

Estimation des indices de pollution des couches de ballast ferroviaire par inversion générative de particules irrégulières aléatoires avec prise en compte des gradients hydriques – apprentissage profond /radar à inversion spectrale 3D

Laboratoire d'accueil :

Université Gustave Eiffel
MAST – Département Matériaux et Structures
LAMES – Laboratoire auscultation, modélisation, expérimentation des infrastructures de transport
Site de Nantes-Bouguenais

Encadrement scientifique :

- Directeur de thèse : Amine IHAMOUTEN amine.ihamouten@univ-eiffel.fr
- Co-directeur de thèse : Xavier DEROBERT xavier.derobert@univ-eiffel.fr
- Co-encadrant : Jean-Michel SIMONIN jean-michel.simonin@univ-eiffel.fr

Résumé

Les contraintes opérationnelles et environnementales actuelles des chantiers ferroviaires imposent le recours à de nouvelles pratiques d'auscultation à grand rendement en amont de l'exploitation. Cela implique de cartographier de manière non destructive les interfaces entre les différentes couches de l'assise ferroviaire (ballast sain, ballast colmaté ou pollué, couche intermédiaire, sol support), puis d'évaluer, sans interruption de la chaîne de production, le taux de colmatage ou de pollution du ballast. Cette approche est nécessaire pour assurer la maîtrise de la chaîne logistique et réduire son impact carbone.

Cette thèse vise à affiner puis à valider, numériquement et expérimentalement, les modèles et la méthodologie d'auscultation par propagation des ondes électromagnétiques dans les milieux ferroviaires multicouches initiés dans le cadre de la thèse d'E. Mbubia (2022-2025), réalisée au sein du laboratoire MAST/ LAMES de l'Université Gustave Eiffel. L'objectif de ce travail de recherche est de rendre plus robuste et plus réaliste le modèle direct (FDTD / Relative Ballast Fouling) permettant l'estimation des indices de pollution des couches de ballast ferroviaire par inversion générative de particules irrégulières aléatoires, en intégrant la prise en compte des gradients hydriques.

Le modèle direct intégrera la dépendance fréquentielle de la permittivité diélectrique complexe à travers une adaptation de la loi de Topp au modèle génératif RIP (Random Irregular Polygons), via des approches d'apprentissage profond, tant locales que globales, appliquées aux données GPR-3D. L'estimation des observables diélectriques et géométriques complexes nécessitera l'optimisation et l'adaptation de méthodes hybrides d'inversion (physiques et basées sur l'intelligence artificielle) développées par le laboratoire MAST/ LAMES dans le cadre de différents programmes de recherche antérieurs.

Cette approche sera également déclinée pour l'exploitation d'observables physiques complémentaires, liées par exemple à la pénétrométrie dynamique PANDA. Pour la classification et la régression, avec seuillage adaptatif des anomalies structurelles et matérielles, cette thèse transposera les approches non déterministes développées en 2023 lors de la phase de validation numérique, en vue de leur intégration dans l'outil NDT- Portal (jumeau numérique).

L'approche proposée impliquera une résolution statistique du problème inverse reposant sur une optimisation non déterministe (notamment via des algorithmes d'apprentissage artificiel tels que YOLOv8 et XGBoost). L'objectif est d'élargir les bases d'apprentissage et de test à l'aide de nouvelles caractéristiques saillantes, afin de couvrir un large spectre de configurations susceptibles de correspondre aux mesures in situ, tout en ajustant au mieux la loi de dégradation (modélisée en indice de colmatage ou en taux d'encrassement RB- F).

Enfin, une expérimentation sur site réel — correspondant à un linéaire d'environ vingt kilomètres de voies mis à disposition par le partenaire ETF — sera réalisée à différentes échéances. Elle permettra la constitution d'une base de données contrôlée en conditions réelles (Ti), complétée par une série de mesures pluriannuelles (Ts) destinées au suivi de l'évolution du front de colmatage. Les mesures de recalage par pénétrométrie dynamique PANDA seront réalisées par les équipes du laboratoire.

Enjeux scientifiques, méthodologiques et technologiques

Le projet vise à améliorer la compréhension et la modélisation des interactions électromagnétiques dans des milieux complexes, hétérogènes et partiellement saturés, typiques des assises ferroviaires. Il s'agit notamment de mieux représenter i) les interfaces entre couches (ballast sain, ballast colmaté, couche intermédiaire, sol support), ii) l'influence des gradients hydriques sur la permittivité diélectrique complexe et iii) la variabilité géométrique et matérielle du ballast (particules irrégulières, pollution). Le second enjeu scientifique de cette thèse est relatif au renforcement des modèles directs et inverses à base de données GPR-3D. Cette thèse ambitionne ainsi de rendre plus robuste et réaliste le modèle direct électromagnétique FDTD couplé au modèle génératif RIP, en intégrant une dépendance fréquentielle réaliste de la permittivité (adaptation de la loi de Topp).

Sur le volet inversion, l'enjeu est de résoudre un problème fortement non linéaire et mal posé par des approches statistiques et non déterministes hybrides (physique / intelligence artificielle).

Le projet se situe à l'interface entre la modélisation physique, l'inversion numérique et l'apprentissage profond. Il vise donc à exploiter conjointement des approches de deep learning locales et globales, à intégrer des algorithmes de détection, classification et régression (YOLOv8, XGBoost) et à enrichir les espaces de caractéristiques pour améliorer l'estimation des indices de colmatage (RB-F).

Enfin, un enjeu majeur réside dans la combinaison d'observables issues du GPR-3D et de mesures mécaniques complémentaires (pénétrométrie dynamique PANDA), afin d'améliorer la fiabilité de la caractérisation géotechnique et diélectrique des structures ferroviaires.

D'un point de vue méthodologique et technologique, cette thèse visera :

- Le développement d'outils d'auscultation non destructifs à haut rendement

Le projet répond à la nécessité de disposer de méthodes d'auscultation rapides, continues et non destructives, compatibles avec les contraintes opérationnelles des chantiers ferroviaires et sans interruption de l'exploitation.

- L'intégration dans un jumeau numérique (NDT-Portal)

Les méthodes développées devront être transférables vers un outil opérationnel de type jumeau numérique utilisé au sein du laboratoire (NDT-Portal), avec des procédures de classification, de régression et de seuillage adaptatif des anomalies.

- La validation numérique et expérimentale à grande échelle

La thèse se distingue par une validation en laboratoire sur des matériaux et des structures contrôlés présents sur le campus de Bouguenais, puis sur site réel, à l'échelle d'un linéaire d'environ 20 km, avec un suivi temporel pluriannuel (au-delà de la durée de la thèse) du front de colmatage, garantissant un fort niveau de maturité technologique.

Profil recherché

- Diplôme de Master 2 ou équivalent, avec une dominante en :
- génie civil / géophysique appliquée,
- traitement du signal, physique appliquée ou sciences de l'ingénieur,
- data science ou intelligence artificielle appliquée aux systèmes physiques.

Un double profil physique / numérique ou génie civil / IA sera particulièrement apprécié.

Conditions

- Durée : 3 ans
- Début : octobre 2026
- Lieu : MAST/LAMES – Site de Nantes-Bouguenais
- Financement : contrat doctoral sur subvention Université Gustave Eiffel
- Date limite de candidature : **6 avril 2026**

Moyens mis à disposition

Pour la réalisation de cette thèse, le laboratoire MAST/LAMES mobilisera du personnel technique et du matériel. Le Laboratoire mettra à disposition deux systèmes GPR-3D et un système UWBepsilon pour la mesure des gradients de permittivité diélectrique nécessaires aux essais en laboratoire et sur site réel. Le laboratoire fournira le matériel informatique, les logiciels de modélisation et les données d'apprentissage et de validation labellisées utilisées dans le cadre de la thèse de E. Mbubia-Tchoua (2022-2025), nécessaires au projet, ainsi que l'expertise spécifique à l'interprétation des données. L'équipe d'encadrement apportera une expertise sur l'hybridation (physique / apprentissage automatique) et sur le développement de nouveaux modèles électromagnétiques et des algorithmes non-conventionnels (et plus robustes) afin de traiter les données complexes en structuration matricielle 3D.

Mots-clés

Ground Penetrating Radar (GPR) – inversion – modélisation FDTD – modèle de Jonscher – apprentissage profond – modèle génératif RIP – loi de Topp – ballast – colmatage – gradients hydriques – voies ferroviaires.

Références

- Ernest Mbubia Tchoua, Jérôme Tissier, Antoine Martin, Yannick Fargier, Amine Ihamouten. The use of Ground Penetrating Radar and artificial intelligence for automated railway trackbed stratigraphy and Ballast Fouling assessment. *Transportation Engineering*, 2026, 23, pp.100415. <10.1016/j.treng.2025.100415>. <hal-05444277>
- Ernest Mbubia Tchoua, David Guilbert, Jérôme Tissier, A. Martin, Théo Dezert, et al.. Numerical parametric study for ballast assessment using SVM applied to GPR data. 20th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2024), Jun 2024, Changchun, China. <hal-04563766>
- Ernest Mbubia Tchoua Évaluation et classification des caractéristiques des couches de ballast pollué dans les voies ferroviaires - Traitement hybrides par intelligence artificielle / FWFI (Full Wave Form Inversion). Thèse de doctorat, Déc 2025, Université Gustave Eiffel. <<https://theses.fr/s394920>>

Estimation of railway ballast fouling indices via generative inversion of random irregular particles accounting for moisture gradients - Deep learning / 3D spectral inversion GPR

Host laboratory:

Gustave Eiffel University
MAST – Department of Materials and Structures
LAMES – Laboratory for modelling, experimentation and survey of transport infrastructures
Nantes-Bouguenais site

Scientific supervision:

- PhD supervisor: Amine IHAMOUTEN amine.ihamouten@univ-eiffel.fr
- Co-supervisor: Xavier DEROBERT xavier.derobert@univ-eiffel.fr
- Co-supervisor: Jean-Michel SIMONIN jean-michel.simonin@univ-eiffel.fr

Abstract

The current operational and environmental constraints of railway construction sites require the adoption of new high- throughput inspection practices upstream of operation. This involves non-destructively mapping the interfaces between the different layers of the railway substructure (clean ballast, fouled or polluted ballast, intermediate layer, supporting soil), and then assessing, without interrupting the production chain, the degree of ballast fouling or pollution. This approach is necessary to ensure control of the logistics chain and to reduce its carbon footprint.

This PhD project aims to refine and then validate, both numerically and experimentally, the models and inspection methodology for multilayer railway media initiated during the PhD thesis of E. Mbubia (2022–2025), carried out within the MAST/ LAMES laboratory at Gustave Eiffel University. The objective of this research is to make the forward model (FDTD / Relative Ballast Fouling) more robust and realistic for estimating fouling indices of railway ballast layers through generative inversion of random irregular particles, by incorporating the consideration of moisture gradients.

The forward model will integrate the frequency dependence of complex dielectric permittivity through an adaptation of Topp's law to the RIP (Random Irregular Polygons) generative model, using both local and global deep learning approaches applied to 3D GPR data. The estimation of complex dielectric and geometric observables will require the optimization and adaptation of hybrid inversion methods (physics- based and artificial intelligence-based) developed by the MAST/LAMES laboratory within various previous research programs.

This approach will also be extended to the exploitation of complementary physical observables, for example those related to PANDA dynamic penetrometry. For classification and regression, with adaptive thresholding of structural and material anomalies, this PhD project will transpose the non-deterministic approaches developed in 2023 during the numerical validation phase, with a view to their integration into the NDT-Portal tool (digital twin).

The proposed approach will involve a statistical resolution of the inverse problem based on non-deterministic optimization (notably through artificial learning algorithms such as YOLOv8 and XGBoost). The objective is to expand the training and testing datasets using new salient features, in order to cover a wide range of configurations likely to correspond to in situ measurements, while optimally adjusting the degradation law (modeled as a fouling index or RB- F contamination rate).

Finally, an on-site experiment — corresponding to a track section of approximately twenty kilometers made available by the partner ETF — will be carried out at different time intervals. This will enable the creation of a controlled database under real conditions (Ti), supplemented by a series of multi- year measurements (Ts) intended to monitor the evolution of the fouling front. Calibration measurements using PANDA dynamic penetrometry will be performed by the laboratory teams.

Scientific, methodological and technological challenges

The project aims to improve the understanding and modelling of electromagnetic interactions in complex, heterogeneous and partially saturated media, representative of railway substructures. In particular, it seeks to better represent i) the interfaces between layers (clean ballast, fouled ballast, intermediate layer, subgrade), ii) the influence of moisture gradients on complex dielectric permittivity, and iii) the geometric and material variability of ballast (irregular particles, pollution).

A second major scientific challenge of this PhD concerns the strengthening of forward and inverse models based on 3D GPR data. The thesis therefore aims to make the electromagnetic FDTD forward model coupled with the RIP generative model more robust and realistic, by integrating a physically consistent frequency dependence of dielectric permittivity, through an adaptation of Topp's law.

Regarding inversion, the challenge lies in solving a highly non-linear and ill-posed problem using hybrid statistical and non-deterministic approaches, combining physics-based modelling and artificial intelligence.

The project is positioned at the interface between physical modelling, numerical inversion and deep learning. It therefore aims to jointly exploit local and global deep learning approaches, integrate detection, classification and regression algorithms (YOLOv8, XGBoost), and enrich the feature spaces in order to improve the estimation of ballast fouling indices (RB-F).

Finally, a major challenge lies in the combination of observables derived from 3D GPR data with complementary mechanical measurements (dynamic PANDA penetrometer), in order to enhance the reliability of the geotechnical and dielectric characterisation of railway structures.

From a methodological and technological perspective, this PhD will focus on:

- Development of high-throughput non-destructive investigation tools

The project addresses the need for fast, continuous and non-destructive investigation methods, compatible with the operational constraints of railway worksites and allowing data acquisition without interrupting railway operations.

- Integration into a digital twin (NDT-Portal)

The developed methods will be transferable to an operational digital twin platform used within the laboratory (NDT-Portal), incorporating procedures for classification, regression and adaptive thresholding of structural and material anomalies.

- Large-scale numerical and experimental validation

The PhD is distinguished by a multi-level validation strategy, including laboratory experiments on controlled materials and structures available on the Bouguenais campus, followed by full-scale field validation along a railway section of approximately 20 km. This will be complemented by multi-year temporal monitoring (beyond the duration of the PhD) of the ballast fouling front, ensuring a high level of technological maturity.

Candidate profile

A Master's degree (MSc) or equivalent, with a strong background in one or more of the following areas:

- civil engineering / applied geophysics,
- signal processing,
- applied physics or engineering sciences,
- data science or artificial intelligence applied to physical systems.

A dual background in physics and numerical methods, or in civil engineering and artificial intelligence, will be particularly valued.

Conditions

- Duration: 3 years
- Start date: October 2026
- Location: MAST/LAMES – Nantes-Bouguenais site
- Funding: doctoral contract funded by Université Gustave Eiffel
- Application deadline : **April 6, 2026**

Resources and facilities

For the implementation of this PhD project, the MAST/LAMES laboratory will mobilise dedicated technical staff and equipment. The laboratory will provide two 3D GPR systems as well as a UWBEpsilon system for measuring dielectric permittivity gradients, required for both laboratory experiments and field investigations.

The laboratory will also provide the computing resources, modelling software, and the labelled training and validation datasets developed within the framework of the PhD of E. Mbubia-Tchoua (2022–2025), which are necessary for the present project, along with specific expertise in data interpretation.

The supervisory team will contribute expertise in physics–machine learning hybridisation and in the development of new electromagnetic models and non-conventional (and more robust) algorithms, aimed at processing complex data organised in 3D matrix structures.

Keywords

Ground Penetrating Radar (GPR) – inversion – FDTD modelling – Jonscher’s model – deep learning – RIP generative model – Topp’s law – ballast – hydric gradients – fouling – railways.

References

- Ernest Mbubia Tchoua, Jérôme Tissier, Antoine Martin, Yannick Fargier, Amine Ihamouten. The use of Ground Penetrating Radar and artificial intelligence for automated railway trackbed stratigraphy and Ballast Fouling assessment. *Transportation Engineering*, 2026, 23, pp.100415. <10.1016/j.treng.2025.100415>. <hal-05444277>
- Ernest Mbubia Tchoua, David Guilbert, Jérôme Tissier, A. Martin, Théo Dezert, et al.. Numerical parametric study for ballast assessment using SVM applied to GPR data. 20th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2024), Jun 2024, Changchun, China. <hal-04563766>
- Ernest Mbubia Tchoua. (in French) Évaluation et classification des caractéristiques des couches de ballast pollué dans les voies ferroviaires - Traitement hybrides par intelligence artificielle / FWFI (Full Wave Form Inversion). Thèse de doctorat, Déc 2025, Université Gustave Eiffel. <<https://theses.fr/s394920>>