
Proposition de sujet pour un contrat post-doctoral de 18 mois

Application d'une méthode de filtrage pour l'estimation de paramètres de conditions de transmission effectives à partir de données ultrasonores

Alexandre IMPERIALE : alexandre.imperiale@cea.fr,
Philippe MOIREAU : philippe.moireau@polytechnique.edu

Mot-clés :

Assimilation de données ; filtrage de Kalman ; méthodes numériques pour la propagation d'ondes ; Contrôle Non-Destructif par ultrasons ; Conditions de transmissions effectives.

Contexte et objectifs

Le CEA-List est un institut de recherche et de développement technologiques engagé depuis de nombreuses années dans la mise en place et l'évaluation de méthodes de Contrôle Non-Destructif (CND), en lien avec des besoins de l'industrie de pointe (énergie nucléaire, industrie ferroviaire, etc...). Afin d'adresser efficacement ces besoins, les méthodes de CND, visant à inspecter le matériau (sans l'endommager) à la recherche d'éventuels défauts, reposent potentiellement sur plusieurs types de physiques. On pourra citer tout particulièrement **la propagation des ondes élastiques et/ou acoustiques** pour les contrôles ultrasonores. Pour permettre d'évaluer la performance de ce type de méthode, le Laboratoire de Simulation, de Modélisation et d'Analyse (LSMA) du CEA-List continue d'investir dans la constitution d'outils de simulation [1], dont fait partie la méthode des éléments finis spectraux pour la résolution de la propagation des ondes ultrasonores en domaine temporel [4]. Cette approche propose une approximation consistante de la solution exacte du modèle de propagation. Ainsi, sous réserve que les paramètres constitutifs de ce modèle sont connus, tels que la vitesse des ondes dans le fluide, l'élasticité des matériaux solides ou encore les conditions limites, il est possible de résoudre le problème direct, c'est-à-dire d'obtenir une bonne approximation de la solution exacte.

MEDISIM est une équipe-projet d'Inria Saclay Île-de-France commune avec l'Ecole Polytechnique. Un des axes principaux de recherche de cette équipe-projet est de proposer des méthodes innovantes de **résolution de problèmes inverses** afin de profiter au mieux de données et observations disponibles sur un système d'intérêt pour réduire d'éventuelles incertitudes, notamment sur les paramètres d'entrées.

Le contexte général du sujet s'inscrit dans la continuation d'une collaboration entre le CEA-List et l'Inria sur **la problématique d'estimation de paramètres constitutifs du modèle de propagation d'ondes acoustiques ou élastiques**, et ce à partir de données partielles et potentiellement bruitées, disponibles sur la solution du problème cible. Pour étudier ce problème, on peut distinguer deux grandes familles d'approche. D'une part, il existe **les méthodes variationnelles** [7], appelées aussi *Full Waveform Inversion* en géophysique. En partant d'une écriture du problème sous la forme d'un problème de minimisation, ces méthodes cherchent à effectuer les itérations successives d'un algorithme de descente en espérant converger vers les paramètres cibles. Ces approches sont robustes par rapport à la taille de l'espace paramétrique, mais nécessitent généralement un grand nombre de résolutions de problèmes directs. D'autre part, il existe **les méthodes de filtrage** qui cherchent à ajuster la dynamique du problème direct en utilisant une boucle de rétro-action proportionnelle à l'écart par rapport aux données disponibles. Ces méthodes sont généralement moins coûteuses en termes de nombre de résolutions de problèmes directs, mais le coût mémoire des algorithmes qui en découlent est très limitant dans le cas d'un large espace paramétrique. Les méthodes de filtrage d'intérêt dans le cadre du travail proposé sont



le filtrage de Kalman et son extension au cas non-linéaire [6].

Dans un travail de thèse [2] récemment abouti, une stratégie de filtrage combinant à la fois les itérations d'une méthode de descente de type Levenberg-Marquardt avec une approche par filtrage de Kalman sans gradient a été mise au point. De premières évaluations de l'algorithme ont été menées à bien afin de reconstruire la pré-déformation d'une géométrie de plaque à partir de données ultrasonores de type ondes guidées. Dans ce contexte, l'objectif principal du travail proposé est d'une part de **consolider les connaissances et la mise-en-œuvre de l'approche proposée**, et de **confirmer son efficacité et son intérêt dans d'autres configurations de CND par ultrasons**. Un cas d'application d'intérêt particulier dans le cadre de ce travail sera la reconstruction des paramètres de Conditions de Transmission Effectives (CTEs) [5, 3], pouvant typiquement représenter : un défaut de délaminage entre deux couches d'un matériaux composite, un collage imparfait entre un capteur ultrasonore et la pièce inspectée, ou encore une interface présentant une rugosité de dimensions caractéristiques inférieures à la longueur d'onde minimale utilisée pour le contrôle. Dans les cas pratiques industriels, les paramètres de ces CTEs sont difficiles à obtenir. Ainsi, l'intérêt de mettre en place un procédé de filtrage est d'offrir, dans les cas complexes, une calibration automatique des paramètres effectifs de ces modèles.

Le travail proposé comporte une partie théorique (compréhension du modèle de propagation, et de la méthode de filtrage proposée), d'une partie d'implémentation sur la base de codes existants au CEA-List et à l'Inria, et d'une partie de mise-en-œuvre sur des cas dédiés au CND par ultrasons. **Afin de postuler pour ce contrat post-doctoral de 18 mois, un diplôme de doctorat en mathématiques appliquées, physique mathématiques ou un autre domaine connexe est nécessaire**. La ou le candidat-e doit avoir un goût prononcé pour les problématiques d'inversion, de simulation et d'analyse numérique, ainsi que pour l'implémentation des algorithmes associés. Des compétences en programmation C++ et Python sont indispensables. La ou le candidat-e sélectionné-e sera salarié-e du CEA Saclay. Elle ou il interagira avec l'équipe du LSMA au département DIN, ainsi qu'avec l'équipe-projet M Ξ DISIM d'Inria Saclay Île-de-France. Elle ou il pourra bénéficier des facilités de transport et de restauration du CEA et de l'Inria.

Pour postuler, merci d'envoyer aux deux porteurs de ce sujet (voir contacts ci-après) un CV, une courte lettre de motivation, un lien vers la thèse et/ou toute communication associée, et possiblement une ou des lettres de recommandation.

Contacts

Alexandre IMPERIALE, ingénieur – chercheur CEA
CEA-List, Laboratoire de Simulation, Modélisation et Analyse
CEA Saclay Digitéo Labs | Bât. 565-PC120
e-mail : alexandre.imperiale@cea.fr

Philippe MOIREAU, chercheur à Inria et Ecole Polytechnique, responsable de l'équipe-projet M Ξ DISIM
Inria Saclay Île-de-France, équipe-projet M Ξ DISIM
Bâtiment Alan Turing, Campus de l'École polytechnique
e-mail : philippe.moireau@polytechnique.edu

Financement

Ce travail bénéficie d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de France 2030 portant la référence "ANR- 24-RRII-0004".



Références

- [1] CIVA simulation platform for Non-Destructive Testing. <https://www.extende.com/fr>.
- [2] André Dalmora. Modeling and Data Assimilation for Ultrasonic Guided Waves in Structural Health Monitoring under Operational Loading Conditions. PhD thesis, 2023. Thèse de doctorat dirigée par Moireau, Philippe Impériale, Alexandre et Imperiale, Sébastien Ingénierie, mécanique et énergétique Institut polytechnique de Paris 2023.
- [3] Alexandre Imperiale. An energy preserving time scheme based on the mortar element method for effective transmission conditions between fluid and solid domains in transient wave propagation problems. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 124(14) :3250–3273, 2023.
- [4] Alexandre Imperiale and Edouard Demaldent. A macro-element strategy based upon spectral finite elements and mortar elements for transient wave propagation modeling. application to ultrasonic testing of laminate composite materials. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 119(10) :964–990, 2019.
- [5] Alexandre Imperiale, Nicolas Leymarie, and Edouard Demaldent. Numerical modeling of wave propagation in anisotropic viscoelastic laminated materials in transient regime : Application to modeling ultrasonic testing of composite structures. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 121(15) :3300–3338, 2020.
- [6] Moireau, Philippe and Chapelle, Dominique. Reduced-order unscented kalman filtering with application to parameter identification in large-dimensional systems. ESAIM : COCV, 17(2) :380–405, 2011.
- [7] Jean Virieux and Stéphane Operto. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics. Geophysics, 74(6) :WCC1–WCC26, 2009.