

Inversion hybride pour la caractérisation mécanique des structures de chaussées à partir de la cartographie différentielle déflexion/radar (TSD/GPR) : modélisation numérique vs. apprentissage profond génératif

La détérioration progressive de l'état des chaussées routières nécessite une évaluation structurelle rapide, efficace et automatisée afin d'estimer la durée de vie résiduelle de la chaussée. L'estimation précise du module d'élasticité des différentes couches de la chaussée (E_i) joue un rôle essentiel dans ce processus, servant également de facteur fondamental pour la conception de chaussées résilientes, l'optimisation des stratégies de maintenance et l'amélioration de la sécurité routière globale. Cependant, les méthodes et dispositifs conventionnels utilisés pour estimer E_i , tels que le Falling Weight Deflectometer (FWD), présentent plusieurs limitations en raison de contraintes opérationnelles et de sécurité lors des mesures à l'échelle du réseau.

Pour surmonter ces obstacles, les dispositifs de Traffic Speed Deflectometer (TSD) ont émergé comme solution innovante pour l'évaluation continue de la capacité portante des chaussées, limitant ainsi le besoin de contrôle de la circulation. Le TSD a la possibilité d'effectuer des mesures dans le flux de circulation à une vitesse allant jusqu'à 80 km/h et repose sur la mesure de la vitesse de déflexion verticale (D_v) de la chaussée au lieu de la déflexion elle-même. Les mesures continues du TSD fournissent des données beaucoup plus adaptées que le FWD, ce qui permet une planification de la maintenance plus précise et efficace. Par contre, la quantité importante de données qu'il génère présente de nouvelles contraintes relatives à la gestion et au traitement de l'information.

Ces obstacles ont pu être surmontés en partie en utilisant des techniques plus ou moins adaptées, telles que l'apprentissage automatique. En effet la thèse d'Abdelgader Abdelmuhsen (2021-2024) a permis de lever une partie des verrous scientifiques et méthodologiques à travers l'application de l'intelligence artificielle à l'exploitation des mesures de déflexion pour la caractérisation mécanique des structures de chaussées. Néanmoins, ces travaux de recherche ont montré que l'optimisation de l'approche inverse nécessitait :

- la connaissance a priori des caractéristiques géométriques des structures auscultées (nombre de couches, épaisseurs, ...);
- la constitution d'une base de données labélisées assez importante pour une bonne convergence des algorithmes avec des problèmes inverses mal posés.

Ainsi, le sujet de thèse proposé ici constitue une suite logique des travaux de thèse d'Abdelgader Abdelmuhsen et a pour objectif de mettre en place un nouveau modèle/méthodologie basé sur la combinaison de données TSD et GPR pour l'estimation des modules d'élasticité en continu en faisant appel à une approche d'inversion hybride (modèle de Burmister généralisé & modèle d'apprentissage profond génératif). Cette approche novatrice utilise des mesures de D_v (TSD) et de gradients de permittivité diélectrique (GPR) plutôt que sur la méthode classique utilisée en approche directe pour l'estimation de la déflexion. Le modèle à développer dans le cadre de cette thèse reposera sur des données issues à la fois de modélisations numériques et de dispositifs de mesures reconnus par les experts du domaine ainsi que des sites tests contrôlés, garantissant ainsi leur conformité aux conditions du monde réel.

Cependant, l'entraînement des modèles d'apprentissage profond fiables nécessite des données massives labélisées, qui ne sont généralement pas faciles à obtenir en raison des contraintes opérationnelles. Cette thèse proposera ainsi un modèle amélioré de réseaux contradictoires génératifs des moindres carrés (LSGAN) qui utilise les fonctions de perte du LSGAN et des réseaux neuronaux convolutifs (CNN) pour générer des signaux TSD et GPR à partir d'une base de dimension limitée. Ce modèle peut générer des données TSD et GPR de haute précision pour remédier à la rareté des caractéristiques saillantes mécaniques et diélectriques. Cette thèse évaluera le modèle proposé à l'aide de l'indice d'évaluation « Frechet Inception Distance » avec une confrontation avec d'autres modèles GAN existants. De plus, l'adaptabilité des images générées par LSGAN pour l'augmentation des données TSD et GPR sera étudiée par le modèle YOLOv4, qui a été utilisé dans le cadre de la thèse de Rakeeb Jafer (2019-2022). Par ailleurs, ces travaux auront pour but de vérifier que l'inclusion de signaux et d'images générées par LSGAN dans l'ensemble des données d'entraînement TSD et GPR puisse augmenter la diversité des caractéristiques physiques et géométrique et améliorer la précision de détection (en termes de seuil) et de classification, par rapport à des modèles entraînés sur l'ensemble de données contenant une base de signaux TSD et d'images GPR issus du terrain.

De manière plus globale, cette thèse vise à :

- Concevoir et implémenter un outil hybride permettant la simulation du comportement complexe de la structure de chaussée multi-couches sollicitée dynamiquement (aux niveaux mécanique (Alizé) et diélectrique (gprMax3D)). La structure simulée pourra être saine ou présenter des défauts (fissures, décollements, ...).
- Mettre en place un algorithme d'identification inverse des paramètres mécaniques résiduels de chaque couche et des défauts, basé sur l'apprentissage profond génératif (intelligence artificielle).
- Cartographier la caractérisation mécanique d'une chaussée à partir de données de mesures de déflexion obtenues en déplacement (TSD) et d'imagerie électromagnétique de la subsurface (GPR – Radar 3D).