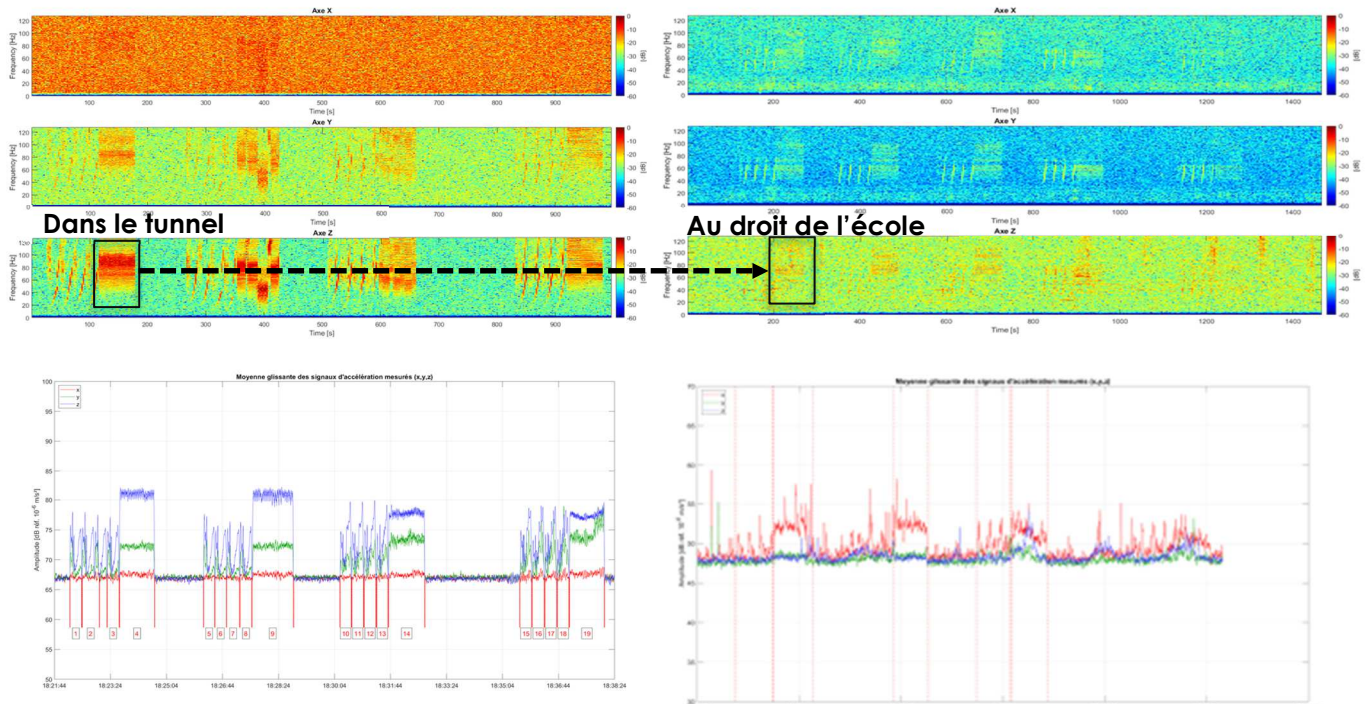


Figure 14 : Signaux envoyés dans le tunnel et récupérés en surface

Les niveaux vibratoires mesurés dans l'école sont donnés ci-dessous.

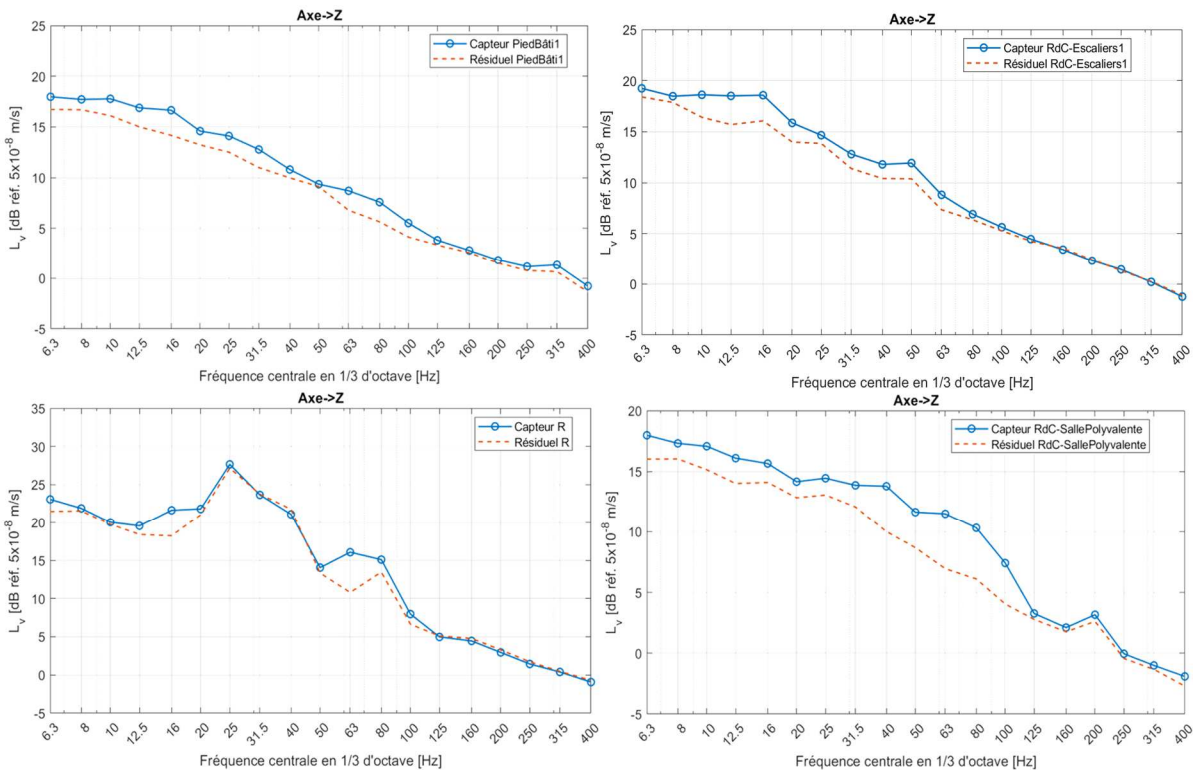


Figure 15 : Niveaux vibratoires mesurés dans l'école

Les fonctions de transfert résultantes sont données dans le graphique ci-dessous.

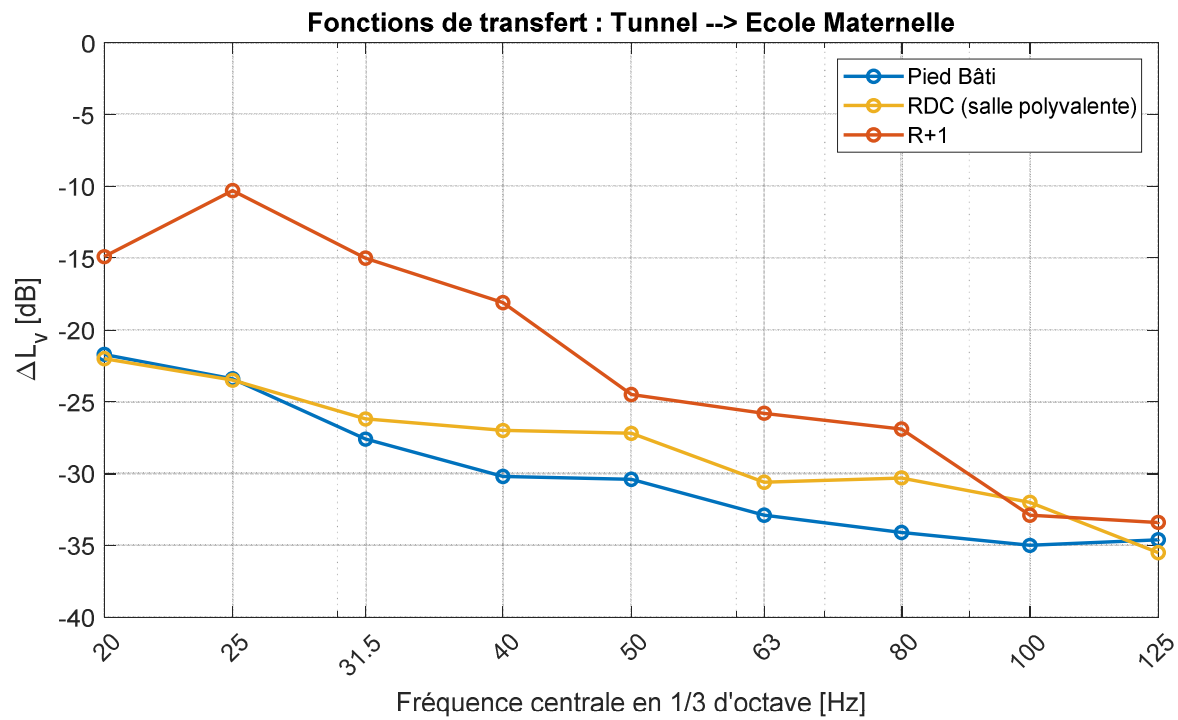


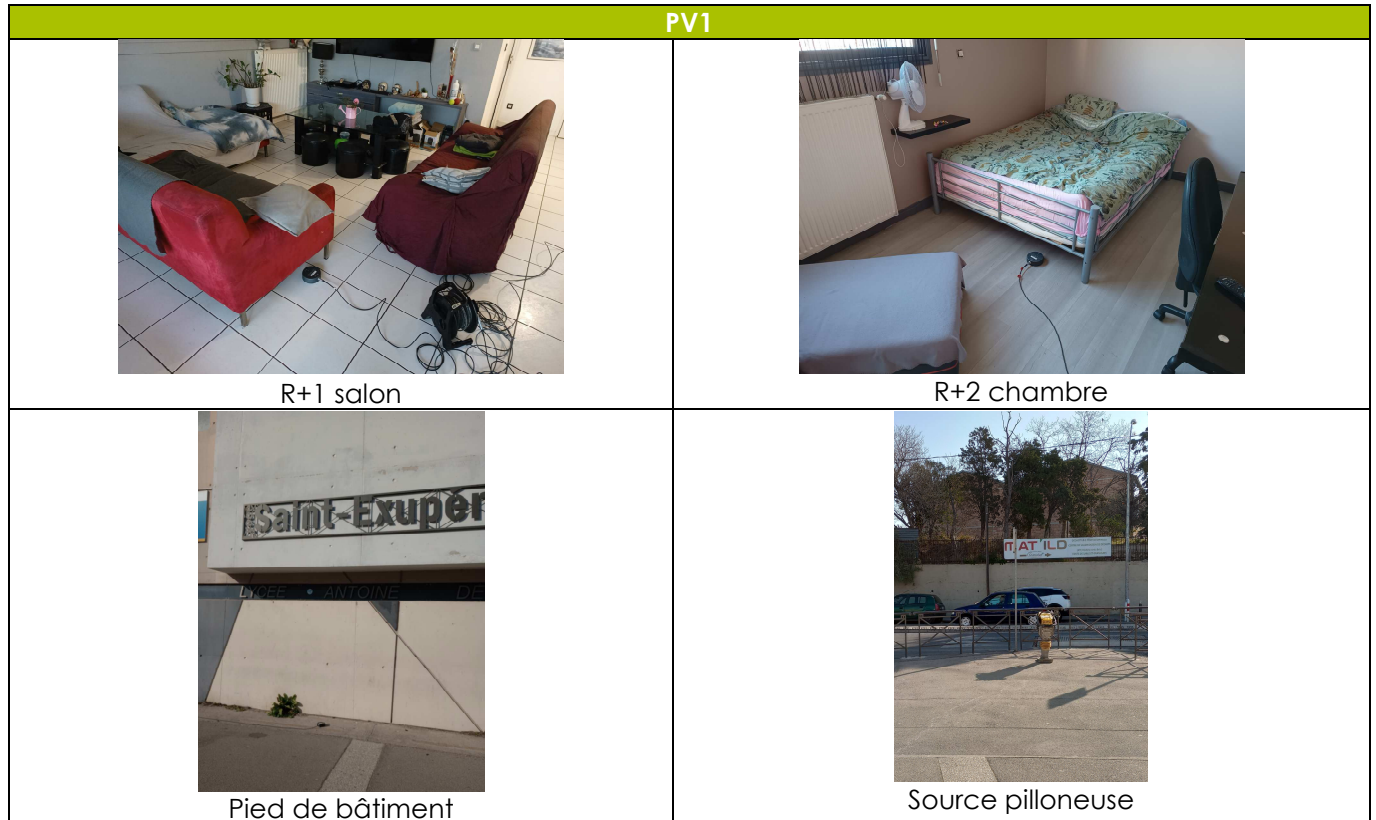
Figure 16 : Fonction de transfert Tunnel Ecole Maternelle

4.3.4.2. Fonction de transfert Sol – plancher Lycée

Le lycée se trouve à une distance supérieure à 45 mètres au-dessus du tunnel. Étant donné l'épaisseur considérable de la terre entre les deux, il est difficile d'envoyer assez d'énergie pour obtenir un signal vibratoire suffisant (avec un rapport signal sur bruit élevé) permettant de calculer une fonction de transfert de bonne qualité, à moins d'utiliser un camion sismique.

Pour évaluer la fonction de transfert entre le tunnel et les fondations du bâtiment, une modélisation MEFISSTO sera employée.

Pour évaluer la fonction de transfert du bâtiment, une pilonneuse, servant de source excitatrice, est positionnée à l'extérieur du bâtiment. Des capteurs sont installés dans le salon, la chambre et en pied du bâtiment pour mesurer les vibrations.



Les niveaux vibratoires mesurés dans l'école sont donnés ci-dessous

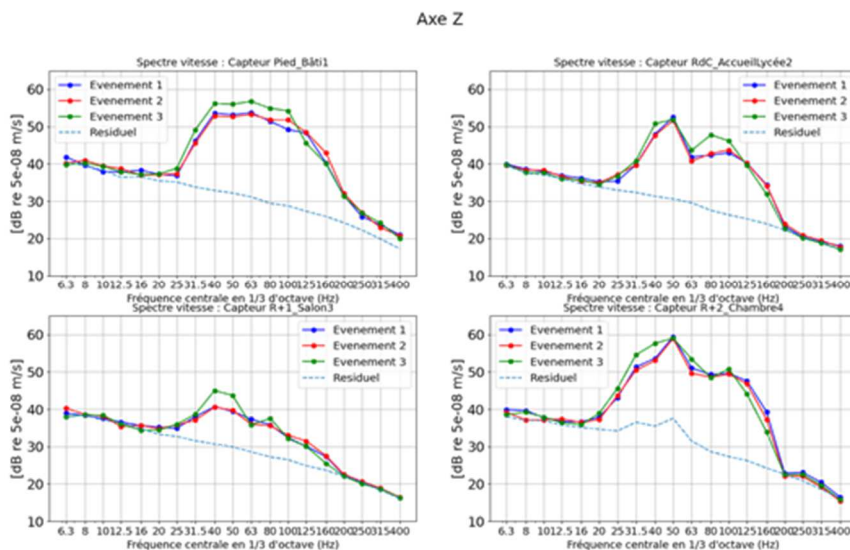
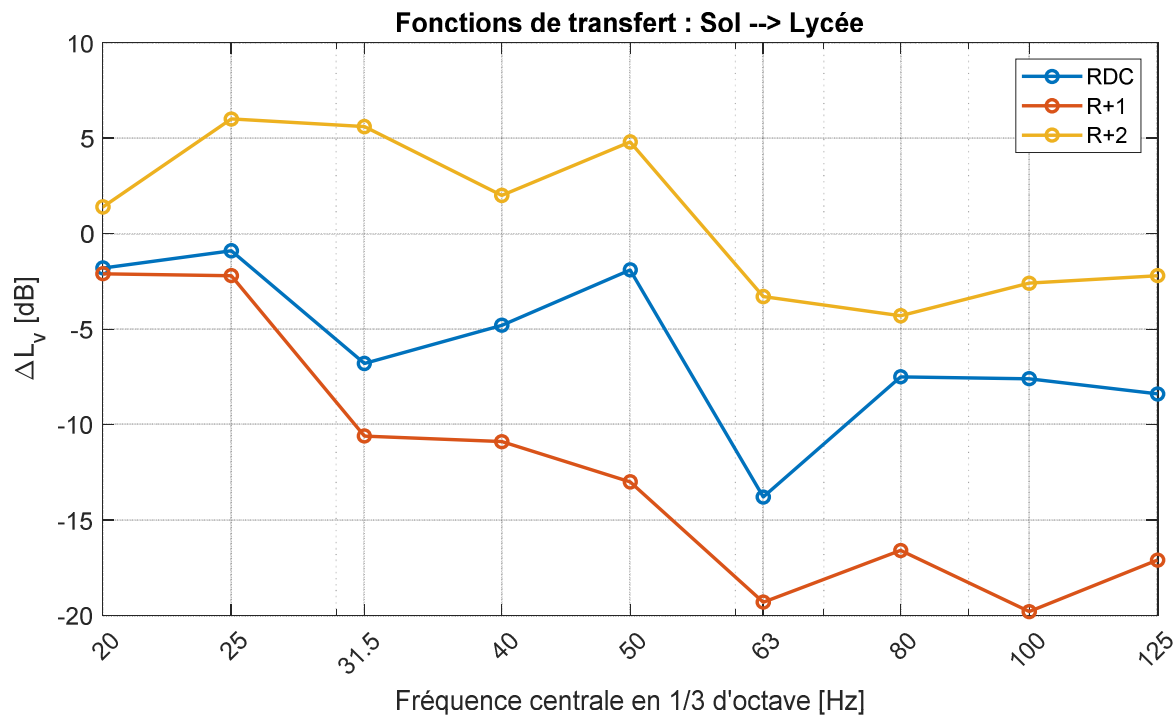


Figure 17 : Niveaux vibratoires pilonneuse mesurés dans le lycée



4.3.4.3. Fonction de transfert entrée Sud du tunnel

Des mesures de caractérisation de fonction de transfert à l'entrée sud du tunnel ont été effectuées. Le rapport signal sur bruit a été trop faible pour permettre de calculer la fonction de transfert tunnel – sol. La mesure effectuée visait à exciter le tunnel et le sol au moyen d'une source artificielle portable. La puissance de cette source portable n'est pas suffisante du côté Sud pour exciter le tunnel et le sol au vu de l'épaisseur de la couche de sol au-dessus du tunnel, ce qui ne permet pas de réaliser la mesure dans des conditions satisfaisantes. Une approche par modélisation numérique est donc présentée.



Figure 18 : Mesures de fonctions de transfert tunnel Sud-Surface

Les impacts sur le secteur Sud du tunnel seront évalués avec le logiciel MEFISSTO.

Le logiciel MEFISSTO est une programmation d'une méthode numérique adaptée aux sols et aux structures est basé sur une approche hybride BEM/FEM qui permet la modélisation de scènes complexes. La méthode éléments finis (FEM) est utilisée pour les bâtiments et l'approche intégrale (BEM) est utilisée pour les domaines non bornés comme les sols.

MEFISSTO permet le calcul des transmissions vibratoires depuis la source jusqu'aux bâtiments et de prédire le bruit solidien dans les logements, comme illustré dans la figure ci-dessous. Le logiciel MEFISSTO est validé sur un grand nombre de cas d'étude en France et à l'étranger, et il est cité dans un grand nombre de publications scientifiques.

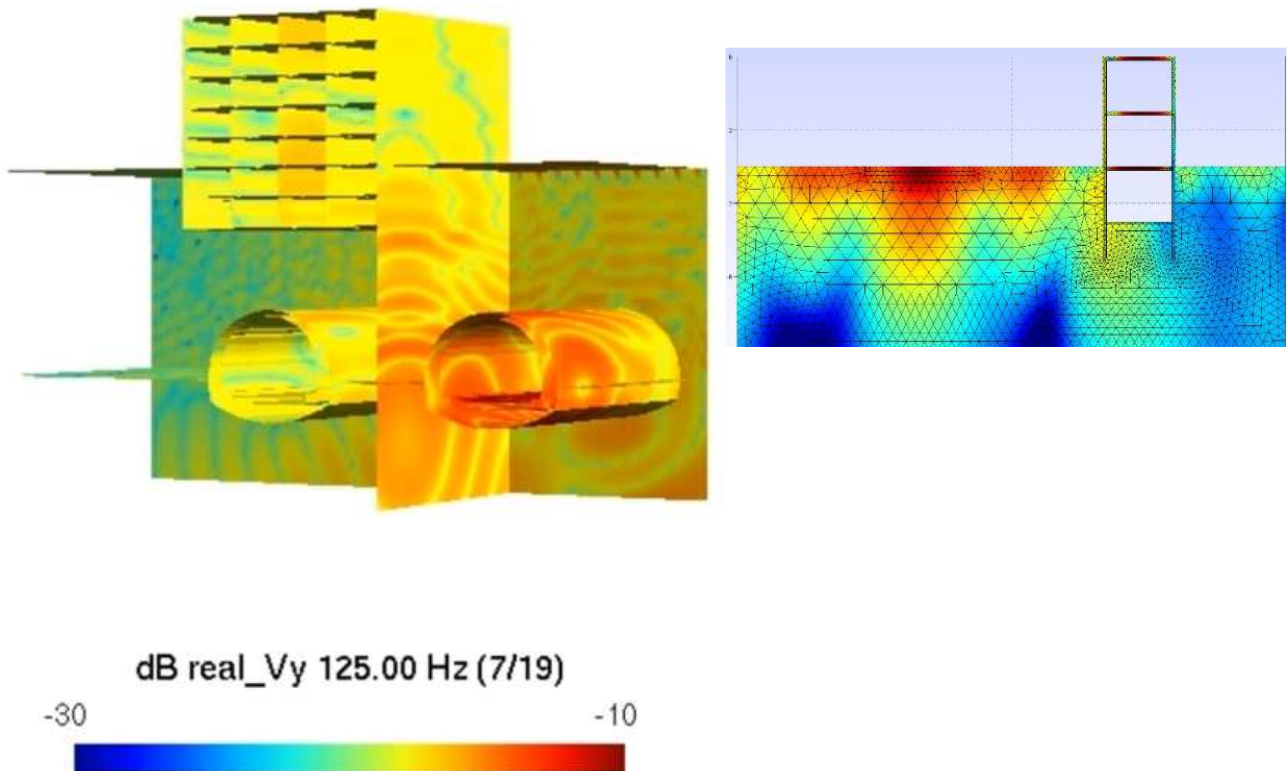


Figure 19 : Exemple de deux résultats de modélisation sous Mefissto, Visualisation du niveau de vitesse vibratoire verticale pour une source en tunnel et en surface

4.4. Résultats des modélisations

4.4.1. Coupes modélisées

Trois modélisations sont présentées pour évaluer les fonctions de transfert entre le piédroit du tunnel et la dalle de fondation d'un bâtiment en surface.

Les trois cas pris en compte correspondent aux trois configurations sensibles identifiées :

- Cas 1 : école maternelle
- Cas 2 : lycée
- Cas 3 : pavillon

Une coupe de principe est présentée ci-dessous ; le sol est modélisé par des couches géologiques correspondant aux relevés de terrain obtenus par l'analyse MASW. Le bâtiment est modélisé par une dalle de fondation en béton armé de 40 cm d'épaisseur aux dimensions des cas étudiés. Les fonctions de transfert fondations-planchers prises en compte sont tirées des mesures sur le terrain (les planchers des bâtiments ne sont pas modélisés, l'illustration est donnée à titre d'indication).

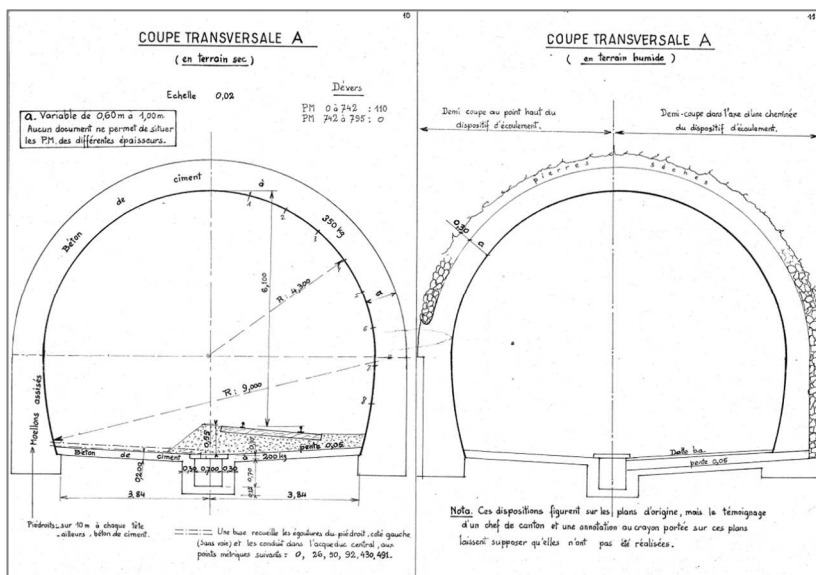


Figure 20: coupe en travers du tunnel

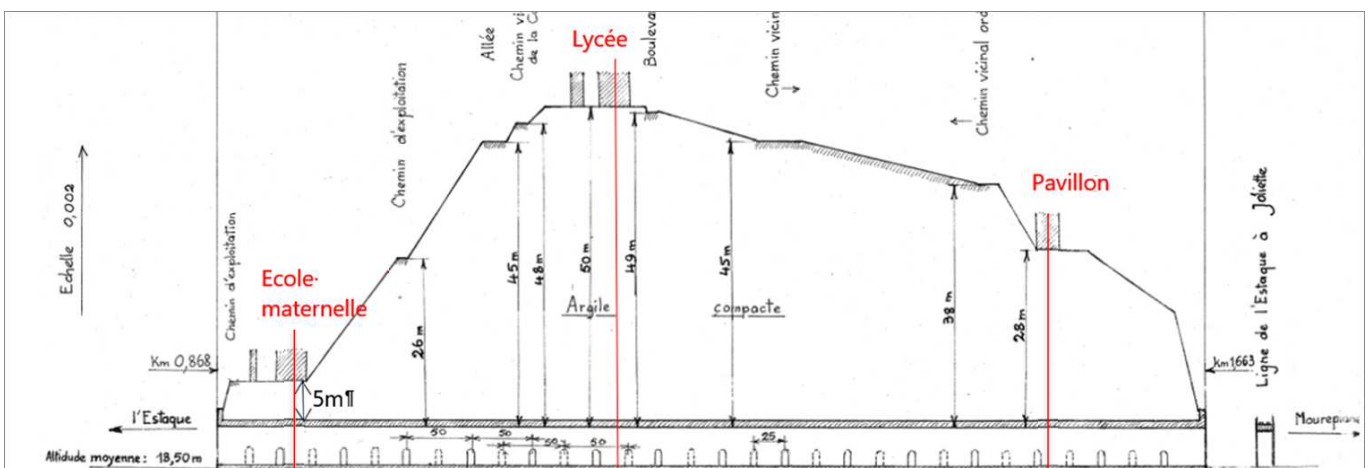


Figure 21: élévation et localisation des coupes

La figure ci-dessous présente la coupe retenue pour le Cas 1 : école maternelle



Figure 22 : Localisation de la coupe de modélisation Cas 1

La figure ci-dessous présente la coupe retenue pour le Cas 2 : lycée

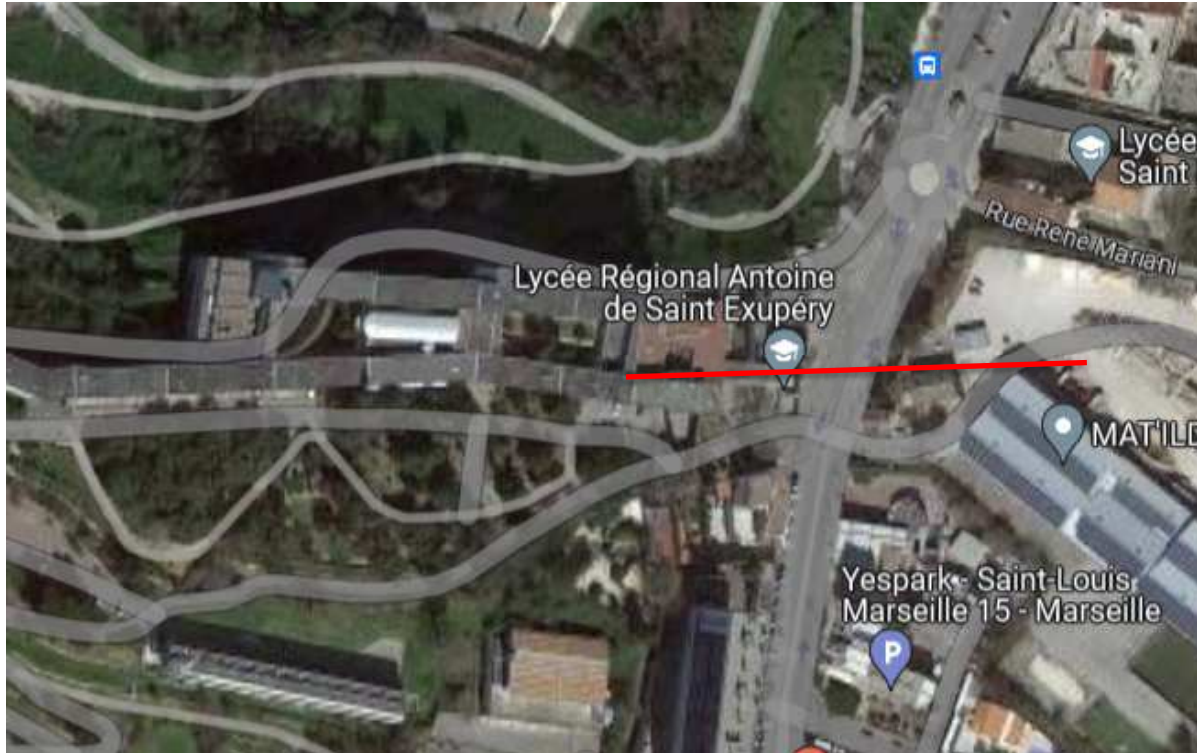


Figure 23 : Localisation de la coupe de modélisation Cas 2

La figure ci-dessous présente la coupe retenue pour le Cas 3 : pavillon

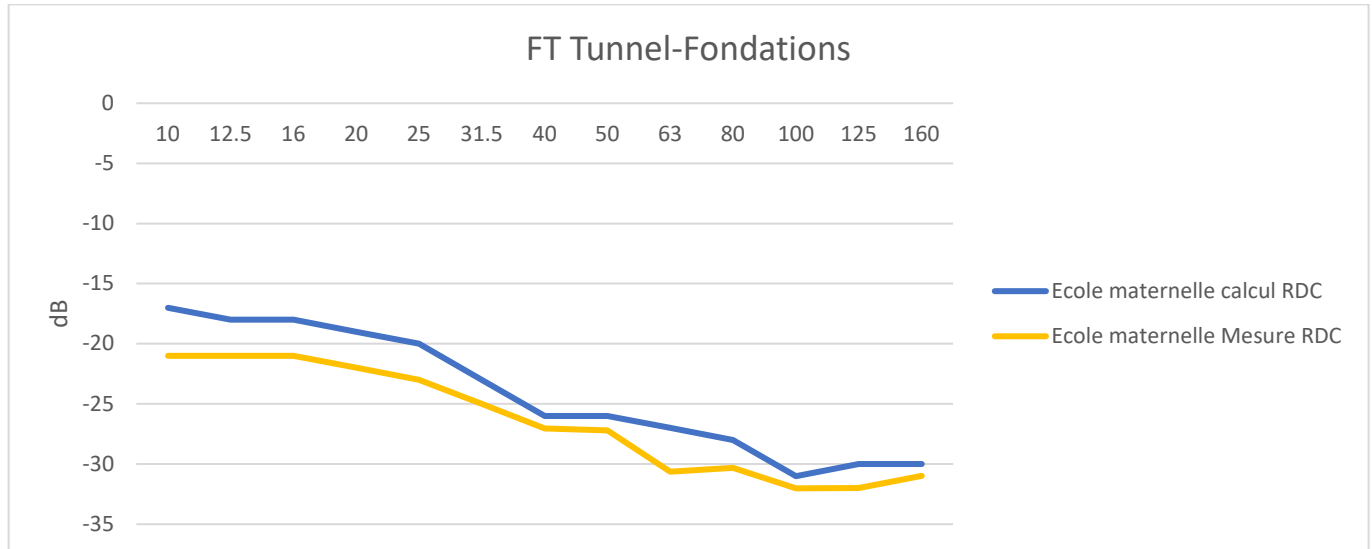


Figure 24 : Localisation de la coupe de modélisation Cas 3

4.4.2. Fonction de transfert calculée et calage du modèle

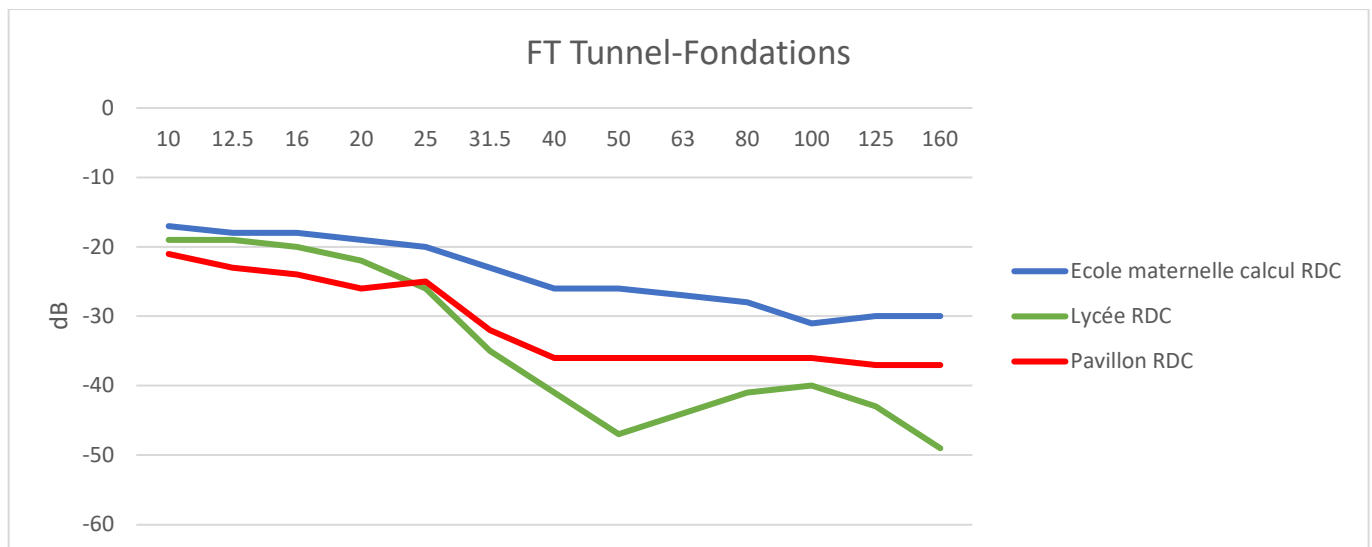
Les paramètres du modèle Mefisto sont ajustés en prenant les mesures de l'école maternelle comme référence. Les écarts obtenus entre le calcul et la mesure sont inférieurs à 5 dB par bande de tiers d'octave. Une marge de +1 à +5 dB par tiers d'octave est conservée dans le modèle de propagations Mefisto.

Les fonctions de transfert obtenues sont présentées dans le graphique suivant.



Le modèle de sol Mefisto est étendu aux 3 cas d'étude, les fonctions de transfert obtenues par modélisation et sont présentées dans le graphique suivant.

Pour les tiers d'octave 10 Hz à 160 Hz, une atténuation des niveaux de vibrations de l'ordre de -18 dB à -30 dB est obtenue dans le cas le plus proche du tunnel (cas 1 école maternelle).



Les courbes ci-dessus permettent d'évaluer le niveau vibratoire en pied de bâti en convoluant ces courbes avec la puissance vibratoire du train mesurée.

4.4.3. Évaluation du niveau vibratoire et du niveau de bruit rayonné

4.4.3.1. Niveau vibratoire

Un calcul du niveau de vibrations sur le plancher des bâtiments est présenté pour chacun des cas d'étude.

Le niveau de vibrations en centre de plancher L_v (dBv réf. $5 \cdot 10^{-8}$ m/s) est calculé pour chaque étage dans une pièce du bâtiment. Les niveaux de vibrations de plancher calculés sont tous inférieurs au seuil de perception humaine fixé à 69 dBv dans un bâtiment résidentiel de nuit.

Le risque de ressenti lié aux vibrations est classifié "faible", soit le plus bas niveau de l'échelle à trois niveaux (Faible/Moyen/Fort).

L'ensemble des résultats de calcul est présenté dans les tableaux ci-dessous.

Estimation du niveau de vibrations L_v en (dBv) dans l'école maternelle au passage du Fret										
Tiers d'octave (Hz)	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160
RDC	36.4	38	37.3	36.3	39	33.9	24.5	14.8	7	2.1
R+1	43.6	58.9	47.7	45.1	41.2	36.2	31	17	9.3	4.8

Estimation du niveau de vibrations L_v en (dBv) dans le lycée au passage du Fret										
Tiers d'octave (Hz)	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160
RDC	46.3	32.6	28.6	25.3	24.2	18.8	13.1	1.3	-9.6	-14.9
R+1	45	28.8	22.5	14.2	18.7	9.7	0.9	-7.4	-15.8	-16.1
R+2	53.2	45	35.4	32	34.7	22	18.1	7.5	-6	-15.6

Estimation du niveau de vibrations L_v en (dBv) dans le pavillon au passage du Fret										
Tiers d'octave (Hz)	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160
RDC	42.3	33.6	31.6	30.3	35.2	26.8	18.1	5.3	-3.6	-2.9
R+1	49.2	46	38.4	37	45.7	30	23.1	11.5	0	-3.6

4.4.3.2. Niveau de bruit rayonné

Un calcul du niveau de bruit solidien (bruit de grondement) dans le bâtiment au passage du train de fret est présenté pour chacun des cas d'étude.

Le niveau de bruit solidien en dB(A) est calculé pour chaque étage dans une pièce du bâtiment. Les niveaux calculés sont tous inférieurs à 30 dB(A). Lorsque le niveau de bruit ambiant préexistant est inférieur à 30 dB(A), le bruit solidien au passage du train peut être perceptible, par exemple dans une chambre de nuit.

Le risque de ressenti lié au bruit de grondement est évalué pour les chambres du logement de fonction du lycée et pour les chambres des pavillons de logements. Ce risque est variable selon la nature des murs et des planchers des chambres concernées.

Le risque de gêne auditive est classifié "faible" compte tenu des valeurs calculées. De plus, la majorité des circulations de train étant attendues le matin entre 6h et 9h et le soir entre 18h et 22h, le risque de perturbation du sommeil la nuit, période généralement comprise entre 6h et 22h est donc minime.

L'ensemble des résultats de calcul est présenté dans les tableaux ci-dessous.

Estimation du niveau acoustique Lp (dB(A)) dans l'école maternelle au passage du Fret											
Tiers d'octave (Hz)	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	Lp global(dB(A))
RDC	-3.1	4.3	8.9	12.7	19.8	18.7	13.0	6.7	1.9	-0.3	23.5
R+1	4.1	25.2	19.3	21.5	22.0	21.0	19.5	8.9	4.2	2.4	29.8

Estimation du niveau acoustique Lp (dB(A)) dans le lycée au passage du Fret											
Tiers d'octave (Hz)	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	Lp global(dB(A))
RDC	6.8	-1.1	0.2	1.7	5	3.6	1.6	-6.8	-14.7	-17.3	11.8
R+1	5.5	-4.9	-5.9	-9.4	-0.5	-5.5	-10.6	-15.5	-20.9	-18.5	7.4
R+2	13.7	11.3	7	8.4	15.5	6.8	6.6	-0.6	-11.1	-18	19.7

Estimation du niveau acoustique Lp (dB(A)) dans le pavillon au passage du Fret											
Tiers d'octave (Hz)	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	Lp global(dB(A))
RDC	2.8	-0.1	3.2	6.7	16	11.6	6.6	-2.8	-8.7	-5.3	18.4
R+1	9.7	12.3	10	13.4	26.5	14.8	11.6	3.4	-5.1	-6	27.4

4.4.4. Évaluation du niveau vibratoire vis-à-vis du risque de dommages aux structures

La circulaire du 23 juillet 1986 relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement, décrit un cadre normatif pour l'évaluation des niveaux vibratoires. Cette circulaire et les règles techniques qui y sont annexées définissent différentes catégories de bâtiments, ces catégories étant fonction de la sensibilité des différents types de bâtiments aux vibrations. Pour chaque type de de bâtiment, des valeurs limites de niveaux vibratoires admissibles sont définies. Ces valeurs limites correspondent aux « valeurs au-dessous desquelles la probabilité de désordres dans la construction est pratiquement négligeable dans la bande de fréquences considérées. ». Vu leur nature, les vibrations causées par le passage de trains de Fret sont à assimiler aux vibrations continues selon la circulaire du 23 juillet 1986.

Le tableau suivant présente les valeurs limites admissibles pour la vitesse particulière verticale en fonction de la fréquence dominante observée (les direction horizontales présentent une contribution inférieure),

Fréquence [Hz]	valeur limite [mm/s] constructions très sensibles	valeur limite [mm/s] constructions sensibles	valeur limite [mm/s] constructions résistantes
4 à 8	2	3	5
8 à 30	3	5	6
30 à 100	4	6	8

Nous proposons de retenir les valeurs limites de dommages aux structures pour les constructions très sensibles. Ces seuil de 2, 3 et 4 mm/s selon la fréquence étant applicables pour une construction très sensible, la valeur retenue est sécuritaire pour chaque gamme de fréquence.

Un calcul du niveau de vibrations est présenté en Rdc des bâtiments pour chacun des cas d'étude. L'ensemble des résultats de calcul est présenté dans les tableaux ci-dessous.

Estimation du niveau de vibrations sur fondations de l'école maternelle au passage du Fret en mm/s

Tiers d'octave (Hz)	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	Comparaison au seuil de dommages aux structures
Vitesse fondations en mm/s	3.3E-03	4.0E-03	3.7E-03	3.3E-03	4.5E-03	2.5E-03	8.4E-04	2.7E-04	1.1E-04	6.4E-05	Conforme

Estimation du niveau de vibrations sur fondations du lycée au passage du Fret en mm/s

Tiers d'octave (Hz)	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	Comparaison au seuil de dommages aux structures
Vitesse fondations en mm/s	1.0E-02	2.1E-03	1.3E-03	9.2E-04	8.1E-04	4.4E-04	2.3E-04	5.8E-05	1.7E-05	9.0E-06	Conforme

Estimation du niveau de vibrations sur fondations du pavillon au passage du Fret

Tiers d'octave (Hz)	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	Comparaison au seuil de dommages aux structures
Vitesse fondations en mm/s	6.5E-03	2.4E-03	1.9E-03	1.6E-03	2.9E-03	1.1E-03	4.0E-04	9.2E-05	3.3E-05	3.6E-05	Conforme

Tous les niveaux calculés sont très inférieurs aux valeurs limites de dommages aux structures, ce qui exclut le risque de dommages aux structures des bâtiments lié aux circulations ferroviaires sur le raccordement.



5. Conclusion

Une étude d'impact des vibrations au passage d'un train de fret dans le tunnel du Soulat est présentée.

Trois cas de figure sont sélectionnés parmi les bâtiments à proximité du tunnel :

- Cas 1 : école maternelle, salles de classe, localisation Figure 22
- Cas 2 : lycée, bureaux et logements de fonction, localisation Figure 23
- Cas 3 : pavillon ; chambres à coucher et séjour, localisation Figure 24

Une évaluation du risque de dommages aux structures est présentée. **Le risque de dommages aux structures des bâtiments proches du tunnel lié au passages des trains Fret est exclu.**

Pour l'ensemble des locaux étudiés, les niveaux de vibrations de plancher calculés sont tous inférieurs au seuil de perception humaine fixé à 69 dBv dans un bâtiment résidentiel de nuit. **Le risque de ressenti lié aux vibrations des planchers est classifié "faible", soit le plus bas niveau de l'échelle à trois niveaux (Faible/Moyen/Fort).**

Le niveau de bruit solidien en dB(A) est calculé pour chaque étage dans une pièce de chaque bâtiment sélectionné. Les niveaux calculés sont tous inférieurs à 30 dB(A). **Le risque de ressenti lié au bruit de grondement existe, pour les chambres du logement de fonction de l'école maternelle et pour les chambres des pavillons de logements, mais il est classifié "faible", soit le plus bas niveau de l'échelle.**

Le train pourrait être faiblement audible dans certains logements et dans les classes de l'école maternelle. Les horaires de passage des trains (6h-9h) et (18h-22h) sont situés en dehors de la période nocturne, ils n'impacteraient donc pas le sommeil des occupants des logements.