



HAL
open science

Le projet ANR E-PILOT : études expérimentales et numériques en statique et en dynamique des interactions tunnelier-fondations profondes
Research project E-PILOT : Tunnel-Piles Interactions. Static and dynamic experimental and numerical studies

Alain Le Kouby, Luc Thorel, Nicolas Berthoz, Hussein Mroueh, Emmanuel Bourgeois, Luca Lenti

► **To cite this version:**

Alain Le Kouby, Luc Thorel, Nicolas Berthoz, Hussein Mroueh, Emmanuel Bourgeois, et al.. Le projet ANR E-PILOT : études expérimentales et numériques en statique et en dynamique des interactions tunnelier-fondations profondes Research project E-PILOT : Tunnel-Piles Interactions. Static and dynamic experimental and numerical studies. AFTES 2023, AFTES, Oct 2023, Paris, France. hal-04478669

HAL Id: hal-04478669

<https://univ-eiffel.hal.science/hal-04478669v1>

Submitted on 27 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

Le projet ANR E-PILOT : études expérimentales et numériques en statique et en dynamique des interactions tunnelier-fondations profondes

Research project E-PILOT : Tunnel-Piles Interactions. Static and dynamic experimental and numerical studies

Alain LE KOUBY¹, *Université Gustave Eiffel, Paris, France*

Luc THOREL¹, *Université Gustave Eiffel, Nantes, France*

Nicolas BERTHOZ², *CETU (Centre d'Etude des Tunnels), Lyon, France*

Hussein MROUEH³, *LGCgE, Université de Lille, Lille, France*

Emmanuel BOURGEOIS¹, *Université Gustave Eiffel, Paris, France*

Luca LENTI⁴, *CEREMA, Nice France*

Résumé

En zone urbaine, un des enjeux de l'extension des transports publics souterrains est l'évaluation des effets du creusement sur les fondations existantes. Dans le cas du creusement au tunnelier, leur réponse dépend des distances latérales et transversales entre la pointe du pieu et la clé du tunnel impliquant des interactions sol-structure tridimensionnelles, statiques et dynamiques. Le projet vise à fiabiliser le calcul des déformations induites par le creusement en proposant une démarche reposant sur des paramètres obtenus de manière fiable et des modèles rhéologiques dont les limites de validité sont connues. La complémentarité des partenaires permettra de proposer des outils logiciels opérationnels pour mettre en œuvre cette démarche. Le projet s'organise autour de quatre tâches principales qui sont présentées en détail.

Abstract

Within Grand Paris Express, one of the issues of the extension of underground public transport lines is to evaluate the effect of tunnelling on existing foundations. No recommendations are available to propose static and dynamic reliable numerical calculation. In the case of boring machine and its impact on deep foundations, their response depends on the transverse and lateral distance between pile tip and tunnel head. Moreover, being a three dimensional process, boring representation in a transversal plane section requires phase construction in order to take into account boring machine advancement and action, making numerical modelling complex. The research project aims at making calculation of deformation due to tunnelling reliable. It would propose a procedure relying on some parameters (that can be obtained from reliable tests) and rheological models with already known validity limits. Project partners complementarity will allow to produce operational softwares to enforce this procedure. The project is organised around four main Work Packages (WP) that are detailed.

1 Introduction

L'utilisation d'un tunnelier (TBM) apporte de nombreux avantages en termes de maîtrise des délais, des coûts et des risques : elle permet en particulier de réduire l'effet du creusement sur les constructions avoisinantes. Néanmoins, il reste difficile de prévoir l'impact du creusement sur les ouvrages existants ; d'autre part, on dispose de connaissances relativement limitées sur les vibrations induites par la construction et l'exploitation des tunnels, et la gêne aux riverains qui peut en découler. La détermination de la source vibratoire issue du tunnelier et des trains, et leurs effets en fonction de la stratigraphie rencontrée constituent un enjeu important et un verrou scientifique difficile.

Dans ce contexte, un projet de recherche ANR intitulé E-PILOT (Etude de l'impact sur les Pieux LOrs du passage d'un Tunnelier) a été lancé en 2022. Ce projet regroupe 10 partenaires : l'Université Gustave Eiffel, l'Université de Lille (LGCgE), le Cerema, le CETU, l'ENTPE, GDS, Itech, Terrasol/Setec, Société du Grand Paris (SGP), Tisséo Ingénierie.

2 Objectifs et positionnement du projet

Le projet a l'ambition d'améliorer la compréhension de l'impact du creusement d'un tunnel au tunnelier sur des fondations existantes, en termes de déplacements induits dans le massif et dans les fondations existantes, mais aussi en termes de vibrations subies par les riverains. Cette deuxième problématique se poursuit une fois que l'exploitation du tunnel a commencé. Le projet vise à s'appuyer sur des résultats expérimentaux en laboratoire et in situ pour faire progresser les méthodes de modélisation.

Pour ce qui concerne l'effet du creusement proprement dit, indépendamment des vibrations, le projet vise à améliorer la modélisation et la conception optimisée de la réponse des pieux au creusement et à l'exploitation des tunnels ferroviaires, en collectant de nouvelles données. Un projet antérieur, appelé TULIP (TUNneliers et Limitations des Impacts sur les Pieux, a permis de faire une synthèse de résultats expérimentaux obtenus sur un site du Grand Paris Express (Michalski et al., 2022 ; Mohamad et al., 2022), qui ont servi de base à un exercice de prévision organisé en 2021 (Berthoz et al., 2022). Dans le même esprit, le projet E-Pilot propose de produire de nouvelles données, issues d'essais en centrifugeuse et d'expérimentations in situ complémentaires à celle de TULIP, afin de fournir des éléments pour la validation et la calibration des modèles prédictifs. Un des attendus du projet est la caractérisation expérimentale de la réponse du massif et des fondations existantes au voisinage du tracé de nouveaux tunnels qui seront construits lors de la durée du projet (2022-2026).

Pour pallier la difficulté de réaliser de nombreux essais en vraie grandeur, le projet prévoit de réaliser des essais en centrifugeuse : la technique de « trapdoor » sera utilisée pour reproduire l'effet du creusement du tunnel sur des pieux pré-existants et observer le comportement du massif de sol. La centrifugeuse permettra d'étudier l'influence du type de pieux, de leur emplacement, de leur arrangement dans le cas de groupes de pieux, et du chargement auquel ils sont soumis, ainsi que l'influence du creusement sur leur capacité portante. On cherchera également à discuter expérimentalement l'effet des phases d'injection autour du tunnel.

Le projet prévoit également de développer des essais innovants (en laboratoire et in situ) dans le but de reproduire les chemins de contraintes réellement subis par le sol au cours du creusement. L'idée est de tenir compte le mieux possible du type de sollicitations que le sol est amené à subir lors du passage d'un tunnelier. La prise en compte des chemins de contrainte complexes suivis pendant la phase de creusement du tunnel (travaux) et le chargement des voies ferrées subis par les massifs de sol (trafic) reste peu étudiée. Elle nécessite des essais spécifiques en laboratoire avec des chemins de contraintes contrôlés avec des phases de déchargement à différents niveaux de déformation. Des essais triaxiaux et des essais sur cylindre creux aideront à prendre en compte ces chemins de contraintes spécifiques, et à valider et à calibrer (ou à rejeter) des modèles théoriques de comportement.

L'acquisition de données relatives au comportement du sol et des ouvrages permet d'aborder la question de la modélisation des effets du creusement. Dans le cadre du projet, on cherchera à proposer des méthodes numériques avancées prenant en compte au mieux l'influence des paramètres de pilotage du tunnelier et du processus de creusement d'une part, et l'interaction sol-pieu

d'autre part. Les résultats de TULIP, de la littérature et d'E-PILOT permettront d'évaluer les avantages et les limites des approches proposées dans la littérature, et au besoin d'en proposer de nouvelles.

Enfin, une attention particulière sera portée à la modélisation de la propagation des vibrations induites par le creusement dans le terrain et leur impact sur les structures existantes au voisinage du tunnel. Le creusement mécanisé d'un tunnel ainsi que son exploitation génèrent des vibrations transmises par le sol dont l'énergie est répartie sur une large gamme de fréquences (jusqu'à 100 Hz) lors du creusement (Lunardi et al., 2015 ; Bigot et Farotto, 2016 ; Grund et al., 2016) et de l'exploitation (Thompson et al., 2019; Sheng, 2019). La caractérisation de la source des vibrations constitue un enjeu important des expérimentations in situ, dans la continuité de ce qui a déjà été réalisé. Les vibrations émises par ces sources atteignent les fondations des bâtiments existants et la surface libre. Elles ne dépendent pas seulement de la source et de son environnement (méthodes de creusement, utilisation des tunnels, types d'ouvrages environnants) mais également du milieu de propagation (propriétés des sols, stratigraphie, géométrie des hétérogénéités anthropiques et/ou naturelles). Des suivis originaux et uniques sur les ouvrages souterrains seront réalisés ainsi que de nouvelles procédures d'essais in situ et en laboratoire pour améliorer la caractérisation des sols lors de la phase de creusement et de trafic ferroviaire.

3 Méthodologie

Le projet s'organise autour de six tâches (a) Management de projet, (b) WP2 pour la modélisation physique en centrifugeuse et les essais de laboratoire pour fournir des données (paramètres pour l'interaction sol/structure et pour des structures en modèle réduit). (c) WP3 pour l'instrumentation statique et dynamique sur site. (d) WP4 pour la modélisation statique comprenant le creusement de tunnel et l'interaction tunnel-sol-pieu. (e) WP5 pour la modélisation des ondes et vibrations avec de nouveaux modèles qui pourront être validés en utilisant des données provenant de WP2 et WP3. (f) WP6 pour la valorisation du projet et notamment la rédaction de recommandations qui seront utiles pour la profession. Les liens entre les six WP sont reportés qualitativement dans la Figure 1.

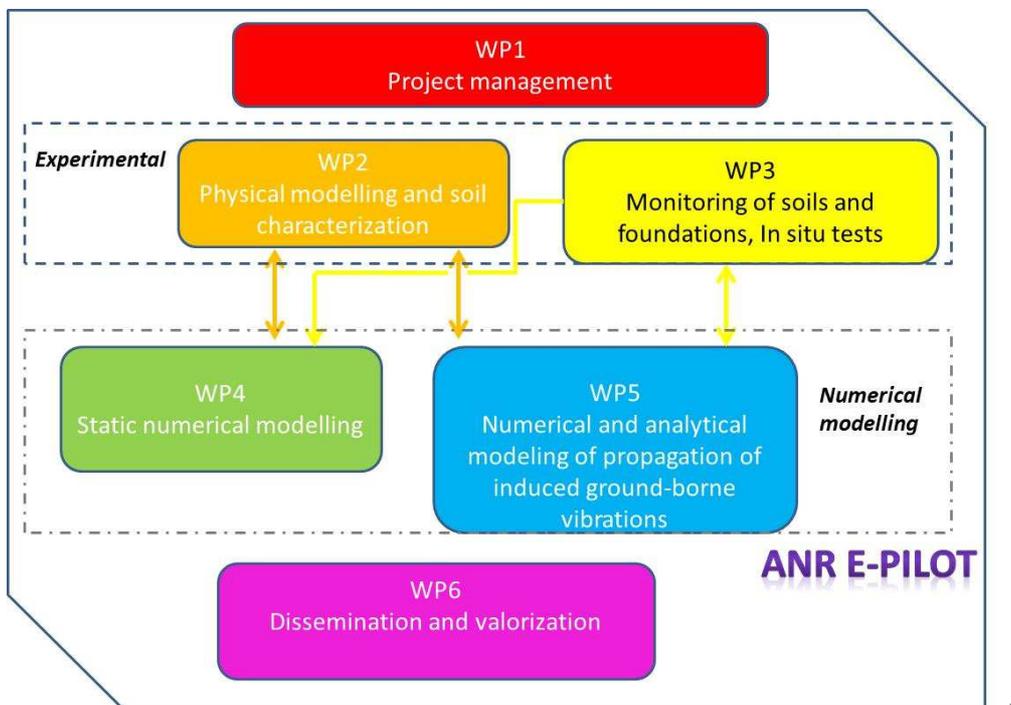


Figure 1. Organisation du projet ANR E-PILOT

3.1 WP2 – Modélisation physique et essais en laboratoire

Les activités en laboratoire (WP2) sont divisées en 2 parties : 1) modélisation physique en centrifugeuse géotechnique ; 2) caractérisation de l'interface sol et sol-pieu avec des techniques standard et avancées.

La tâche principale du WP2 de travaux est de caractériser finement le comportement du massif autour du tunnelier en action. Des études paramétriques à échelle réduite et à l'échelle de l'échantillon permettront de calibrer les lois de comportement utilisées dans le WP4. La connaissance du chemin des contraintes imposées au massif de sol permettra de valider la représentativité des modèles de sol choisis dans le WP4 pour simuler les mouvements observés dans le WP3.

3.2 WP3 – Instrumentation et essais sur site

Les vibrations générées lors de travaux souterrains peuvent avoir un impact important sur les structures, les équipements et les personnes. Ce problème, particulièrement dans les zones urbaines, est une préoccupation majeure pour toutes les parties impliquées dans la construction : maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et entrepreneurs.

Afin d'apporter des éléments de compréhension des vibrations induites par les tunneliers confinés (à pression de terre ou à pression de boue), des mesures ont été réalisées entre 2018 et 2020 sur quatre projets français de tunnels au tunnelier ou au micro-tunnelier. Ces mesures ont intégré des accéléromètres / géophones à la fois en surface et dans les tunneliers. Les données recueillies ont été comparées aux mesures disponibles dans la littérature. Les analyses effectuées concernent l'amplitude des vitesses particulières et le contenu fréquentiel des signaux. Les conclusions obtenues sont détaillées dans Rallu et al (2023), notamment le fait que : (i) les vibrations mesurées en surface et dans les tunneliers sont similaires dans les trois directions spatiales, tant en termes d'amplitude que de contenu fréquentiel, (ii) l'amplitude des vitesses mesurées dans les tunneliers est de l'ordre de 0,1 mm/s dans les terrains argileux, 1 mm/s dans les sables et graviers, et 10 mm/s dans les terrains rocheux, (iii) 80 % de l'énergie des signaux vibratoires mesurés dans les tunneliers se situent dans la gamme 0-40 Hz, (iv) en terrain meuble avec des tunneliers à front pressurisé, il est peu probable que les vibrations émises par un tunnelier puissent causer des dommages aux constructions avoisinantes ou une gêne importante aux riverains.

Plusieurs points méritent cependant d'être étudiés concernant la réponse dynamique du terrain, notamment : (i) dans d'autres contextes géotechniques (en particulier en cas de fronts mixtes très contrastés) et (ii) dans toute son épaisseur (et pas simplement en surface). C'est dans ce contexte que l'ENTPE et le CETU ont prévu de réaliser deux expérimentations in situ dans le cadre du projet E-Pilot : sur la ligne 18 du Grand Paris Express avec le soutien de la Société du Grand Paris et sur la ligne C du métro de Toulouse avec le soutien de Tisseo.

La première de ces expérimentations a été réalisée sur un ouvrage annexe de la ligne 18 du GPE entre février et mai 2023. Deux forages spécifiques ont été réalisés : l'un situé au-dessus de l'axe du tunnel et descendant jusqu'à 2 m au-dessus de la clé du tunnel, et l'autre situé transversalement à environ un diamètre de l'axe du tunnel et descendant jusqu'à 2 m sous son radier (Vib 1 et Vib 2 sur la Figure 2). Treize accéléromètres tridimensionnels ont été scellés à l'intérieur de ces forages à différentes profondeurs. En complément, des accéléromètres ont été mis en place à la surface du terrain à différentes distances de la section instrumentée, ainsi qu'au fond de l'ouvrage situé à une quinzaine de mètres de celle-ci, et dans les deux sas du tunnelier. Des mesures ont été acquises lors du passage du tunnelier au printemps 2023. Les analyses réalisées concernent à la fois les vitesses particulières mesurées sur l'ensemble de ces capteurs, ainsi que le contenu fréquentiel des différents signaux. Ces résultats seront publiés prochainement et seront utilisés comme entrants aux développements analytiques et numériques décrits au WP5.

Deux autres actions sont également prévues dans le cadre de ce WP. Dans la continuité des pieux instrumentés dans le cadre du projet de recherche TULIP (Mohamad et al, 2022), deux nouveaux pieux instrumentés sont envisagés sur la ligne 3 du métro de Toulouse. Cette expérimentation, pilotée par l'Université Gustave Eiffel avec le soutien de Tisseo permettra de consolider la base de données expérimentale acquise, et contribuera ainsi au développement et à la calibration des modèles numériques décrits (WP4). Enfin, le développement d'un nouvel appareil de mesure inspiré d'un pressiomètre autoforeur, permettant une sollicitation en contraction (et non en expansion) du terrain est en cours à l'Université Gustave Eiffel avec le soutien de la société Fondasol.

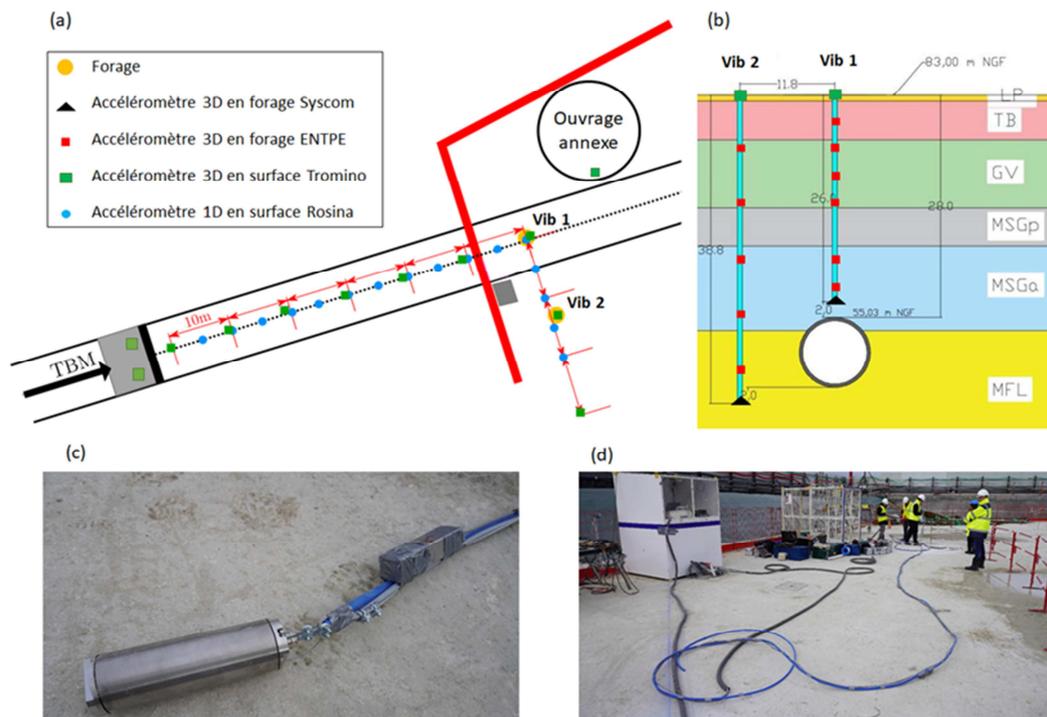


Figure 2 : Expérimentation réalisée sur la ligne 18 du Grand Paris Express : (a) vue en plan, (b) vue en coupe, (c) photographie des capteurs mis en place en forage (Syscom à gauche, ENTPE à droite), (d) photographie du site instrumenté. WP4 - Modélisation numérique du creusement au tunnelier et ses conséquences

La prédiction des tassements induits par le creusement de tunnels sur les structures existantes à proximité dans les zones urbaines reste une tâche délicate, pour laquelle il n'y a pas encore de consensus sur les procédures numériques à utiliser. La difficulté découle du caractère fortement tridimensionnel et non linéaire des interactions mutuelles entre les mouvements de terrain induits par le creusement, et de la complexité du processus de creusement. Cette tâche vise à étudier les aspects clés de la modélisation de l'interaction entre le creusement et les structures existantes en proposant une approche originale basée sur un petit nombre de paramètres clés (facilement déterminés par des procédures fiables) et sur des modèles de sol constitutifs dont les limites de validité sont connues. L'accord de long terme entre les partenaires, étayé par une synergie de compétences combinées offrira des outils logiciels opérationnels avec mise en place de nouvelles procédures, validées par des données d'instrumentation en centrifugeuse ou sur site, le Grand Paris Express représentant une réelle opportunité.

En pratique, le processus de creusement est intrinsèquement tridimensionnel, et nous avons donc décidé de nous concentrer sur des calculs 3D, plus complexes à mettre en œuvre mais plus représentatifs des phénomènes physiques réels. D'autre part, le problème soulève d'autres difficultés, qui seront abordées séparément dans deux sous-tâches conduites toutes les deux conjointement, mais pouvant avancer de façon relativement indépendante.

De plus, les données collectées sur les sites sont parfois incomplètes, ou obtenues dans un contexte trop complexe pour valider sans ambiguïté les solutions numériques. A cet égard, les résultats des essais en centrifugeuse, obtenus dans des conditions contrôlées, seront utilisés pour mettre en évidence la confiance des simulations numériques dans chacune des sous-tâches.

3.3 WP5 – Modélisation numérique et analytique des vibrations induites

Un des objectifs de cette tâche est de définir des paramètres permettant d'estimer les effets vibratoires à la surface libre et sur les fondations existantes, en tenant compte des différentes configurations des sols caractérisant les sites le long des tracés des lignes de transport souterrain en construction (Grand Paris Express, Toulouse, Lyon, etc.). Plus précisément, on considérera que, pour la phase de creusement, la question porte sur l'estimation des effets vibratoires par rapport aux technologies de creusement (bouclier ouvert ou tunnel sous pression : pression de terre ou de boue, etc.) et aux paramètres de contrôle du tunnelier (vitesse de creusement, pression sur la surface de forage, etc.).

La modélisation de la propagation des ondes émises par un tunnelier est un problème complexe, dont la compréhension nécessite plusieurs approches complémentaires : (i) des mesures in-situ pour la définition des paramètres d'entrée, (ii) une modélisation théorique pour comprendre les phénomènes physiques mis en jeu dans des cas relativement simples (sols élastiques homogènes, hypothèses simplificatrices sur l'action mécanique du tunnelier in situ), (iii) une modélisation numérique pour prendre en compte la complexité des domaines réels et des hétérogénéités naturelles ou artificielles.

Les mesures dynamiques synchronisées entre les capteurs en surface et dans le TBM, réalisées à la fois dans le cadre du WP3 et issues de mesures précédentes - Rallu et al. (2023) - permettront (i) de caractériser la source vibratoire qu'est le TBM dans différents contextes géologiques, (ii) d'estimer les niveaux vibratoires caractéristiques dans le sol et en surface, et (iii) d'estimer les gammes de fréquence dans lesquelles les signaux sont les plus énergétiques. Ce dernier point a un impact direct sur les modélisations numériques, pour lesquelles la finesse du maillage est directement liée aux longueurs d'ondes (donc aux fréquences) se propageant dans le sol. Dans le cadre du WP5, des modélisations mathématiques (avec résolution analytique et numérique) des phénomènes dynamiques liés à la phase d'excavation au tunnelier seront réalisées. Différentes tâches peuvent être définies en fonction des trois phases de propagation des vibrations dans la construction de tunnels : excitation (émission : caractérisation de la source) / transfert de mobilité (propagation dans le sol) / propagation dans les structures de génie civil.

Ainsi, à partir de cette stratégie, la connaissance de la source (tunnels et types de trafic sur la voie ferrée), pourra être utilisée par les bureaux d'études pour avoir l'estimation des niveaux de vibrations induites en fonction de la distance à la source pour différentes configurations stratigraphiques, informations utiles pour définir les solutions antivibratoires possibles lors de la phase de conception et d'exploitation du tunnel.

Cette procédure sera définie à la suite d'une étude paramétrique concernant la propagation des vibrations dans des domaines géologiquement homogènes et/ou hétérogènes et considérera différentes propriétés mécaniques et géométriques des sources et des sols suivant un degré de complexité croissant. La démarche s'appuiera sur l'analyse des résultats de propagation des vibrations obtenus par différentes approches numériques (couplage FEM, FDM et FEM-BEM) et analytiques (approches fréquentielles et homogénéisation) afin d'estimer les incertitudes liées à la calibration des paramètres du modèle et leurs effets sur la variabilité des résultats obtenus en termes de niveaux vibratoires et d'effets sur les fondations. Il existe principalement trois approches différentes pour modéliser la propagation des ondes dans un sol en présence de pieux prenant en compte les effets pieu-sol-pieu : (i) les approches purement numériques (FEM, FDM, BEM et FEM-BEM ; voir Borel, 2001 ; Sheng, 2019), (ii) des approches semi-analytiques de type Winkler (Chow, 1986) et (iii) des approches « matériau équivalent », où l'idée est de considérer le système sol/pieu comme homogène. Pour cette dernière approche, on distingue ainsi (a) les modèles multiphasiques, initialement développés par de Buhan et Sudret (1999) et (b) les modèles basés sur la méthode d'homogénéisation des milieux périodiques (Sanchez-Palencia, 1980), en particulier la thèse de Soubestre (2011).

Indépendamment de l'approche de modélisation, la procédure comportera deux étapes. La première étape servira à établir les fonctions de transfert pour chacune des configurations source et stratigraphique, tandis que la prochaine étape sera dédiée à sa validation en comparant les résultats prédits aux observations instrumentales de terrain. Le WP 5 est ainsi divisé en trois sous-tâches (Figure 4).

La première est dédiée à la définition des sujets à considérer (sources synthétiques et réelles, configurations stratigraphiques, type de fondations, traitement des données enregistrées en relation

avec les relevés de mesures prévus dans le cadre du WP3) pour la réalisation de l'étude paramétrique et des sites instrumentés qui seront considérés pour la phase de validation de la procédure.

La seconde sous-tâche est dédiée à la modélisation numérique et analytique des vibrations respectivement pour la phase de creusement et pour la phase d'exploitation), et, plus particulièrement à l'élaboration des fonctions de transfert caractérisant les phénomènes d'interaction ondes-sol-structure le long du chemin source-récepteur. Pour la phase d'exploitation, il faut considérer les vitesses et les types de trains potentiellement en circulation. Des études paramétriques via des modélisations numériques 2D (voire 3D) seront réalisées afin de caractériser l'énergie transmise dans les sols et l'atténuation des ondes avec la distance à la source, dans différentes configurations de sites.

La troisième sous-tâche est consacrée à l'élaboration d'une procédure qui, à partir des fonctions de transfert dérivées, permettra une estimation des niveaux vibratoires attendus. Cette procédure pourra être utilisée par les bureaux d'études qui, sauront définir les stratégies d'atténuation les plus adaptées à la variabilité spatiale des niveaux vibratoires prédits et selon différentes catégories d'ouvrages.

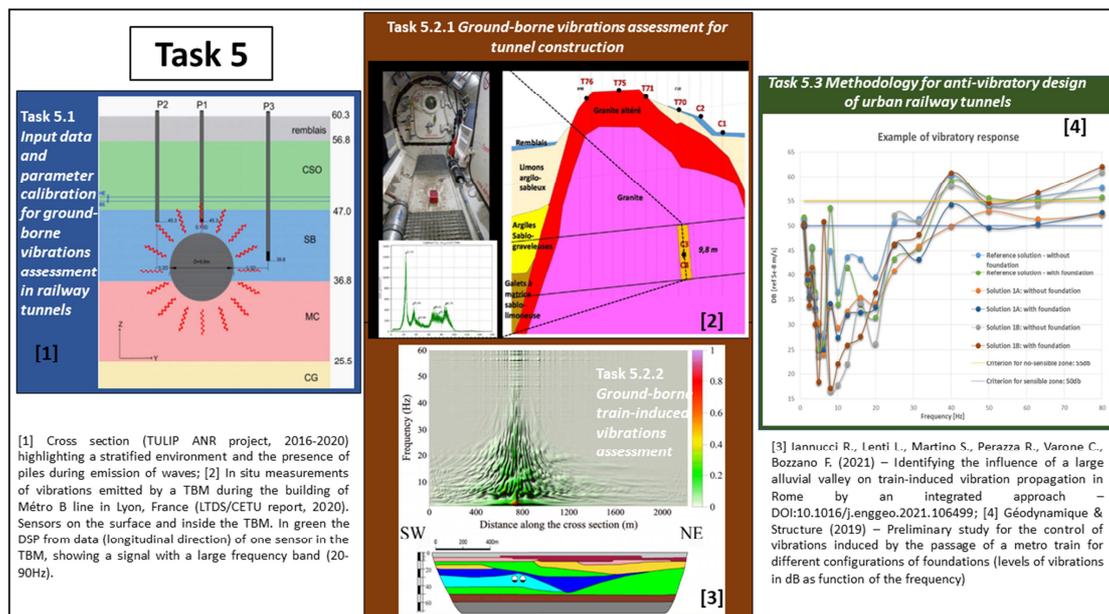


Figure 3 Organisation du WP5 : Modélisation numérique et analytique des vibrations induites.

4 Conclusions et perspectives

Le projet ANR E-PILOT, lancé en 2022, réunit des partenaires académiques et des partenaires industriels qui sont complémentaires pour tenter de clarifier les interactions sol-structure entre un tunnel (en construction ou en exploitation) en zone urbaine et un bâti fondé sur pieux autant au niveau des approches expérimentales que numériques. Le spectre des compétences engagées est large, tant sur le plan scientifique que technique, et devrait permettre de capitaliser des éclairages nouveaux sur la question.

5 Remerciements

Les travaux présentés dans cette communication font l'objet du Projet ANR E-PILOT ANR-21-CE22-0011 (Etude de l'impact sur les Pieux LOrs du passage d'un Tunnelier). E-PILOT est un projet de recherche regroupant 4 bureaux d'étude du génie civil, 2 maîtres d'ouvrage et 4 organismes universitaires et de recherche. Nous remercions également les autres membres du projet pour leur contribution. Il est piloté par l'Université Gustave Eiffel et financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et le Ministère de la Transition écologique. Les auteurs remercient les partenaires du projet d'avoir autorisé la publication de ces données.

6 Références

- Bigot A., Farotto G. 2016. Tunnel boring machine vibration impact prediction method based on surface vibration measurements and tunnel to surface transfer function calculation, 23rd International Congress on Sound & Vibration, Athens, Greece, pp. 1-8.
- Borel, S. 2001. Comportement et dimensionnement des fondations mixtes. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées - Paris.
- De Buhan P. and Sudret B. 1999. A two-phase elastoplastic model for unidirectionally-reinforced materials – Eur. J. Mech. A/Solids vol. 18, 995-1012.
- Gilleron N. 2016. Méthode de prévision des tassements provoqués par le creusement des tunnels urbains et influence des présoutènements. thèse Univ Paris-Est. tel-01540731H.
- Grund M., Ritter J.R.R, Gehrig M. 2016. Ground motion relations while TBM drilling in unconsolidated sediments, Rock Mech Rock Eng, 49:1773-1787.
- Kaalberg, F. J., Teunissen, E.A.H., van Tol, A. F., Bosch, J. W. 2005. "Dutch research on the impact of shield tunnelling on pile foundations." Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 1615-1620.
- Liu, Chao, Zixin Zhang, and Richard A. Regueiro. 2014. "Pile and pile group response to tunnelling using a large diameter slurry shield – Case study in Shanghai." Computers and Geotechnics 59 21-43.
- 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.
- Michalski A., Branque D., Berthoz N., Mohamad W., Bourgeois E., Le Kouby, Szymkiewicz F., 2022. Full-scale experiment of the TBM / soil / pile interaction in Parisian subsoil, World Tunnel Congress.
- Mohamad W., Bourgeois E., Le Kouby A., Szymkiewicz F., Michalski A., Branque D., Berthoz N., Soyoz L., Kreziak C., 2022. Full-scale study of pile response to EPBS tunnelling on a Grand Paris Express site, Tunnelling and Underground Space technology 124 (<https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104492>)
- Pang, C. H., K. Y. Yong, Y. K. Chow, and J. Wang. 2006. The response of pile foundations subjected to shield tunnelling. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground - Proceedings of the 5th International Conference of TC28 of the ISSMGE 737-743.
- Projet E-PILOT - <https://e-pilot.univ-gustave-eiffel.fr/projet/le-projet-e-pilot/>
- Rachdi, S. (2019). Impact du creusement des ouvrages souterrains à faible profondeur en milieu urbain. Thèse de doctorat de l'Université PSL, Mines-ParisTech. 157p.
- Rallu A., Berthoz N., Charlemagne S., Branque D. (2023). Vibrations induced by TBMs in urban areas : in-situ measurements and methodology of analysis, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 15 (2023) 130–145. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.02.014>.
- Sanchez-Palencia E. 1980. Non homogeneous media and vibration theory - Lecture Note in Physics, 127, Berlin, Springer-Verlag.
- Selemetas D., Standing J.R. 2013. Response of full-scale piles to EPBM tunnelling in London Clay, Géotechnique, vol 67, n°9, pp. 823-836.
- Sheng X. 2019. A review on modelling ground vibrations generated by underground trains, International Journal of Rail Transportation, DOI:10.1080/23248378.2019.1591312.
- Soubestre, J. 2011. Homogénéisation et expérimentation de milieux renforcés par inclusions linéaires : Application aux fondations profondes – PhD Thesis, ENTPE, Lyon.
- Thompson D. J., Kouroussis G., Ntotsios E. 2019. Modelling, simulation and evaluation of ground vibration caused by rail vehicles - Vehicle System Dynamics, 57(7): 936–983.