

# Imagerie Passive Basse Fréquence en domaine borné

## Version détaillée

**L'exigence de performances avancées et continues en CND<sup>1</sup> et SHM<sup>2</sup> sous contraintes d'accessibilité réduite, de résilience et de parcimonie de l'instrumentation, croît avec la demande de sûreté. Pour cela, une voie très intéressante est d'exploiter les sources acoustiques et vibratoires d'opportunité présentes au sein d'un réacteur afin de développer des procédures d'imagerie de scènes et de contrôle d'intégrité des structures. L'aptitude à travailler en basse fréquence en domaine réverbérant par mesures passives est l'originalité des méthodes élaborées.**

### Contexte :

La nécessité d'un niveau de sécurité maximal attendu des réacteurs de générations 3 et 4, nécessite d'étendre l'assiette de l'information utile à la surveillance de l'intégrité des structures et à l'imagerie des scènes d'intérêt. Le travail en milieu extrême tel que subi au sein d'un réacteur impose par ailleurs une robustesse spécifique de l'instrumentation préconisée.

Afin de réduire les problématiques liées aux conditions opérationnelles d'un réacteur, notamment en termes d'accessibilité réduite et de résilience, il est envisagé de développer des procédures d'imagerie et de contrôle d'intégrité exploitant principalement les sources acoustiques et vibratoires d'opportunité associées au bon fonctionnement du réacteur. Ces sources résultent en pratique d'une part de l'interaction du fluide caloporteur (eau, sodium liquide, sels fondus) avec les différentes structures mécaniques et d'autre part sont générées par divers processus physiques tels que les chocs (mécaniques, dilatation thermique), la turbulence, les pompes etc. Ainsi, ces sources diverses peuvent être délocalisées dans tout le domaine confiné, et présenter un contenu spectral très basse-fréquence ; elles permettront d'adresser la problématique de parcimonie instrumentale.

### Objectif de la thèse :

A la différence des méthodes dites « actives » de caractérisation de la réponse d'un milieu sondé entre deux capteurs (la fonction de Green), les méthodes à développer dans cette thèse minimisent, voire éliminent, le nombre de projecteurs acoustiques utilisés pour l'inspection ; elles les remplacent par des mesures interférométriques de la cohérence spatio-temporelle entre signaux aléatoires issus d'un réseau de récepteurs. Cette cohérence spatio-temporelle n'est autre que l'« image » de la scène 3D (statistiquement) stationnaire décrivant l'ensemble des composants du réacteur. L'extraction d'information déterministe est appréhendée par la corrélation de séquences temporelles du bruit ambiant mesuré aux récepteurs [1]-[3]. Ceci permet de recouvrer l'ensemble des fonctions de Green constituant le fondement du système d'imagerie ou de contrôle. L'intégration « longue », en accumulant suffisamment d'énergie dans la bande spectrale décrivant l'objet ou la zone à caractériser, facilite l'inversion délicate des données (problème mal conditionné). Pour accroître le contraste des images, les méthodes usuelles d'inversion de type Focalisation en Tout Point, tomographiques ou de filtrage adapté (MFP, MVDR, WNGC) [4] seront enrichies d'un modèle de propagation décrivant l'objet/la scène de référence [5],[6]. Il reviendra alors à concevoir des méthodes d'imagerie différentielles temporelles i.e. Imagerie Topologique ou spectrale (MFP) qui offriront de plus la possibilité d'éliminer les effets délétères (Rapport Signal à Bruit) de la réverbération ; celle-ci est d'autant plus marquée que les fréquences de travail sont basses. Le risque est alors de dégrader la perception des altérations (déformations, défauts) par un effet de masquage par réplication de la source ambiante [7]-[9].

Toutefois, dans ce contexte de sobriété, la réverbération peut aussi être source d'information par l'augmentation du nombre d'incidences (trajets multiples) potentiellement utilisables qu'elle génère et qui peut accroître l'ouverture numérique (i.e. la résolution) de l'instrument d'imagerie [10]. La condition requise pour son exploitation est la mise en cohérence spatio-temporelle des données acquises à l'instar, par exemple, de ce qui est pratiqué en sonar passif par petit fonds où les ondes balistiques sont exploitées [11].

---

<sup>1</sup> Contrôle Non Destructif

<sup>2</sup> Structural Health Monitoring (Contrôle de l'Intégrité des Structures)

Cette seconde approche requiert davantage d'information *a priori*, et en raison de sa sensibilité aux erreurs de modèle demande une étude spécifique de robustesse.

Outre les retombées attendues en CND et SHM, les principales applications visées dans cette thèse sont :

- le suivi des déplacements des crayons de combustible (en phase de réapprovisionnement) [12]
- la mesure de déformation des structures [13]
- l'inspection de paroi et l'imagerie BF trans-paroi

Le travail de thèse comportera une partie de modélisation très conséquente permettant d'objectiver l'ensemble des concepts (imagerie passive topologique, synthèse de source vibratoire hydrodynamique, annulation/exploitation de la réverbération, parcimonie). Ces objets numériques seront élaborés sur des exemples académiques représentatifs en utilisant des progiciels reconnus en interaction fluide-structure (SPECFEM, Openfoam, COMSOL) et en CFD (Fluent, Openfoam, COMSOL). Ils seront dans la mesure du possible validés par des expérimentations menées dans une cuve en eau dans les installations du CEA Cadarache.

L'étudiant débutera sa thèse par une étude bibliographique approfondie et renforcera ses compétences sur la base des travaux préliminaires réalisés au LISM en partenariat avec le laboratoire de mécanique et d'acoustique (LMA) thèse E. Lubeigt, *Imagerie Topologique* [14], Post Doc E. Lubeigt au Marine Physical Laboratory (MPL, Dir. W. Kuperman ; San Diego), *Imagerie passive en espace libre, et Etude expérimentale de l'imagerie passive* par Khaled Metwally. Le travail de thèse pourra être jalonné selon la feuille de route suivante :

- Appropriation des outils numériques (CFD et Interaction fluide structure) et expérimentaux
- Appropriation des méthodes de d'imagerie différentielles passives (tomographique, topologique, MFP)
- Modélisation et simulations CFD de sources hydrodynamiques académiques
- Construction d'un référentiel de sources de bruit (vibration, acoustique) en réacteur
- Développement des méthodes d'imagerie différentielles passives (tomographique, énergie topologique, MFP) en espace confiné réverbérant
- Elaboration d'une méthodologie de mesure interférentielle en fluide en mouvement
- Application des méthodes d'imagerie passive au suivi de déplacement de crayons de combustible (simulation numérique).
- Application des méthodes d'imagerie passive à l'inspection de paroi et à l'imagerie trans-paroi : simulation numérique et expérimentation
- Application des méthodes d'imagerie passive à la mesure de déformation de structures : simulation numérique et expérimentation

#### Acteurs en présence, partenariats :

Le LISM – Laboratoire d'Instrumentation, Systèmes et Méthodes du CEA Cadarache – est spécialisé dans le développement d'instrumentation pour les milieux extrêmes (irradiation, hautes températures, corrosion...) et en particulier pour le sodium liquide. Il possède entre autres des compétences dans les domaines de l'imagerie acoustique, de la conception de transducteurs TUSHT et multiéléments haute température, de la génération de microbulles (en eau et sodium liquide) et de leur caractérisation acoustique. Le LISM dispose par ailleurs de moyens expérimentaux acoustiques et hydrodynamiques à travers les plateformes CUMULUS et MICAS (échelle 1/6<sup>e</sup> du cœur sur PLATEAU).

Le LMA – Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique du CNRS Marseille – possède des compétences très variées, entre autres dans les domaines de la propagation d'ondes en milieu complexe (code SpecFEM), en imagerie active et passive, tomographique et topologique et en génération et caractérisation de microbulles.

Une thèse exploitant la méthode de l'énergie topologique [14] a été effectuée entre 2013 et 2017 au LISM avec le LMA en direction universitaire. Les travaux de cette thèse ont été étendus à l'imagerie passive en espace infini par des études post-doctorales menées au MPL. Enfin, des expérimentations préliminaires d'imagerie passive en cuve ont été développées au LISM en partenariat avec le LMA.

Références (copies numériques sur demande) :

- [1] Boschi L., Weemstra C., Stationary-phase integrals in the cross correlation of ambient noise, *Reviews of Geophysics*, vol 53, 2, pp 411-451 (2015)
- [2] Roux P., Sabra K., Kupperman W., Roux A., Ambient noise cross correlation in free space: Theoretical approach, *J. Acoust. Soc. Am.*, 117, 7pp 9-84 (2005)
- [3] Colombi, A., Boschi, L., Roux, P., & Campillo, M., "Green's function retrieval through cross-correlations in a two-dimensional complex reverberating medium", *Journal of the Acoustical Society of America* 135, 1034 (2014)
- [4] Lubeigt E., Rakotonarivo S., Mensah S., Chaix JF, Baqué F., Kuperman W., "Passive structural monitoring based on data-driven matched field processing", *JASA* 145(4) EL317 (2019)
- [5] Dominguez N., Gibiat V. – *Non-destructive imaging using the time domain topological energy method* - *Ultrasonics* 50 367–372, (2010)
- [6] Metwally K., Lubeigt E., Chaix JF., Rakotonarivo S., Gobillot G., Baqué F., Mensah S., "Weld inspection by focussed adjoint method", *Ultrasonics*, page 80-87, 2018
- [7] Colombi, A., Boschi, L., Roux, P., & Campillo, M., "Green's function retrieval through cross-correlations in a two-dimensional complex reverberating medium", *Journal of the Acoustical Society of America* 135, 1034 (2014) <https://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.4864485>
- [8] Chehami E., Moulin E., de Rosny J, Prada C., Bou Matar O., Benmeddour F., Assad J., Detection and localization of a defect in reverberant plate using acoustic field correlations, *J. Appl. Phys.*, vol 115, (10), 2014
- [9] Chehami E., de Rosny J, Prada C., Moulin E., Assad J., Experimental study of passive defect localization in plates using ambient noise, *IEEE Trans. UFFC*, vol 62, (8), 2015
- [10] Garnier J., Papanicolaou G, *Passive imaging with ambient noise*, Cambridge Univ. Press, page 81
- [11] Rakotonarivo S., Kuperman W., Model-independent range localization of a moving source in shallow water, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 132, 2218 –2223 (2012)
- [12] Rakotonarivo S., Walker S., Kuperman W., Roux P., Localization of a small change in a multiple scattering environment without modeling the actual medium, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 130, 3566 – 3573 (2011)
- [13] Sabra K., Roux P. Thode M., Hodgkiss W., Kuperman W., Using ocean ambient noise for array self-localization and self-synchronization, *IEEE J. Ocean Eng.* Vol. 30, (2), pp. 338-347, 2005
- [14] Lubeigt E. – *Imagerie topologique de domaines élastiques bornés – Application au contrôle non destructif des soudures* – Thèse de doctorat, Aix Marseille Université, Soutenue le 7 février 2017

Profil recherché :

Master 2 Acoustique ou Ingénieur ayant suivi une spécialisation en mathématique, en mécanique ou en propagation d'ondes/acoustique (ECL (Lille, Lyon), ECM, ECN, ENSERB, ENS Cachan, ENSIM, ENSTA, INSA, UTC, ...)

Possibilité de stage bac+5 préliminaire à la thèse : OUI au premier semestre 2020

---

Centre CEA :

**CADARACHE (13)**

Laboratoire CEA :

Direction de l'Energie Nucléaire (DEN)  
Département de Technologie Nucléaire (DTN)  
Service des Technologies des Composants et Procédés (STCP)  
**Laboratoire d'Instrumentation, Systèmes et Méthodes (LISM)**  
Bâtiment 202 – 13108 Saint Paul lez Durance

Encadrant : Frédéric MICHEL ([michel.frederic@cea.fr](mailto:michel.frederic@cea.fr) – 0442254784)

Chef de laboratoire : J-Ph. Jeannot ([jean-philippe.jeannot@cea.fr](mailto:jean-philippe.jeannot@cea.fr) – 0442253710)

Direction universitaire : **Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA)**  
UMR 7031 AMU - CNRS - Centrale Marseille  
Equipe Ondes et Imagerie  
4 impasse Nikola Tesla, CS 40006, 13453 Marseille Cedex 13

Direction de thèse :

Serge Mensah – MCF, HDR ([serge.mensah@centrale-marseille.fr](mailto:serge.mensah@centrale-marseille.fr) – 04 84 52 42 84)  
Sandrine Rakotonarivo – MCF ([sandrine.rakotonarivo@univ-amu.fr](mailto:sandrine.rakotonarivo@univ-amu.fr))

Ecole Doctorale : ED 353 (Aix-Marseille Université)  
Sciences pour l'Ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nano-Électronique

Date souhaitée pour le début de la thèse : Octobre-Novembre 2020