

# MÉTHODOLOGIE D'ESTIMATION DU SPECTRE DE FORCE D'UN TUNNELIER A L'AIDE D'UNE APPROCHE COUPLÉE NUMÉRIQUE ET EXPÉRIMENTALE

## **METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE FORCE SPECTRUM OF A TUNNELLING MACHINE USING A NUMERICAL AND EXPERIMENTAL COUPLING APPROACH**

Yara ASLAN<sup>1</sup>, Antoine RALLU<sup>1</sup>, Nicolas BERTHOZ<sup>2</sup>, Denis BRANQUE<sup>1</sup>, Charisis CHATZIGOGOS<sup>3</sup>, Theodora MAKRYPIDI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Université de Lyon/ENTPE/LTDS/CeLyA, Vaulx-en-Velin, France*

<sup>2</sup> *Centre d'Études des Tunnels (CETU), Bron, France*

<sup>3</sup> *Géodynamique et Structure, Montrouge, France*

**RÉSUMÉ** – L'objectif principal de cet article est de présenter une méthodologie d'estimation de la source vibratoire qu'est le tunnelier lors de la phase de creusement. Pour ce faire, les mobilités de transfert en champ libre sont estimées via une modélisation numérique FEM-BEM. De plus, la méthodologie se base sur des mesures in-situ vibratoires réalisées lors du creusement de la ligne 18 du métro sur le site de l'aéroport d'Orly permettant de calibrer une loi expérimentale de force longitudinale appliquée au front. Le spectre de force qui en résulte permettra ensuite de réaliser des études complémentaires d'estimation de niveaux vibratoires à la fois sur des structures en surface et dans des fondations profondes.

**ABSTRACT** – This paper aims to outline a method for estimating vibrations from tunneling machines during excavation. It involves estimating transfer mobilities using FEM-BEM numerical modeling and calibrating an experimental law of longitudinal force applied on the front based on in-situ measurements at Orly airport's metro line 18 excavation site. The resulting force spectrum will facilitate studying vibration levels on surface structures and deep foundations.

### 1. Introduction

Les activités de creusement de tunnels en zones urbaines à l'aide de tunneliers sont aujourd'hui nombreuses et l'étude de l'impact des vibrations induites est cruciale pour la sécurité publique et l'intégrité des structures environnantes. Améliorer la compréhension des phénomènes occurants implique à la fois la réalisation de campagnes expérimentales et de modèles numériques. Un large aperçu des mesures vibratoires dédiées à cette question est disponible dans (Rallu et al., 2023) et Lu et al. (2022). Un résultat fondamental est que l'intensité des niveaux vibratoires dépend fortement du contexte géologique.

Bien que des campagnes de mesures de vibrations sur site aient été menées, peu de recherches ont été consacrées à la modélisation numérique permettant de reproduire les vibrations provoquées par un tunnelier pendant l'excavation. Ces modèles visent à prédire la propagation des vibrations et leur impact potentiel sur les structures avoisinantes. Rahman et Orr.T (2011) ont utilisé un modèle FEM pour prédire les vibrations du sol induites par un tunnelier creusant dans des dépôts glaciaires reposant sur un socle calcaire. Lunardi (2015) a développé un modèle FEM pour étudier l'impact des vibrations provoquées par un tunnelier sur les bâtiments existants. Rallu et al. (2023) ont élaboré un modèle en différences finies (FLAC 3D) pour résoudre le problème théorique de la propagation d'ondes 3D dans un sol stratifié avec une source interne (le tunnelier).

Dans une première partie, le site d'étude est présenté, le dispositif expérimental est décrit et les principaux résultats expérimentaux sont résumés. Ensuite, un modèle de résolution

FEM-BEM est formulé, intégrant le tunnel et le sol environnant, pour prédire l'évolution des mobilités de transfert en fonction de la profondeur. Ce modèle vise à comprendre la propagation tridimensionnelle des ondes dans le sol stratifié. Enfin la caractérisation d'une loi empirique de force longitudinale dynamique appliquée au front du tunnel est réalisée par analyse inverse des données expérimentales permettant l'obtention d'un spectre de force caractéristique du TBM dans ce site.

## 2. Excavation de la ligne 18 à Orly, France

### 2.1. Description de la zone d'étude

La campagne de mesure a été réalisée pendant l'excavation de la ligne 18 du métro près de l'aéroport d'Orly à Paris, comprenant 10 stations couvrant une distance totale de 35 kilomètres avec des sections à la fois surélevées et souterraines, ces dernières constituant le principal objet de cette étude.

Sur le chantier, deux forages (notés T1 et T2, voir Figure 1) de 80mm de diamètre ont été réalisés. Les longueurs de ces sondages sont respectivement de 26 m et 38,8 m pour T1 et T2, et sont espacés de 10 m. Ces deux forages ont permis de réaliser : (i) des tests cross-hole et (ii) l'extraction d'échantillons du sol. L'analyse croisée de ces deux approches d'étude du sol a permis de caractériser les couches de sol sur le site (voir Tableau 1). Le site est saturé en eau, et la couverture au-dessus du tunnel mesure environ 28 mètres.

Tableau 1. Profil géologique du site

Intervalle de profondeur (m)	Couches géologiques	Vs (m/s)	Vp (m/s)
[0-3]	Argile sableuse avec des passées de cailloutis (LP)	353	1644
[3-6]	Argile plastique beige-gris et calcaire et argile beige (TB)	462	1997
[6-14 ,42]	Argile gris-vert compacte avec des passées plastiques (GV)	230	1551
[14,42-25]	Marne grise compacte avec des passées gypseuses blanchâtres (MSGp)	418	1532
[25-33,5]	Marne gris clair à gris foncé compacte avec des passées gypseuses blanchâtres (MSGa)	469	1830
[33,5-39,5]	Marne beige compacte avec des passées gypseuses blanchâtres (MFL)	616	1826

### 2.2. Instrumentation et acquisition

Le dispositif expérimental se compose de trois type des capteurs différents : (i) huit Trominos (géophones 3D), dont deux positionnés à l'intérieur du TBM (C1/C2) avec des distances de séparation respectives de 2,5 m et 4,5 m par rapport à la roue de coupe, et six à la surface du sol espacés de 10 m (C4, T70, T71, T76, T616, T645), (ii) 18 capteurs Rosina (géophones 1D verticaux), positionnés à la surface en forme de L avec un espacement de 5 m entre eux, et (iii) deux capteurs Syscom (M27/M28 accéléromètres 3D) positionnés au fond de chaque forage, l'un positionné à 2 m au-dessus de la couronne du TBM et l'autre à 2 m en dessous du fond du TBM. Toutes les mesures ont été acquises à une fréquence d'échantillonnage de 1024 Hz. Deux campagnes de terrain distinctes ont été menées dans le cadre de cette étude. La première, réalisée en janvier 2023, a porté sur la collecte de données sous bruit mécanique ambiant. La deuxième campagne, réalisée en avril 2023 lors de l'arrivée du tunnelier sur le site, était dédiée aux mesures pendant la phase d'excavation.

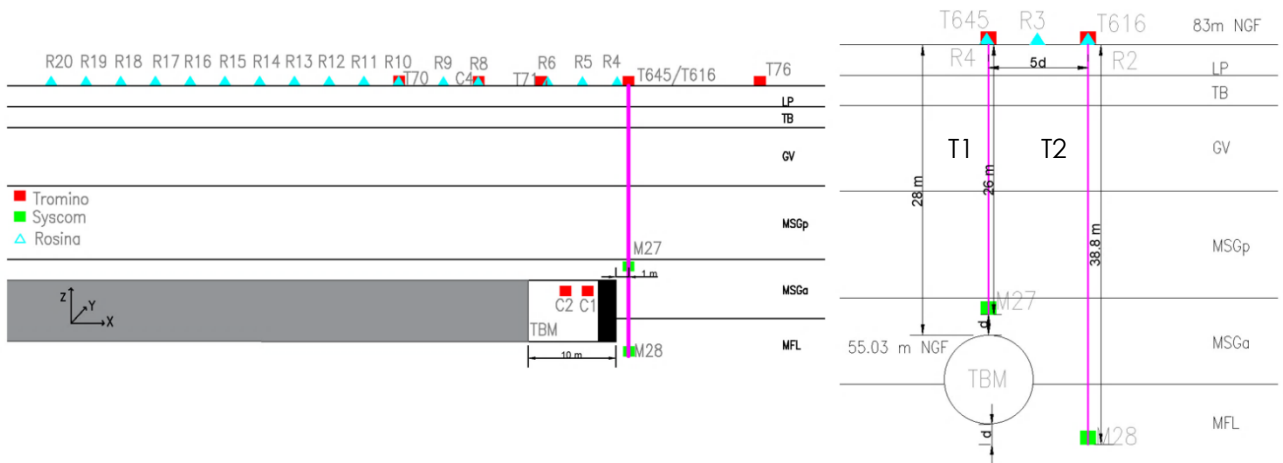


Figure 1. (a) Coupes longitudinale et (b) transversale du dispositif expérimental (échelle du capteur non respectée) avec  $d=2m$ .

### 2.3. Principaux résultats expérimentaux

En effectuant une analyse dans le domaine temporel à l'aide de données provenant de capteurs à l'intérieur du tunnelier, dans le sol et en surface, l'évaluation vise à quantifier les vibrations produites par le tunnelier lors de l'excavation et leur transmission ultérieure dans le milieu environnant.

Après filtrage des signaux entre  $[0-200Hz]$ , une vitesse caractéristique du signal, notée  $v_k$ , est établie comme la vitesse absolue avec une probabilité de 0,5 % d'être dépassée. Cette approche garantit que la majeure partie de l'énergie du signal est prise en compte. Les vitesses caractéristiques des capteurs dans le Tunnelier (TBM), dans le sol et en surface sont illustrées sur la Figure 2 pour chaque direction d'acquisition. Ces vitesses sont représentées en fonction de leur distance au centre de la roue de coupe.

La Figure 2 révèle la similitude des amplitudes pour les trois directions à chaque position des capteurs. De plus, les niveaux de vibration présentent une grande disparité entre le tunnelier ( $\approx 1$  mm/s), dans le sol ( $\approx 0,1$  mm/s) et en surface ( $\approx 0,01-0,1$  mm/s). On peut en déduire que l'énergie totale mesurée dans le tunnelier n'est pas uniquement liée au phénomène d'excavation, mais aussi à des vibrations internes qui ne sont pas transmises au terrain. Les contrastes entre les vitesses mesurées dans le sol et en surface sont dus à l'atténuation géométrique.

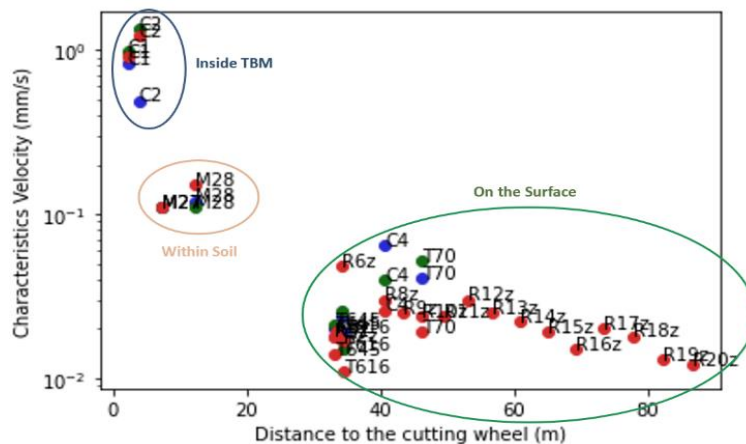


Figure 2. Vitesses caractéristiques en fonction de la distance du capteur à la roue de coupe, dans les trois directions d'acquisition (X, Y, Z) pour les capteurs situés à l'intérieur du tunnelier, en surface and dans le sol.

### 3. Méthodologie numérique générale

#### 3.1. Définition de l'approche numérique

L'approche utilisée pour évaluer le niveau de vibration et l'ampleur de la propagation du bruit à l'intérieur des structures est basée sur un découplage des phénomènes étudiés en suivant les principes de la norme ISO14837-1. La transmission des vibrations associées au tunnelier (TBM) est découpée en trois phases : émission, propagation et immission.

1. **Émission** : Cette étape consiste à simuler la force qui est la source des vibrations. Dans la phase de construction d'un tunnel (creusement), il se rapporte spécifiquement à la force exercée sur le front du tunnel par le tunnelier (TBM).
2. **Propagation** : Cette étape vise à simuler l'interaction entre le tunnel déjà construit et le sol, ainsi que la transmission des vibrations dans le sol vers un point d'observation positionné soit sur la surface, soit au voisinage d'un élément de fondation.
3. **Immission** : Au cours de cette étape, l'accent est mis sur la simulation de la transmission de vibrations entre un point au sol à la fondation d'une structure et un emplacement à l'intérieur du bâtiment, souvent sur un étage. De plus, cette phase consiste à modéliser le bruit solidien à l'intérieur du bâtiment, provenant des vibrations des éléments structuraux, en particulier les planchers. Cette phase n'est pas étudiée dans cet article.

Chacune de ces trois phases peut être modélisée individuellement, et le résultat final peut être obtenu par la superposition de ces trois modèles. Dans la suite de l'article, l'accent sera mis sur les vibrations dans la plage de fréquences de bandes de tiers d'octaves  $I_{étude} = [0,8 - 89 \text{ Hz}]$ , car cette plage est la plus étroitement liée à la perception tactile des vibrations transmises au sol. L'équation générale utilisée pour calculer le niveau de vibration en champ libre résultant de la phase du creusement, en tenant compte des phases d'émission et de transmission en deux phases, peut être formulée comme suit :

$$L_v = L_F + TM \quad (1)$$

Où,

- $L_v$  représente la vitesse calculée en un point spécifique du milieu [dB ref.  $5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ ]
- $L_F$  désigne le spectre de force qui caractérise la force d'excitation [dB ref. 1N]. Dans notre approche,  $L_F$  est estimé grâce à des données in-situ et par un calage numérique, voir paragraphe 4.2.
- $TM$  désigne la mobilité de transfert entre le TBM et un emplacement particulier dans le champ libre près de la fondation d'une structure considérée. [dB ref.  $5 \times 10^{-8} \text{ m/s/M}$ ]. Ce paramètre résulte du modèle numérique sous sollicitation harmonique unitaire, voir paragraphe 4.1.

Chaque valeur présentée dans l'Equation (1) est représentée en décibels [dB], ce qui signifie qu'elle est exprimée en logarithme de la quantité physique pertinente divisée par une quantité de référence. En outre, ces quantités sont également définies comme des fonctions de fréquence et sont généralement présentées comme des spectres dans des bandes de tiers d'octave.

#### 3.2. Formulation du modèle numérique

Cette section donne un aperçu du modèle numérique développé dans la présente étude, englobant le tunnel et le sol adjacent. Le creusement est réalisé par un TBM d'un diamètre  $D_t$ . Ce creusement est modélisé uniquement par une force longitudinale  $P_{chamber} \times A_C$  sur le front du tunnel appliquée par la roue de coupe sur le terrain en champ libre, voir Tableau 2. La valeur de cette force provient des données de pilotage du TBM. Les forces de cisaillement liées à la rotation de la roue de coupe ne sont pas prises en compte. De ce fait,

la géométrie ainsi que la sollicitation admettent un plan de symétrie (axe du tunnel), et par conséquent seule la moitié du domaine est modélisée, voir Figure 3.

Tableau 2. Paramètres du creusement

Paramètre	Symbole	Valeur
Diamètre de l'excavation	$D_t$	9,15 m
Force de contact roue/sol	$F_{contact}$	10 MN
Area de coup	$A_c$	66 m <sup>2</sup>
Pression d'air comprimé	$P_{chamber}$	1.6 bar

La résolution numérique est effectuée dans le domaine fréquentiel à l'aide du logiciel SASSI2010, code dédié aux problèmes d'interaction dynamique sol-structure grâce à un couplage entre éléments finis (FEM) pour les composants structurels tels que le tunnel et éléments de frontière (BEM type Thin Layer Method) pour les couches de sol. Afin de coupler ces deux formulations numériques, une partie du sol autour du tunnel est également modélisée par éléments finis et l'interconnexion entre les deux formulations est établie par des nœuds d'interaction.

Le tunnel déjà construit est constitué de voussoirs en béton dont les propriétés géométriques et mécaniques sont données dans le Tableau 3.

Tableau 3. Paramètres géométriques et mécaniques du tunnel

Paramètre	Symbole	Valeur
Épaisseur des voussoirs	$e_t$	0,4 m
Module de Young du béton	$E_t$	35,2 GPa
Coefficient de Poisson du béton	$\nu_t$	0,2
Facteur de perte d'amortissement du béton	$\mu_t$	0,01
Densité massique du béton	$\rho_t$	2500 kg/m <sup>3</sup>

Le sol est modélisé comme une stratigraphie horizontale idéalisée, composée de couches viscoélastiques infinies. Chaque couche de sol est représentée par son épaisseur, sa masse volumique, ses paramètres élastiques (vitesses de propagation  $V_P$  et  $V_S$  définies dans le Tableau 1). À noter que les valeurs de  $V_P$  ont été modifiées afin que le coefficient de Poisson soit compatible avec les recommandations du code SASSI (il est recommandé de respecter la condition :  $\nu \leq 0,45$ ) et les caractéristiques d'amortissement des matériaux (rapports d'amortissement  $\beta_P$  et  $\beta_S$  (1%)).

La taille du maillage utilisé pour les modèles FEM-BEM doit être compatible avec la plage de fréquences utilisée dans l'analyse, et le critère suivant est adopté :  $e \leq V_s / (5 \times f_{max})$

La Figure 3 représente le maillage en éléments finis spécifiquement (a) pour le sol excavé entourant le tunnel et (b) pour le tunnel lui-même, s'étendant sur une distance de 60 mètres avec des nœuds d'interaction entre les modèles FEM-BEM. Au-delà de cette distance (60 mètres), le tunnel est considéré comme une poutre équivalente pour 60 mètres supplémentaires.

## 4. Estimation des mobilités de transfert et des spectres de force

### 4.1. Calcul de la mobilité de transfert (TM)

Pour le calcul de la mobilité de transfert, une force normale harmonique unitaire est appliquée uniformément sur la roue de coupe pour des fréquences centrées sur les bandes de tiers d'octaves dans la gamme [0,8-89] Hz. Une interpolation linéaire est ensuite réalisée entre deux fréquences successives. Sur la Figure 4 sont représentées ces fonctions de

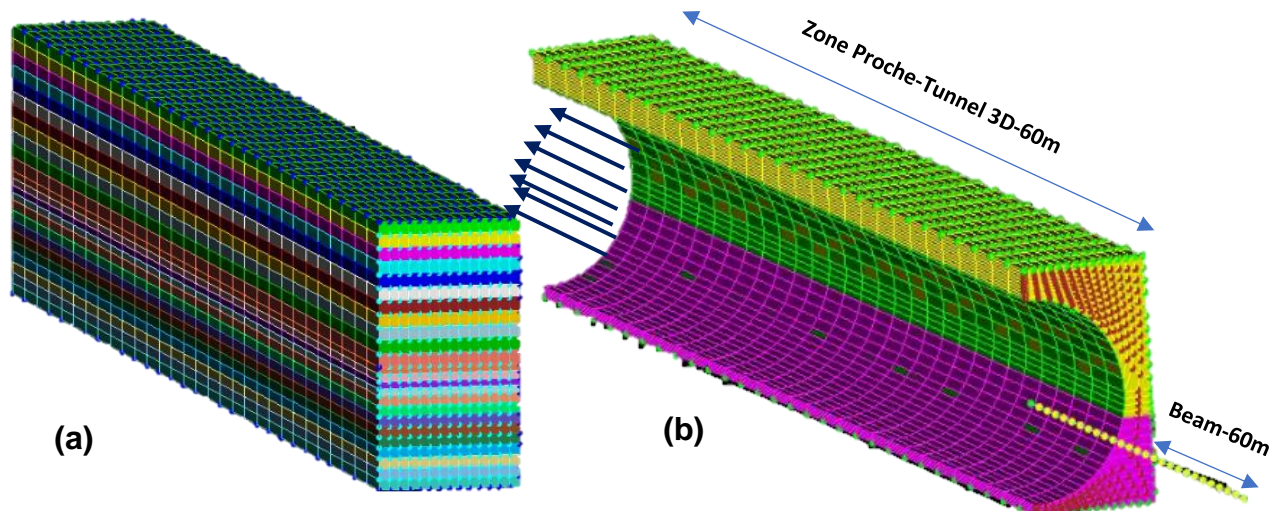


Figure 3. Maillage typique des modèles du sol excavé (a) et du tunnel (b) avec la force normale appliquée sur le front du tunnel et les nœuds d'interaction.

transfert (en direction longitudinale) pour différents points  $(X_0, Y_0, Z)$  où  $(X_0, Y_0)$  est situé sur le front du tunnel et sur l'axe de symétrie et les différentes valeurs de  $Z$  correspondent aux profondeurs des couches de sol  $Z \in \{2,34m, 6,18m \text{ et } 14,5m\}$ , au point de mesure ( $Z = 25,86m$ ) du capteur Syscom M27 (voir Figure 1) et au centre du front du tunnel ( $Z = 32,4m$ ) correspondant à la source vibratoire.

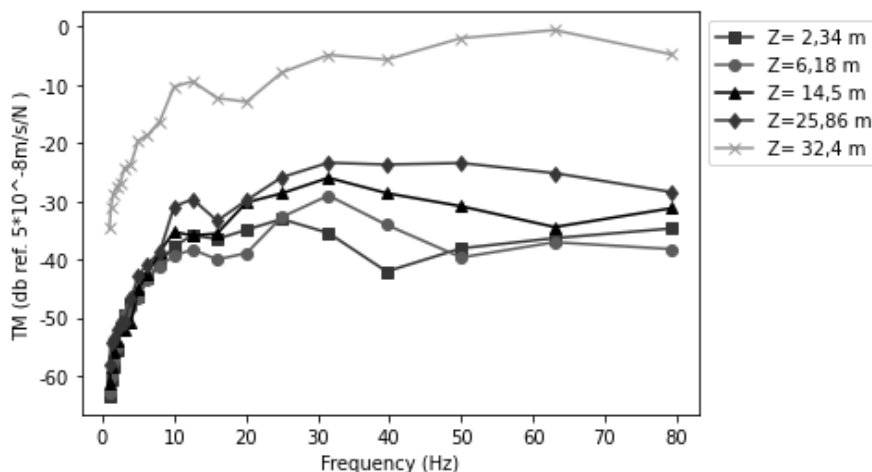


Figure 4. Évolution de la mobilité de transfert (direction longitudinale) pour différentes profondeurs

Il apparait clairement que les niveaux vibratoires dans le sol sont beaucoup plus faibles que celui de la source. En effet, puisque la source consiste en une force de pression normale du TBM sur le terrain, au droit du front du tunnel (selon le plan  $(X_0, Y_0)$ ) les particules de terrain ne se déplacent pas directement à cause de l'onde générée par la source (comme celles situées à l'avant du TBM), mais à cause d'un cisaillement généré par le mouvement différentiel entre les particules en mouvement et celles immobiles. De ce fait les vitesses calculées sont relativement faibles par rapport à celles de la source. L'allure du TM en fonction de la fréquence au capteur M27 est quasiment identique à celle de la source mais avec atténuation liée aux différentes profondeurs. Ceci s'explique par le fait que les deux points de calcul sont dans la même couche géologique et que seule une interaction avec les autres couches de sol et avec le tunnel perturbe faiblement les hautes fréquences ( $f \geq$

40Hz). Pour les autres points, l'allure diffère assez clairement de celle de la source à cause des phénomènes de réflexion/transmission des ondes entre les couches.

#### 4.2. Calcul du spectre de force $L_F$

Dans cette étude, les forces de cisaillement liées à la rotation de la roue de coupe ne sont pas prises en compte. Pour déterminer le spectre de force et définir la force d'excitation, nous avons utilisé une méthode simplifiée décrite par Rallu et al. (2023). La force longitudinale exercée sur le front du tunnel par le TBM, désignée sous le nom de  $F_{face}$ , se compose de deux composantes :

$$F_{face} = F_{contact} + F_{ground\_pressure} \quad (2)$$

où  $F_{contact}$  représente la force exercée par les pièces métalliques de la roue de coupe, mesurée sur site. Cependant, dans notre zone d'étude, cette force était très faible, donc la force prédominante correspond principalement à la pression d'air comprimé, définie comme (selon les valeurs du tableau 2):

$$F_{ground\_pressure} = A_c \times P_{chamber} = 10MN$$

Sur la base de cette force, Rallu et al. (2023) ont proposé une loi empirique pour modéliser la force variant dans le temps appliqué à l'avant:

$$\mathcal{F}_\alpha(t) = F_{face} \left( 1 + \alpha \times \frac{v(t)}{v_{max}} \right) \quad (3)$$

où  $v(t)$  représente l'évolution temporelle de la vitesse longitudinale enregistrée à l'intérieur du TBM, qui est normalisée par sa valeur maximale  $v_{max}$ . De plus,  $F_{face}$  est 10MN et  $\alpha \in [0,1]$  est un paramètre numérique à calibrer. Dans chaque bande 1/3 d'octaves de fréquence  $I_i = [f_i, f_{i+1}]$ , la force  $\mathcal{F}_\alpha$  est filtrée et convertie en dB pour obtenir  $(L_{\mathcal{F}_\alpha})_i = 20 \log\left(\frac{\|\mathcal{F}_{\alpha,i}\|_2}{F_{ref}}\right)$  où  $\|\mathcal{F}_{\alpha,i}\|_2$  est la valeur de moyenne quadratique. Cette valeur est associée à la fréquence centrale  $f_{c,i}$  de la bande  $I_i$ . Notons que la partie statique de (3) n'est pas prise en compte car correspond à une fréquence nulle et hors de l'intervalle  $I_{étude} = [0,8 - 89]Hz$ .

Pour étalonner  $\alpha$ , l'Équation (1) est utilisée, où la fonction de mobilité de transfert  $TM$  a été calculée au paragraphe 4.1 et  $L_v$  correspond à la vitesse longitudinale du capteur C4, voir Figure 1 :

$$L_{F,C4} = L_{v,C4} - TM_{C4} \quad (4)$$

Dans chaque bande de fréquence  $I_i$ ,  $\alpha_i$  est ainsi déterminé en résolvant  $(L_{F,C4})_i = (L_{\mathcal{F}_\alpha})_i$  et son évolution fréquentielle  $f_{c,i}$  est représentée en Figure 5-a.

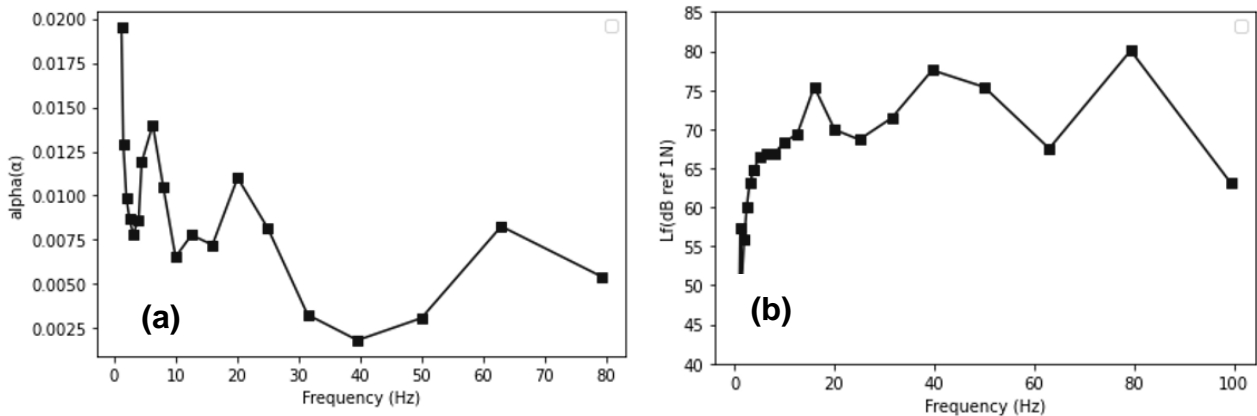


Figure 5. Évolution de  $\alpha$  (a) et de  $L_{\mathcal{F}_{1.2\%}}$  (b) en fonction de la fréquence.

Une valeur moyenne  $\bar{\alpha} = 1.2\%$  a été calculée et permet de reconstruire le spectre de force  $L_{F_{\bar{\alpha}}}$  (voir Figure 5 b) correspondant à une valeur globale :

$$L_{F-Global} = 10 \times \log_{10} \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{(L_F)_i/10} \right) = 84 \text{ dB}$$

Alors, il devient possible d'explorer le niveau de vibration à n'importe quel endroit du domaine désiré à l'aide de l'Équation (1).

## 5. Conclusions

Cet article décrit la méthodologie de modélisation numérique de l'estimation des niveaux vibratoires induits par l'excavation de la ligne 18 du métro du Grand Paris sur le site d'Orly. En particulier le spectre de force associé au creusement a été calculé en se basant (i) sur un modèle FEM-BEM modélisant la mobilité de transfert du terrain et du tunnel déjà construit, (ii) sur des mesures dynamiques réalisées in-situ en surface et dans le tunnelier, et (iii) sur une loi expérimentale paramétrique de force dynamique longitudinale appliquée au front de taille.

Au final, la loi empirique de sollicitation dynamique a été caractérisée, ouvrant ainsi la possibilité de calculer numériquement le niveau vibratoire en tout point du site. Dans la perspective, l'étude vise à étudier des modèles plus raffinés pour la description du régime de forces qui est appliqué sur le front du tunnel par le tunnelier et à intégrer des éléments structurels supplémentaires tels que des éléments de fondation profonde (pieux) pour évaluer leur réponse sous cette sollicitation.

## 6. Remerciements

Les résultats présentés dans cette communication ont été acquis dans le cadre du Projet ANR E-PILOT ANR-21-CE22-0011 (Etude de l'impact sur les Pieux lors du passage d'un Tunnelier). Les auteurs remercient les partenaires du projet d'avoir autorisé la publication de ces données.

## 7. Références bibliographiques

- ISO 14837-1/2005, Mechanical vibration- ground borne noise and vibration arising from rail systems- part I: general guidance.
- Lunardi G., Macinelli L., Nardone Ch., Panzeri P. (2015). Le vibrazioni nell'ambito dei lavori di scavo mediante TBM. Genrelita e analisi di alcuni casi reali Gallerie e grandi opere sotterranee, n°114. p27-38
- Lu Z., Wang X., Zhou G., Feng L., Jiang Y. (2022), Investigation on vibration influence law of double shield tbn tunnel construction, Applied Sciences (Switzerland) 12
- Rallu A., Berthoz N., Charlemagne S. and Branque D. (2023), Vibrations induced by tunnel boring machine in urban areas: In situ measurements and methodology of analysis 107826.
- Rahman M.E, Orr. T (2011). Finite element modelling of ground vibrations due to tunneling activities, World Academy of Science, Engineering and Technology 51, 928–934.
- SASSI (2010). A System for Analysis of Soil-Structure Interaction – Geotechnical Engineering Division, Civil Engineering Department, University of California, Berkeley, May 2019