

## Inversion d'un profil de propriétés mécaniques non-linéaires par mixing d'ondes ultrasonores de surface

---

|                              |                                                                                               |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Période :                    | 10/2026 - 10/2029                                                                             |
| Spécialités de la thèse :    | Acoustique, Ultrasons, Évaluation non destructive des matériaux                               |
| Lieu :                       | Université Gustave Eiffel, Campus de Nantes                                                   |
| Laboratoire :                | Géophysique et Évaluation Non Destructive (GéoEND)                                            |
| École doctorale :            | Sciences Pour l'Ingénieur (SPI)                                                               |
| Financement :                | Université Gustave Eiffel                                                                     |
| Encadrant :                  | Pierric Mora, <a href="mailto:pierric.mora@univ-eiffel.fr">pierric.mora@univ-eiffel.fr</a>    |
| Directrice de thèse :        | Odile Abraham, <a href="mailto:odile.abraham@univ-eiffel.fr">odile.abraham@univ-eiffel.fr</a> |
| Date limite de candidature : | Prise de contact avant le 01/04, <a href="#">candidature en ligne</a> : 08/04                 |

---

**Mots clés :** Acoustique non-linéaire, Contrôle non-destructif, Gradients de propriétés, Onde de Rayleigh, Problèmes inverses

**Contexte :** Caractériser un gradient de propriétés mécaniques en surface d'un matériau est une étape préliminaire à nombre d'applications en évaluation non destructive. Un tel gradient peut en effet renseigner sur la présence et la progression d'une dégradation, la qualité d'un traitement de surface, ou plus généralement sur un facteur conditionnant la durée de vie restante. Cette thèse se place plus particulièrement dans le contexte de la détection précoce de pathologies des premiers centimètres du béton ayant pour fonction de protéger de la corrosion les armatures d'acier : un exemple de pathologie importante actuellement mal détectée de manière non-destructive est la carbonatation.

Par rapport aux observables ultrasonores linéaires, l'acoustique non-linéaire offre en général une sensibilité accrue aux changements micro-structuraux et s'est montrée une alternative prometteuse. Notamment, des travaux récents ont mis en évidence que l'effet de mixing nonlinéaire générant une onde P à partir de deux ondes de surface [1] a un potentiel intéressant pour s'appliquer à un matériau hétérogène et dissipatif comme le béton [2]. Comme pour d'autres effets linéaires ou nonlinéaires [3], varier la fréquence des ondes primaires permet de sonder différentes profondeurs. A ce jour, une preuve de concept a été donnée de la détection d'un endommagement de surface [2], sans aller jusqu'à une véritable caractérisation d'un profil. L'objectif de cette thèse est de développer une méthode de résolution du problème inverse basée sur cet effet de mixing, dans le but de quantifier une variation de propriétés nonlinéaires dans la profondeur du matériau.

**Objectifs :** Le travail de cette thèse sera principalement sous forme de modélisation numérique et utilisera le langage Python et la bibliothèque d'éléments finis Fenicsx.

- Modéliser numériquement le phénomène de mixing d’ondes de Rayleigh dans un demi espace à gradient de propriétés non-linéaires et homogène ou hétérogène pour ses propriétés linéaires. La non-linéarité sera traitée suivant la loi hyperélastique de Murnaghan. Les modélisations viseront à représenter la propagation dans un béton (longueur d’onde centimétrique).
- Formuler un problème inverse pour déduire un profil de propriétés non-linéaires en fonction de la profondeur à partir d’informations de surface. La cible porte sur les 3 à 5 premiers centimètres du béton. L’étude pourra s’étendre à d’autres matériaux et échelles, notamment les premiers 0.2 à 1mm de l’acier.
- Sur la base d’expériences numériques, quantifier la résolution de cette nouvelle méthode. Étudier sa robustesse à des conditions dégradées (bruit, étendue fréquentielle limitée des données d’entrée, hétérogénéité ou atténuation du matériau, etc) et identifier des stratégies pour y faire face.
- Appliquer la méthode d’inversion à des données expérimentales existantes ou nouvelles.

### Références :

- [1] S. Gartsev, P. Zuo, M. Rjelka, A. Mayer & B. Koehler, Nonlinear interaction of Rayleigh waves in isotropic materials: Numerical and experimental investigation, Ultrasonics (2022), 122, 106664
- [2] M. Fengal, Evaluation of gradients of nonlinear mechanical properties using ultrasounds: Application to thermally damaged concrete, thèse de doctorat (2025), Univ Gustave Eiffel
- [3] P. Mora & M. Spies, Rayleigh wave harmonic generation in materials with depth-dependent non-linear properties, JASA (2018), vol. 143 (5), p. 2678-2684

### Pré-requis:

- Master en acoustique ou mécanique.
- Bonnes notions en propagation d’ondes.
- Bonnes notions en modélisation numérique.
- Langage Python.
- Bonne maîtrise de l’anglais.

### Présentation des moyens :

Vous aurez accès à:

- des codes de calcul aux Éléments finis, pour développer la méthode et la tester sur des jeux de données synthétiques.
- des équipements informatiques pour le calcul scientifique.
- des jeux de données expérimentales existants, pour appliquer la méthode sur des données réelles.
- des moyens expérimentaux, pour produire de nouvelles données.
- des conférences internationales, pour y présenter les résultats.